UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FÍSICA
BACHARELADO EM FÍSICA MÉDICA

Thalys Matheus Gama de Oliveira

Resposta a Fótons de um Monitor de Nêutrons de Albedo

Rio de Janeiro
2025

Thalys Matheus Gama de Oliveira

Resposta a Fótons de um Monitor de Nêutrons de Albedo

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Física Médica.

Aprovado em: _____ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
DENISON DE SOUZA SANTOS
Data: 27/02/2025 16:19:14-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dr. Denison de Souza Santos – IRD/CNEN

Documento assinado digitalmente
JOSILENE CERQUEIRA SANTOS
Data: 26/02/2025 09:43:09-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dra. Josilene Cerqueira - IF/UFRJ

Documento assinado digitalmente
MAXIMIANO CORREIA MARTINS
Data: 25/02/2025 12:52:36-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dr. Maximiano Martins – UERJ

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe Emilene Gama, minha avó Ivete Gomes e minha tia e madrinha Ivone Paes por sempre me apoiarem e pelo cuidado comigo e meu irmão. Deixo um agradecimento especial a minha dinda que foi um verdadeiro exemplo de ser humano.

Obrigado Eduardo Gama, meu irmão, por aprendermos divisão juntos para dividir biscoitos, bolos e etc. Sou e feliz pelo crescimento que vem tendo.

Agradeço muito as minha primas Thais Oliveira e Júlia Azevedo por serem verdadeiras inspirações para minha vida pessoal e profissional.

Agradecimento especial a Ana Clara Machado, minha parceira de vida e de dança, por ser uma pessoa incrível, meu suporte e que transforma momentos bons em espetaculares.

Muito obrigado aos amigos da Fundação Osório, Nelder, Eduarda e Letícia pelas ótimas resenhas e risadas.

Agradeço ao meu pai Marco Aurélio e a Samara dos Reis, pelo apoio e aos ensinamentos de vida e de dança.

Ao fundadores da NeoAtom, deixo meu agradecimento por toda troca e parceria que tivemos e desafios que enfrentamos juntos.

Aos amigos que fiz no estágio no LCR, Juliana Moura, Beatriz Assis e Wellington Guedes sou feliz e grato pela experiência e amizade que desenvolvemos.

À professora Simone Coutinho, agradeço imensamente pelos ensinamento e trocas ao longo do curso. Com certeza agregam muito na minha vida profissional.

Agradeço a Maria Clara, pelas trocas que tivemos com Geant4 que me ajudaram bastante.

Deixo meu agradecimento ao meu orientador, Prof. Dr. Denison de Santos, que me ensinou muito e teve muita paciência.

Agradeço aos amigos do Jaime Arôxa Tijuca pelo aprendizado, bons momentos em aulas, ensaios e apresentações. A dança com vocês, além de um hobby, se tornou um terapia pelo bem que me faz.

Muito obrigado a todos que cruzaram meu caminho e, de alguma forma, me ajudaram e incentivaram ao longo dos altos e baixos dessa jornada.

RESUMO

O Instituto de Radioproteção e Dosimetria opera um serviço de avaliação de doses individuais de nêutrons, utilizando um modelo monitor de nêutrons do tipo albedo desenvolvido no próprio Instituto. O monitor foi calibrado nos campos de diversas fontes de nêutrons e é composto por dois pares de cristais termoluminescentes, par incidente e par de albedo. Cada par possui um cristal ^{6}LiF e um ^{7}LiF, TLDs 600 e 700, respectivamente. O TLD 600 é sensível a fótons e a nêutrons, já o TLD 700 é sensível somente a fótons. A sensibilidade dos cristais termoluminescentes a nêutrons, no entanto, dificultam a avaliação das doses de fótons quando estas são comparáveis às doses de nêutrons. A motivação para este trabalho é verificar a possibilidade de usar este monitor para avaliar dose de fótons de trabalhadores ocupacionalmente expostos. Assim, o objetivo principal deste trabalho é verificar a resposta do monitor de nêutrons de albedo aos campos de fótons usados na calibração de monitores individuais pela norma ISO 4037-3. Uma versão do monitor de albedo já implementada no código de simulação computacional Geant4 foi utilizada para obtenção das doses nos cristais para vários campos de referências e calibração em $H_P(10)$ para estes campos. Os resultados das simulações mostraram que o monitor simulado é mais sensível a baixas energias e a calibração dos cristais na grandeza $H_P(10)$ mostrou que a curva do par de albedo é a mais adequada para avaliar a grandeza. Foi feita uma parte experimental onde o monitor foi exposto às fontes de ^{241}Am e ^{137}Cs livre no ar e sobre o *slab phantom* da ISO para analisar a influência do rertoespalhamento causado pelo simulador. Simulações reproduzindo de forma aproximada as condições do laboratório foram realizadas para validar a descrição do monitor simulado. As comparações entre as simulações e as exposições no laboratório mostram que o *slab phantom* da ISO aumenta os valores de dose e leitura dos cristais no par incidente em aproximadamente (37 ± 4)% e em torno de (76 ± 4)% no par de albedo quando exposto ao ^{241}Am no laboratório e (46 ± 9)% no incidente e (80 ± 7)% no de albedo nas simulações. As exposições ao ^{137}Cs tiveram um aumento menor nos pares, em torno de 15% o incidente e 16% no de albedo, no laboratório. Nas simulações foi de (8 ± 6)% no par incidente e (10 ± 5)% no de albedo. Esses valores são compatíveis entre si e validam a descrição do monitor no Geant4 e seu uso para calibração em $H_P(10)$ devido aos fótons.

ABSTRACT

The Institute of Radiological Protection and Dosimetry operates a neutron individual dose assessment service using an albedo-type neutron monitor developed in-house. The monitor, calibrated in neutron fields from various sources, consists of two pairs of thermoluminescent crystals: an incident pair and an albedo pair, each composed of ^{6}LiF (TLD 600) and ^{7}LiF (TLD 700). While TLD 600 is sensitive to both photons and neutrons, TLD 700 is sensitive only to photons. However, the sensitivity of these crystals to neutrons complicates photon dose assessment when neutron doses are comparable. This study aims to evaluate the feasibility of using this monitor for photon dose assessment in occupationally exposed workers. The primary objective is to analyze its response to photon fields used for individual monitor calibration according to ISO 4037-3. A Geant4-based computational model of the albedo monitor was employed to determine crystal doses for various reference fields and HP(10) calibration. Simulation results demonstrated that the monitor is more sensitive to low-energy photons, with the albedo pair's response curve being the most suitable for HP(10) evaluation. An experimental study was conducted, exposing the monitor to ^{241}Am and ^{137}Cs sources both in free air and on the ISO slab phantom to assess backscattering effects. Simulations approximating laboratory conditions validated the monitor's computational model. Comparisons between simulations and laboratory exposures indicated that the ISO slab phantom increases dose readings in the incident pair by approximately (37 ± 4)% and in the albedo pair by (76 ± 4)% when exposed to ^{241}Am in the laboratory, and (46 ± 9)% and (80 ± 7)%, respectively, in simulations. For ^{137}Cs exposures, the increases were smaller, around 15% and 16% in the laboratory, and (8 ± 6)% and (10 ± 5)% in simulations. These consistent results validate the monitor's description in Geant4 and its suitability for HP(10) calibration for photon dosimetry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Design do monitor individual de nêutrons tipo albedo de duas componentes do IRD. Fonte: [10].....3
Figura 2 - Predominância dos efeitos de interação de fótons com a matéria. Fonte: Figura extraída de Attix [6]..... .7
Figura 3 - Cinemática do efeito fotoelétrico. Fonte: Figura extratída e adaptada de Attix [6]...8
Figura 4 - Cinemática do efeito Compton. Fonte: Figura extraída de Attix [6].....8
Figura 5 - Produção de par em um campo coulombiano nuclear. Fonte: Figura extraída e traduzida de Attix [6]..... .9
Figura 6 - Tipos de colisão de uma partícula carregada com um átomo em termos do parâmetro de impacto. Fonte: Figura adaptada de Podgorsak [7].....10
Figura 7 - Esquema ilustrativo do espalhamento eláastico de nêutrons. Fonte: O autor (2024). 13
Figura 8 - A esquerda é mostrado o modelo do monitor de nêutrons de albedo do IRD e a direita a estrutura do monitor de albedo IRD. Fonte: extraído de Martins et.al. [10].....20
Figura 9 - Esquema dos níveis de energia nos processos de fluorescência e fosforescência. A figura 9 a mostra o processo da fluorescência e a figura 9 b mostra o processo da fosforescência. Fonte: Figura adaptada de Batista [33]..... .22
Figura 10 - Esquema da termoluminescência explicado pela teoria de bandas de energia. I Excitação do cristal e geração do par elétron-buraco; II aprisionamento dos portadores de carga; III elétron liberado devido ao aquecimento do cristal; IV recombinação do par elétron-buraco. Fonte: Figura adaptada de Batista 23
Figura 11 - Curvas TL dos TLD-600 e TLD-700 devido a irradiação com um campo misto de nêutrons e fótons. Fonte: figura extraída de [37].....25
Figura 12 - Interface gráfica para o usuário do Geant4 e visualização de simulação. Fonte: O autor (2025).....27
Figura 13 - Esquema da geometria utilizada para estudar a resposta dos TLDs 600 e 700. A figura 13a ilustra a geometria para obter a resposta para as energias abaixo de 662 keV. A

Figura 13b ilustra a matriz dentro do suporte de PMMA para obter a resposta para energias do ^{137}Cs e ^{60}Co. Fonte: O autor (2024)..... .30
Figura 14 - Ilustração da geometria utilizada para irradiar o monitor sobre o slab phantom com os campos de referência da norma ISO 4037-1 . Fonte: O autor (2024).....33
Figura 15 - Disposição dos monitores para irradiação com as fontes de Am-241 e Cs-137. A esquerda a montagem utilizada para irradiar os monitores livres no ar e a direita a montagem dos monitores sobre o slab phantom. Fonte: O autor (2024)..... .36
Figura 16 - Resposta dos cristais ^{6}LiF e ^{7}LiF normalizadas a resposta obtida pela irradiação com o feixe de Cs-137. Fonte: O autor (2024)..... .41
Figura 17 - Fatores de Calibração para as qualidades *Q* de cada cristal do monitor normalizados ao Cs. O índice *i* se refere ao par de cristais para a radiação incidente e o índice *a* para o par de albedo. Fonte: O Autor (2024)..... .44
Figura 18 - Montagem experimental no LABIR. A figura (a) mostra os cinco monitores sobre o superte plástico para a irradiação na configuração livre no ar. A figura (b) mostra a montagem para a configuração dos monitores sobre o slab phantom. Fonte: O autor (2023)..46
Figura 19 - Leituras do LABIR e doses das simulações referentes a irradiação do monitor livre no ar com as fontes de Am-241 e Cs-137 normalizadas ao LiF-6 do par incidente. Fonte: O autor (2024).....52
Figura 20 - Leituras do LABIR e doses das simulações referentes a irradiação do monitor sobre o *slab phantom* com as fontes de Am-241 e Cs-137 normalizadas ao LiF-6 do par incidente. Fonte: O autor (2024)..... .53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação dos nêutrons em termos da energia cinética.....12
Tabela 2. Fatores de peso da radiação.....17
Tabela 3. Fatores de peso de tecido ou órgão.....17
Tabela 4. Campos de referência usados para a irradiação do monitor de albedo sobre o Slab Phantom..... .33
Tabela 5. Coeficiente de conversão de Kerma no ar para $H_p(10)$ para cada campo de referência.....34
Tabela 6. Distribuição dos 25 monitores e das duas fontes radioativas utilizados no LABIR. 35
Tabela 7. Média das doses nos ^{6}LiF e ^{7}LiF obtidas a partir da matriz de TLD e Kerma no Ar (Ka) para cada qualidade de radiação. Teste de compatibilidade entre as doses nos ^{6}LiF e ^{7}LiF. Valores simulados para $2{,}5\cdot10^8$ histórias.....40
Tabela 8. Resposta relativa ao Cs-137 dos cristais ^{6}LiF e ^{7}LiF para cada qualidade de radiação conforme a equação 19 e a comparação entre estes cristais e o LiF através do teste Z, com intervalo de confiança de 3σ. A comparação entre a resposta do ^{6}LiF e LiF é representada por Z(^{6}LiF e LiF) e a comparação entre o ^{7}LiF e LiF é representada por Z(^{7}LiF e LiF).....41
Tabela 9. Equivalente de Dose Individual calculado a partir do Kerma no Ar..... .43
Tabela 10. Doses obtidas em cada cristal do monitor para cada feixe simulado. Valores simulados para $2{,}5\cdot10^8$ histórias.....44
Tabela 11. Fatores de calibração de cada cristal do monitor para as várias energia usadas nas simulações. Os números 6 e 7 referem-se, respectivamente, ao TLD-600 e TLD-700. Os índices (i) e (a) representam os cristais do par incidente e do par de albedo, respectivamente. 44
Tabela 12. Fatores de calibração das componentes incidentes e albedo representadas por $Fc_{Inc.}$ e Fc_{Alb}, respectivamente. Os valores de Z da comparação entre a dose das componentes são mostrados na última coluna.....46
Tabela 13. Leituras de BG nos ^{6}LiF e ^{7}LiF dos cinco monitores de controle..... .48

Tabela 14. Leituras *L* referentes a irradiação dos monitores a fonte de Am-241. Os monitores 40001 a 40005 foram expostos na configuração sobre o slab phantom. Os monitores de ID de 40016 a 40020 foram expostos na configuração livre no ar..... .49
Tabela 15. Leituras *L* referentes a irradiação dos monitores a fonte de Cs-137. Os monitores 40006 a 40010 foram expostos na configuração sobre o slab phantom. Os monitores de ID de 40011 a 40015 foram expostos na configuração livre no ar.....50
Tabela 16. Média das leituras nos cristais dos monitores nas exposições as fontes de Am-241 e Cs-137 livre no ar e sobre o Slab Phantom.....50
Tabela 17. Fatores de calibração dos cristais devido a irradiação no LABIR.....51
Tabela 18. Doses nos cristais do monitor obtidas nas simulações da exposição ao Am-241 e ao Cs-137 nas configurações Livre no Ar e Sobre o *Phantom*..... .52

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....1
1.1. OBJETIVOS.....3
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....4
2.1. INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA.....5
2.1.1. INTERAÇÃO DE FÓTONS COM A MATÉRIA.....5
2.1.1.1. EFEITO FOTOELÉTRICO.....6
2.1.1.2. EFEITO COMPTON.....7
2.1.1.3. PRODUÇÃO DE PARES.....8
2.1.2. INTERAÇÃO DE PARTÍCULAS CARREGADAS COM A MATÉRIA.....8
2.1.2.1. STOPPING POWER.....9
2.1.3. INTERAÇÃO DE NÊUTRONS COM A MATÉRIA.....11
2.1.3.1. ESPALHAMENTO ELÁSTICO.....11
2.1.3.2. ESPALHAMENTO INELÁSTICO.....12
2.1.3.3. CAPTURA DE NÊUTRONS.....12
2.1.3.4. SPALLATION (ESPALAÇÃO).....12
2.1.3.5. FISSÃO INDUZIDA POR NÊUTRONS.....13
2.2. GRANDEZAS.....13
2.2.1. GRANDEZAS RADIOMÉTRICAS.....13
2.2.2. GRANDEZAS DOSIMÉTRICAS.....14
2.2.3. GRANDEZAS LIMITANTES.....14
2.2.4. GRANDEZAS OPERACIONAIS.....16
2.3. RADIOPROTEÇÃO.....17
2.3.1. MONITOR DE ALBEDO.....18
2.3.2. DOSIMETRIA OCUPACIONAL EXTERNA.....19
2.4. DOSIMETRIA TERMOLUMINESCENTE.....19
2.4.1. TERMOLUMINESCÊNCIA.....19
2.4.2. DOSIMETRIA.....21

2.4.3. APLICAÇÃO DO TLD-600 E TLD-700 NA DOSIMETRIA DE CAMPOS MISTOS DE NÊUTRONS E FÓTONS.....22
3. SIMULAÇÕES PELO MÉTODO DE MONTE CARLO.....24
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....25
4.1. SIMULAÇÕES DE MONTE CARLO..... .25
4.1.1. AVALIAÇÃO DA RESPOSTA DO TLD 600 E TLD 700 A CAMPOS DE FÓTONS.....26
4.1.2. CALIBRAÇÃO DO MONITOR DE ALBEDO COM OS CAMPOS DE REFERÊNCIAS.....29
4.2. EXPERIMENTO.....32
4.3. COMPARAÇÃO ENTRE AS SIMULAÇÕES E O EXPERIMENTO.....34
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....36
5.1. SIMULAÇÕES..... .36
5.1.1. RESPOSTA DO TLD 600 E TLD 700 AOS CAMPOS DE FÓTONS.....36
5.1.2. CALIBRAÇÃO DO MONITOR DE ALBEDO COM OS CAMPOS DE FÓTONS DE REFERÊNCIA.....39
5.2. EXPERIMENTO.....44
5.2.1. COMPARAÇÃO DAS SIMULAÇÕES COM O EXPERIMENTO.....48
6. CONCLUSÕES.....52
7. PERSPECTIVAS FUTURAS.....53

1. INTRODUÇÃO

Desde a descoberta das radiações ionizantes e suas aplicações, pessoas no mundo todo estão constantemente expostas a elas. Por exemplo: os pacientes nas aplicações médicas, os profissionais que lidam com esses pacientes ou atuam em reatores nucleares e em instituições de pesquisa e os indivíduos que não trabalham diretamente com radiação ionizante e não estão sendo expostos por uma aplicação médica, uma recepcionista, por exemplo. Por causa dos efeitos nocivos das exposições à radiação observado na época, em 1928 foi fundada oficialmente a Comissão Internacional de Unidades Radiológicas (International Committee for Radiological Units - ICRU), cujo objetivo principal era propor uma unidade para medir a radiação aplicada na medicina [1].

No mesmo ano, foi fundada a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (International Comission on Radiological Protection - ICRP) para lidar com às crescentes preocupações sobre os efeitos da radiação ionizante observados na comunidade médica [2]. Na época era chamado de Comitê Internacional de Raios X e Radioproteção IXRPC, mas foi reestruturado para considerar os usos da radiação fora da área médica e recebeu seu nome atual em 1950.

Como mencionado anteriormente, existem profissionais que atuam expostos a radiação ionizante. Esses são chamadas de indivíduos ocupacionalmente expostos IOEs e estão presentes em diversos locais, como clínicas, hospitais, industrias, instituições de pesquisa e reatores nucleares, atuando como técnicos em radiologia e radioterapia, tecnólogos, radiologista, físicos e físicos médicos. Devido a essa exposição, a ICRU criou grandezas operacionais, que permitem realizar a monitoração de exposição de áreas e dos IOEs . A monitoração dos IOEs pode ser relacionadas com as grandezas de proteção, que permitem calcular e estabelecer um limite para a exposição de tecidos ou órgãos e corpo todo.

No Brasil, atualmente existem órgãos como a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). A CNEN estabeleceu os requisitos básicos de radioproteção para os IOEs dos serviços de medicina nuclear e radioterapia pela elaboração da normativa CNEN NN 3.01 [11]. A ANVISA, elaborou a resolução RDC 611 que estabelece os requisitos de radioproteção para os serviços de radiologia diagnóstica e intervencionista [12]. Além desses órgãos, existem empresas e

instituições que realizam o serviço de monitoração individual de dose nos IOEs para verificar se as exposições atendem aos limites estabelecidos pela legislação vigente.

A monitoração individual de IOEs para raios X e gama, foi realizada por filmes radiográficos por muitos anos. Com o desenvolvimento da dosimetria, dosímetros termoluminescentes passaram a ser utilizados na monitoração individual devido a maior precisão da exposição do IOE [3].

A dosimetria de nêutron por muito anos foi feita com o uso de filmes NTA do tipo A, porém esse dosímetro apresenta limitações de uso por não serem sensíveis a nêutrons de energia inferior a 0,7 MeV, sensibilidade a fótons e desvanecimento rápido. Essa limitações tornam esse dosímetro mais adequado a dosimetria de nêutrons de alta energia, pois a contribuição dos nêutrons predomina sobre a dos fótons.

A partir da década de 70 muitas instituições pelo mundo passara a empregar os dosímetros de albedo para dosimetria de nêutrons com energia de até 10 keV através da avaliação do fluxo de nêutrons retroespalhados no corpo humano pela técnica de albedo [39]. Ainda nos dias atuais, o principal problema na avaliação da dose de nêutrons, é a calibração do sistema dosimétrico. A calibração é basicamente a obtenção de uma relação entre a leitura de um instrumento qualquer e o valor de referência da grandeza de interesse. No caso dos nêutrons, essa calibração muitas vezes é dificultada por causa da complexidade do arranjo experimental além dos nêutrons espalhamentos nos materiais ao redor do arranjo experimental que interferem na medição [5].

O Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD) da CNEN, opera um serviço de avaliação de dose individual de nêutrons por meio de um monitor de nêutrons albedo do tipo AlNor, desenvolvido no próprio instituto [10]. Os elementos sensíveis do monitor são dois pares de Dosímetros Termoluminescentes (TLDs), TLD-600 que é sensível a nêutrons e fótons, e TLD-700 que é sensível somente a fótons. Ambos igualmente sensíveis a fótons, pois o número atômico efetivo desses são muito similares, 8,2 e 8,1, respectivamente [40].

Além dos elementos sensíveis, o monitor é composto por um corpo moderador de polietileno, uma blindagem para nêutrons térmicos incidentes de carbeto de boro e um suporte plástico onde os componentes estão acoplados. Um dos pares ^{6}LiF e ^{7}LiF é irradiados por nêutrons incidentes enquanto o outro par recebe nêutrons retroespalhados no corpo do usuário, os nêutrons de albedo, como mostra a figura 1.

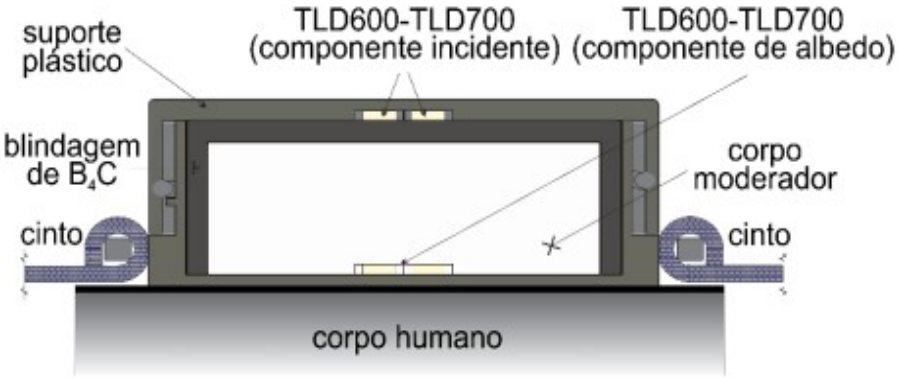

Figura 1 - Design do monitor individual de nêutrons tipo albedo de duas componentes do IRD. Fonte: [10].

O monitor do IRD foi calibrado nos campos de várias fontes de nêutrons como ^{241}Am-Be, ^{252}Cf e nêutrons térmicos para avaliar a grandeza operacional Equivalente de Dose Individual ($H_p(10)$) a partir da diferença de sinal entre os TLD-600 e TLD-700, considerando a razão entre nêutrons incidentes e de albedo [18]. O $H_p(10)$ permite estimar a dose de corpo inteiro, pois considera o espalhamento da radiação no corpo do indivíduo, que depende da composição dos tecidos ou órgãos e suas geometrias, e interpretar essa dose em termos das grandezas de proteção, como a Dose Efetiva *E* que permite estabelecer um limite para a exposição de corpo inteiro.

A sensibilidade dos cristais termoluminescentes a nêutrons, no entanto, dificultam a avaliação das doses de fótons quando estas são comparáveis às doses de nêutrons. Campos de nêutrons provenientes de fontes comerciais sempre vêm acompanhados de uma componente de fótons. Na fonte de 241Am-Be, por exemplo, o Am-241 decai por emissão alfa, acompanhado de um gama de energia de cerca de 60 keV. A partícula alfa por sua vez reage com o Be-9 produzindo um núcleo excitado de C-12 e um nêutron. O C-12 excitado decai através da emissão de um gama de 4,4 MeV. A energia predominante dos fótons é de 60 keV, neste caso [38].

Assim, os usuários destes monitores precisam usar dois monitores diferentes, um para nêutrons e outro exclusivamente para fótons. Por praticidade, o ideal é portar apenas um monitor para avaliar as doses de fótons e de nêutrons. A motivação do presente trabalho é avaliar, através de simulações de Monte Carlo, a possibilidade de usar este mesmo monitor de nêutrons de albedo para avaliar as doses de fótons de trabalhadores ocupacionalmente expostos.

1.1. OBJETIVOS

Diante da ausência de calibração do monitor de nêutrons de albedo para a grandeza $H_P(10)$ devido a fótons, quando o monitor é exposto a um campo misto de fótons e nêutrons, não é possível estimar a dose dos fótons referente a esses campos.

1.1.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste trabalho é verificar a resposta do monitor de nêutrons de albedo aos campos de fótons usados na calibração de monitores individuais pela norma ISO 4037-3 [28] através de simulação computacional com o software *Geometry and Tracking* (Geant4 – G4) [16].

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este trabalho foi composto pela obtenção de resultados obtidos por simulações computacionais utilizando o método de Monte Carlo e experimentos realizados em laboratório e tem como objetivos específicos:

- Obter a resposta a fótons de uma descrição do monitor de nêutrons de albedo já implementada Geant4;
- Obter uma relação entre a dose nos cristais termoluminescentes e o Equivalente de Dose Individual $H_P(10)$ pelo Geant4.
- Comparar os resultados laboratoriais com os obtidos pelas simulações computacionais;
- Validar experimentalmente a simulação do monitor de nêutrons de albedo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Pode se classificar a radiação por sua capacidade de ionizar a matéria. A radiação é ionizante quando possui energia suficiente para excitar ou ionizar o átomo de um meio material com o qual interage. Para ionizar um elétron da camada de valência é necessária uma energia da ordem de 4 a 25 eV [6]. Assim, a radiação deve possuir energia cinética superior para realizar a ionização.

A radiação ionizante pode ser subdividida em relação a sua carga e massa de repouso:

- Partículas carregadas.
  - Partículas leves: elétron e pósitron. São consideradas partículas leves por conta da massa de repouso. O elétron possui carga negativa e o pósitron, por ser antimatéria do elétron, possui carga positiva.
  - Partículas pesadas: partículas cuja massa de repouso é maior que do elétron. São prótons, partículas alfa, deutério
- Partículas de carga neutra.
  - Raios Gama: radiação eletromagnética de origem nuclear, quando o núcleo transita de um estado excitado para um estado de menor energia, ou proveniente da aniquilação de um elétron com um pósitron, antimatéria do elétron.
  - Raios X: radiação eletromagnética de origem eletrônica. A transição eletrônica de um nível mais energético para um de menor energia emite um fóton cuja energia é igual a diferença de energia entre as camadas eletrônicas, chamado de raio X característico [6]. A deflexão da trajetória de um elétron devido a interação com um campo coulombiano emite um fóton para conservação de momento linear. Este é chamado de raio X de freamento.
  - Nêutrons: Partículas subatômicas que compõem o núcleo dos átomo e auxiliam na estabilidade deste.

2.1. INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA

Existem vários fatores que influenciam na interação da radiação com a matéria, como o tipo de radiação, energia da partícula, carga da partícula e as características físicas do meio no qual incide. A radiação pode ser divida em relação ao tipo de transferência de energia para o meio sendo ela direta ou indireta. As partículas carregadas transferem energia diretamente por colisões com os elétrons do meio. Para partículas neutras o processo de transferência de energia é feito em duas etapas. A partícula interagem com os elétrons ou núcleos atômicos do meio e depois ocorre a transferência, ou seja, indiretamente.

2.1.1. INTERAÇÃO DE FÓTONS COM A MATÉRIA

Na mecânica clássica, quando um projétil é arremessado na direção de um alvo é possível calcular a probabilidade de acertar esse alvo a partir da seção de choque que é a área transversal do alvo.

Na mecânica quântica, esse conceito sofre uma pequena alteração. A seção de choque quântica ainda possibilita o cálculo da probabilidade, porém, a probabilidade a que se refere é de haver uma interação. Diferente da seção de choque geométrica, a seção de choque quântica não leva em consideração a área transversal do alvo, mas sim os estados do objeto antes e após a interação. A figura 2 apresenta os três principais efeitos da interação de fótons com a matéria, efeito fotoelétrico, efeito compton e produção de pares.

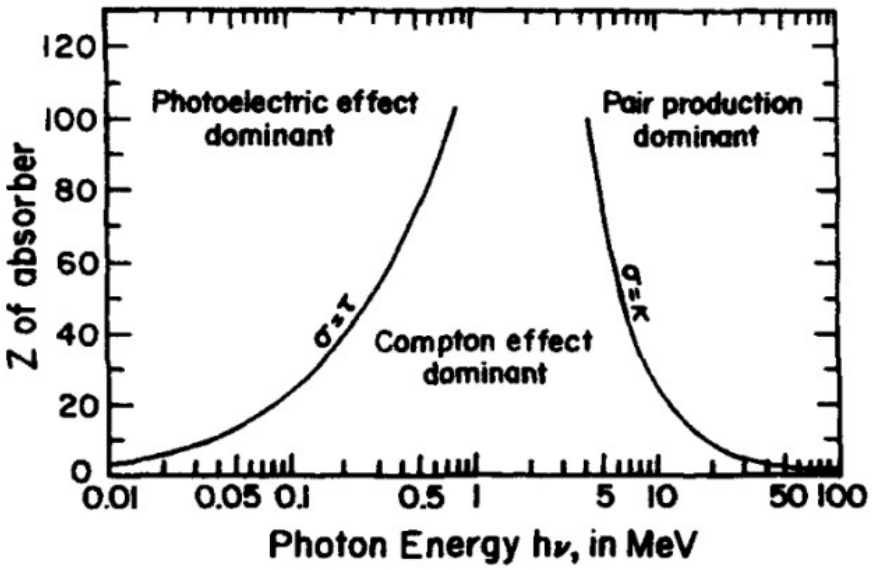

Figura 2 - Predominância dos efeitos de interação de fótons com a matéria.
Fonte: Figura extraída de Attix [6].

A figura acima mostra a predominância de um efeito sobre os outros que é dependente tanto da energia do fóton, quanto do número atômico do meio com o qual interage.

2.1.1.1. EFEITO FOTOELÉTRICO

O efeito fotoelétrico é a mais importante e predominante interação entre fótons de baixa energia e meios absorvedores de alto número atômico Z. Ela acontece com elétrons ligados, principalmente, nas camadas internas que estão mais próximas umas das outras. Aumentando, assim, a densidade eletrônica a medida que se aproxima do núcleo. Nessa interação, o fóton interage com o elétron, transferindo sua energia cinética *K* e deixando de existir [6], como mostra a figura 3.

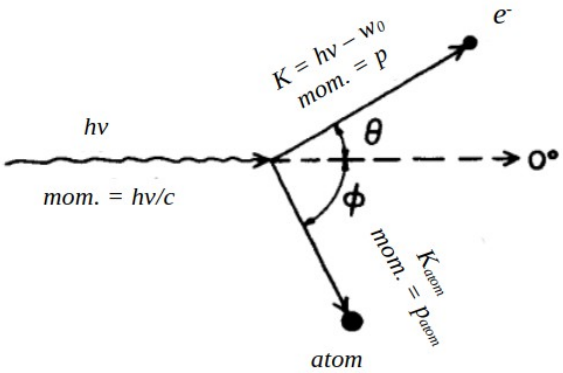

Figura 3 - Cinemática do efeito fotoelétrico. Fonte: Figura extratída e adaptada de Attix [6].

A energia cinética do fotoelétron ejetado é dada pela equação 1:

$$K = h\nu - w_0 \tag{1}$$

O termo *hν* corresponde a energia do fóton e w_0 é a energia potencial do elétron na camada eletrônica. Essa equação mostra que para ocorrer a ejeção do elétron da camada, o fóton incidente deve possuir energia $h\nu > w_0$.

2.1.1.2. EFEITO COMPTON

Existem algumas abordagens para descrever o efeito compton. Uma delas é através da cinemática [6].

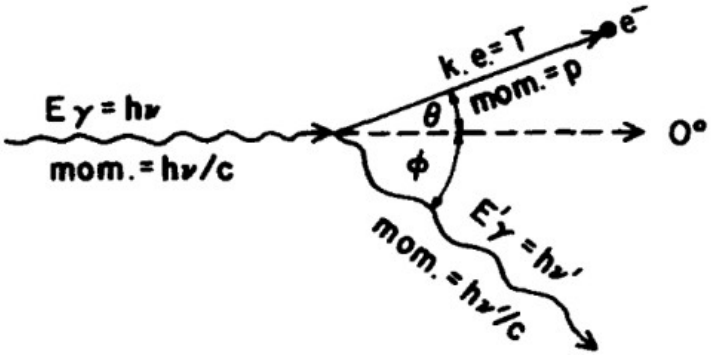

Figura 4 - Cinemática do efeito Compton. Fonte: Figura extraída de Attix [6].

O esquema da figura 4 mostra um fóton com momento linear *hv/c*, onde *c* é a velocidade da luz no vácuo, incidindo sobre um elétron estacionário sem momento linear. Na interação, o fóton é completamente absorvido pelo elétron. Após a interação, o elétron emite um fóton com energia *hv'* e momento *hv'/c* que faz um Φ com a direção do fóton incidente. Por conservação de momento, o elétron deixa de ser estacionário, adquire energia cinética T , momento linear p e parte na direção que faz um ângulo θ com a direção do fóton incidente. A energia cinética do elétron é dada pela equação 2:

$$T = h\nu - h\nu' \tag{2}$$

2.1.1.3. PRODUÇÃO DE PARES

A figura 5 esquematiza o processo de produção de pares. Nesse processo, a energia de um fóton é totalmente transformada na massa e energia de duas partículas massivas, um elétron e um pósitron, de energias cinéticas T- e T+, respectivamente e conservando a carga zero do fóton. Este processo somente ocorre na presença de um campo coulombiano, na maior parte das vezes na vizinhança de um núcleo atômico. Sua ocorrência também é possível na presença do campo coulombiano de um elétron atômico, sendo chamado neste caso de "produção de tripleto", uma vez que o próprio elétron inicial, que gerou o campo coulombiando, é ejetado junto com o par elétron-pósitron que foi formado.

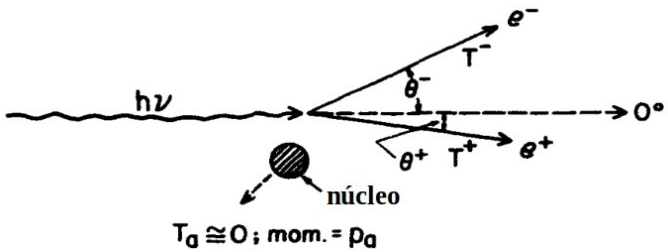

Figura 5 - Produção de par em um campo coulombiano nuclear. Fonte: Figura extraída e traduzida de Attix [6].

Assim, a energia do fóton é dada pela equação 3:

$$h\nu = 2m_0c^2 + T^- + T^+ \tag{3}$$

Assim, a energia do fóton deve ser no mínimo de 1,022 MeV que equivale as massas de repouso do par elétron – pósitron [6].

2.1.2. INTERAÇÃO DE PARTÍCULAS CARREGADAS COM A MATÉRIA

Diferente dos fótons, as partículas carregadas interagem o tempo todo com meio que atravessam, seja com o núcleo, elétrons orbitais ou o átomo como um todo. Essas interações ocorrem devido a ação do campo coulombiano das partículas influenciando em suas energias e trajetórias. Assim, as interações são classificados em termos do parâmetro de impacto *b* distância perpendicular entre a trajetória da partícula e o centro do átomo alvo e o raio atômico *a*, como mostra a figura 6.

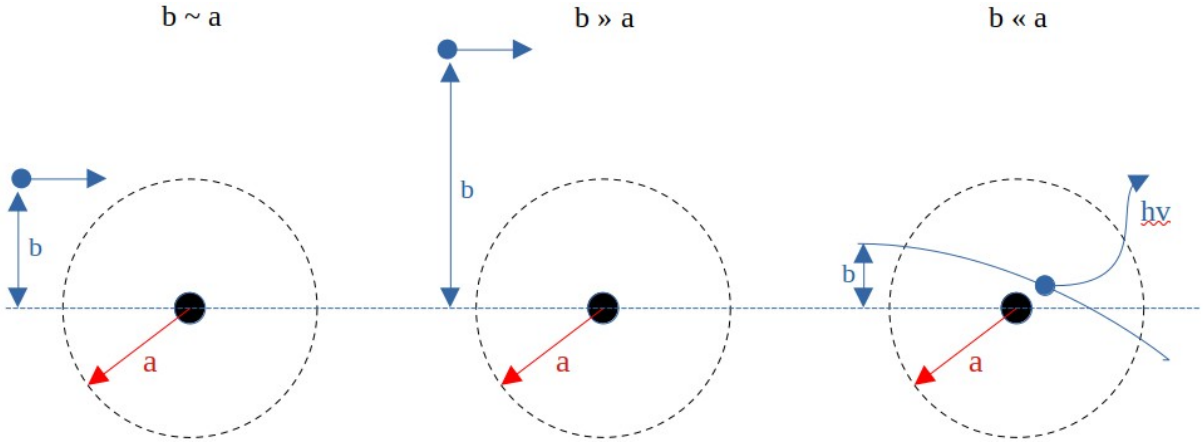

Figura 6 - Tipos de colisão de uma partícula carregada com um átomo em termos do parâmetro de impacto. Fonte: Figura adaptada de Podgorsak [7].

Os parâmetros a e b classificam as interações da seguinte forma:

- Colisão dura (*b ~ a)*: A partícula incidindo sobre o átomo interage com um elétron de camada mais interna ejetando-o com uma energia cinética considerável. Esse elétron ejetado é chamado de raio-δ. Nesse processo, a vacância produzida pode resultar na emissão de um raio- x característico ou em um elétron Auger.
- Colisão leve (*b » a)*: O campo coulombiano da partícula incidente afeta o campo do átomo como um todo, distorcendo-o e excitando ou ionizando-o pela ejeção dos elétrons das camadas mais externas, fracamente ligados.

- Produção de bremsstrahlung (*b* « *a)*: Nesta colisão, ocorre uma deflexão da trajetória da partícula e a emissão de um fóton chamado raio-x de freamento (bremsstrahlung) devido a sua interação com o campo nuclear. A energia do fóton emitido está diretamente relacionada com *b*.

2.1.2.1. STOPPING POWER

Durante todo o processo das interações por colisão, as partículas carregadas transferem energia para meio que atravessam em forma de radiação. Essa transferência de energia ocorre a medida que a partícula percorre um caminho num meio material. A taxa de transferência, ou perda, de energia da partícula para o meio por caminho percorrido é chamada de *Stopping Power* e depende tanto do tipo de partícula, quanto da energia da mesma, porém, depende principalmente do número atômico do meio absorvedor. Para não haver dependência de fatores como pressão e temperatura, é feita a razão entre Stopping Power e a densidade do meio absorvedor e, por isso, é chamado de *Stopping Power* Mássico.

O *Stopping Power* Mássico (*S*) é a soma das componentes de colisão (colisão dura e colisão leve - S_{col}) e de perdas radiativas (produção de *bremsstrahlung* – S_{rad}) [7]. Para a componente de colisão, o *Stopping Power* para as partículas carregadas leves (elétrons e pósitrons) pode ser expresso pela combinação das energias transferidas por colisões duras e leves, como mostra a equação 4:

$$S_{\mathrm{col}} = 2\pi r_e^2 \frac{Z}{A} N_A \frac{m_e c^2}{\beta^2} \left[\ln \frac{E_K}{I} + \ln(1+\tau/2) + F^{\pm}(\tau) - \delta \right] \qquad (4)$$

onde r_e é o raio eletrônico, Z é o número atômico do meio absorvedor, A é a massa atômica do meio, N_A é o número e de átomos no meio absorvedor, E_K é a energia cinética da partícula incidente, I é o potencial de ionização-excitação médio, $\beta = v/c$, onde v é a velocidade da partícula e c é a velocidade da luz, e $\tau = E_K/m_e c^2$. Na equação 4, a função $F^{-}\tau$ é dada para elétrons como mostra a equação 5 a seguir:

$$F^{-}(\tau) = (1-\beta^2)\left[1+\tau^2/8-(2\tau\,1)\ln(2)\right] \qquad (5)$$

A função $F^{+}\tau$ é dada para pósitrons como mostra a equação 6:

$$F^{+}(\tau)=2\ln(2)-(\beta^{2}/12)\left[23+14/(\tau+2)+10/(\tau+2)^{2}+4/(\tau+2)^{3}\right] \quad (6)$$

O S_{rad} fornece a taxa de produção de bremsstrahlung pela equação 7:

$$S_{rad}=N_{a}\sigma_{rad}E_{i}, \quad (7)$$

onde $N_a = N_A/A$ número de átomos por unidade de massa, σ_{rad} é a seção de choque para produção de *bremsstrahlung* para várias energias e E_i é a energia inicial total da partícula (energia cinética inicial mais sua massa de repouso).

2.1.3. INTERAÇÃO DE NÊUTRONS COM A MATÉRIA

Na interação de nêutrons com a matéria, a energia é depositada indiretamente, similarmente aos fótons. Porém, essas partículas interagem majoritariamente por colisões com o núcleo atômico, assim, a deposição de energia se dá pelos prótons e íons pesados gerados. Os nêutrons são classificados em termo da sua energia cinética como mostra a tabela 1 a seguir:

Tabela 1. Classificação dos nêutrons em termos da energia cinética.

Classificação	Energia Cinética
Nêutrons Frios	E « 0.025 eV
Nêutrons Térmicos	E < 0.5 eV ~
Nêutrons Epitérmicos	1 ev < E < 1 keV
Nêutrons Intermediários	1 keV < E < 50 keV
Nêutrons Rápidos	50 keV < E < 20 MeV
Nêutrons Relativísticos	E > 20 Mev

Fonte: Tabela traduzida de Andreo [30].

2.1.3.1. ESPALHAMENTO ELÁSTICO

Essa interação é predominante para nêutrons intermediários e de alta energia [30]. A cinemática desse processo de interação, pode ser explicada da seguinte forma: Considere um nêutron de massa m e velocidade inicial v_i colidindo com um núcleo de massa M. O núcleo recua com velocidade V fazendo um ângulo Φ com a direção inicial do nêutron. Tanto a energia cinética quanto a direção do nêutron são alteradas na interação. É válido ressaltar que nessa interação, não existe emissão de raios gama pelo núcleo, pois este não entra em estado de excitação. Tanto a energia quanto o momento linear do sistema, são conservados. A figura 7 ilustra este processo.

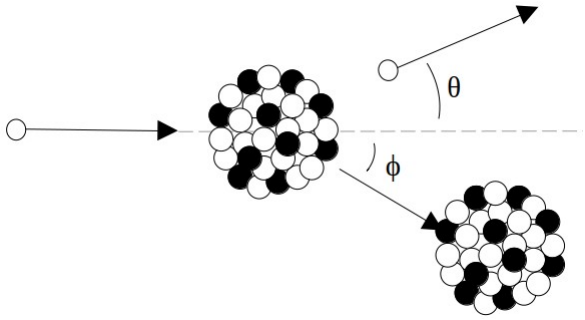

Figura 7 - Esquema ilustrativo do espalhamento eláastico de nêutrons. Fonte: O autor (2024).

2.1.3.2. ESPALHAMENTO INELÁSTICO

Quando nêutrons relativísticos incidem sobre um núcleo alvo, podem transferir energia suficiente para excitá-lo. Após a interação, o núcleo excitado tende a buscar o estado de menor energia, dessa forma, no processo de desexcitação nuclear, são emitidos um nêutron de menor energia e um fóton gama.

2.1.3.3. CAPTURA DE NÊUTRONS

Nesse processo, um nêutrons térmico incidente é capturado pelo núcleo que entra em estado excitado. Na desexcitação, ocorre a emissão de uma próton, chamada de reação (n,p) ou emissão de um raio gama.

2.1.3.4. SPALLATION (ESPALAÇÃO)

Esse é o processo pelo qual um projétil com alta energia (entre centenas de mega elétron-Volts e giga elétron-Volts - GeV), interage com um núcleo pesado resultando na emissão de fragmentos nucleares e hádrons. Essa interação ocorre em duas etapas:

1 Cascata intranuclear: o projetil transfere energia para os núcleons por colisões elásticas, levando a uma cascata de colisões entre os núcleons até que essa energia seja distribuída no núcleo como um todo.

2 Evaporação de nêutron e/ou fragmentos carregados: após alcançar um equilíbrio na distribuição de energia, o núcleo nesse estado excitado, libera energia pela emissão de nêutrons e fragmentos carregadas, como partículas alfa, dêuterons, etc.

2.1.3.5. FISSÃO INDUZIDA POR NÊUTRONS

Núcleos pesados de número atômico alto podem ser induzidos a se fissionar pela incidência de um nêutron. A fissão induzida por nêutron, (n,*f*), resulta em dois ou mais núcleos menores e liberação de grande quantidade de energia. Isso ocorre, pois a energia de ligação dos núcleos menores é maior que a energia de ligação do núcleo pesado.

2.2. GRANDEZAS

Na física das radiações, as grandezas são distinguidas nos seguintes grupos: grandezas radiométricas, grandezas dosimétricas, grandezas limitantes e grandezas operacionais. As grandezas de proteção e operacionais, foram criadas para o uso em proteção radiológica.

2.2.1. GRANDEZAS RADIOMÉTRICAS

As grandezas radiométricas são as que caracterizam o campo de radiação. Uma das mais importantes é a fluência.

- Fluência (Φ): é definida como a razão entre *dN* e *da*, onde *dN* é o número de partículas incidindo em uma esfera de área transversal *da*, equação 8:

$$\phi = \frac{dN}{dA} \tag{8}$$

A fluência é expressa em unidades de cm^{-2} ou m^{-2}.

2.2.2. GRANDEZAS DOSIMÉTRICAS

As grandezas dosimétricas relacionam a energia do campo de radiação e a energia transferida à matéria ou absorvida por esta onde a radiação se propaga. Algumas dessas grandezas são:

- Kerma (*K*): Essa grandeza só pode ser medida com campos de radiação indiretamente ionizantes fótons e nêutrons ou para qualquer fonte distribuída em um meio absorvedor. O Kerma é definido em relação a energia transferida para o volume *V*, ϵ_{tr}, dada pela equação 9:

$$\epsilon_{tr} = \left(R_{inn}\right)_u - \left(R_{out}\right)_u^{nonr} + \Sigma Q \tag{9}$$

onde: $(R_{in})_u$ é a energia radiante das partículas não carregadas que incidem em V, $(R_{out})_u^{nonr}$ é energia radiante de partículas não carregadas que saem de V, com exceção das produzidas por perdas radiativas bremsstrahlung ou aniquilação em voo e ΣQ é a energia líquida da conversão de massa em energia e vice-versa dentro de V. O Kerma no ponto P pode ser definido, então como o infinitésimo da energia transferida ao infinitésimo de massa, como mostra a equação 10.

$$K = \frac{d\epsilon_{tr}}{dm} \tag{10}$$

- Dose absorvida (*D*): A dose absorvida neste volume é definida pela razão entre o infinitésimo de energia depositada em *V* e sua massa infinitesimal, equação 11.

$$D = \frac{d\epsilon}{dm} \tag{11}$$

- Exposição (*X*): É mostrada pela equação 12 como o quociente entre *dQ* por *dm*, onde *dQ* é o valor absoluto da carga total de íons de um dado sinal, produzidos no ar, quando todos os elétrons (negativos e positivos) liberados pelos fótons no ar, em uma massa *dm*, são completamente freados no ar.

$$X = \frac{dQ}{dm} \tag{12}$$

2.2.3. GRANDEZAS LIMITANTES

As grandezas limitantes estão associadas ao risco biológico devido à radiação ionizante. São grandezas limitantes:

- A Dose equivalente (H_T): considera o tipo de radiação e sua energia para avaliar o risco biológico. É expressa matematicamente pela multiplicação da grandeza física dose absorvida em um tecido ou órgão *T* pela radiação *R*, $D_{T,R}$, e o fator de ponderação w_R, que depende da partícula incidente e energia, como mostra a equação 13.

$$H_T = w_R . D_{T,R} \tag{13}$$

A tabela 2 a seguir mostra os valores de w_R para diferentes tipos de radiação e energia e a equação 14 mostra os valores de w_R como uma função da energia.

Tabela 2. Fatores de peso da radiação

Tipo de Radiação e Energia	Fator de ponderação da Radiação, w_R
Fótons todas as energias	1
Elétrons e múons	1
Prótons e píons carregados	2
Partículas alfa, fragmentos de fissão e íons pesados	20
Nêutrons	Função contínua da energia do nêutron E_n (equação 14)

Fonte: Tabela traduzida e adaptada da publicação 103 da ICRP [31].

$$w_R = \begin{cases} 2{,}5 + 18{,}2\, e^{-[\ln(E_n)]^{2/6}}; & E_n < 1\, MeV \\ 5{,}0 + 17\, e^{-[\ln(2E_n)]^{2/6}}; & 1\, Mev \leq E_n < 50\, MeV \\ 2{,}5 + 3{,}25\, e^{-[\ln(0{,}04 E_n)]^{2/6}}; & E_n > 50\, MeV \end{cases} \tag{14}$$

- Dose Efetiva E: é o somatório das doses equivalentes de todos os órgão e tecidos do corpo ponderadas pelo fator w_T que considera a sensibilidade dos tecidos ou órgão, equação 15.

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T \tag{15}$$

A tabela 3 a seguir mostra os fatores de ponderação para todos os tecidos e órgão do corpo.

Tabela 3. Fatores de peso de tecido ou órgão.

Tecido ou órgão	Fator de ponderação de tecido
Medula óssea (vermelha), Cólon, Pulmão, Estômago, Mama, Outros tecidos*	0,12
Gonadas	0,08
Bexiga, Esôfago, Fígado, Tireóide	0,04
Superfície óssea, Cérebro, Glândulas salivares, Pele	0,01

* Outros tecidos: Adrenais, Região extratorácica (ET), Vesícula biliar, Coração, Rins, Nódulos Linfáticos, Mucosa oral, Pancreas, Próstata, Intestino delgado, Baço, Timus, Útero.
Fonte: Tabela traduzida da publicação 103 da ICRP [31].

A unidade de ambas as grandezas, Dose Efetiva e Dose Equivalente, é o Sievert simbolizado por *Sv*.

2.2.4. GRANDEZAS OPERACIONAIS

As grandezas limitantes não são mensuráveis na prática, por isso não são usadas para monitoração de radiação. Assim, foram criadas grandezas operacionais que relacionam e avaliam a dose efetiva e dose equivalente devido a exposição de indivíduos a campos de radiação. As grandezas criadas são o Equivalente de Dose Individual, $H_P(d)$, e o Equivalente de Dose Ambiente, $H^*(d)$, onde d é a profundidade de interesse para o caso de fontes de radiação externas ao corpo.

O $H^*(d)$ é utilizado para monitoração de áreas onde as pessoas não fazem uso de monitores individuais, como pilotos e comissários de aeronaves, por exemplo [26]. O cálculo dessa grandeza é feito sobre a esfera ICRU [31]. A Esfera ICRU possui 30 cm de diâmetro, é feita de material tecido-equivalente e densidade de 1 g/cm^3, como um simulador do tronco humano, considerando que ela engloba quase todos os órgãos sensíveis à radiação.

O Equivalente de Dose Individual, $H_p(d)$, é utilizada para realizar a monitoração da exposição do IOE às radiações ionizantes. Em teoria, essa grandeza deveria ser medida diretamente sobre o indivíduo, porém os monitores não podem ser calibrados diretamente

sobre o corpo humano devido ao risco dos efeitos nocivos da radiação além de variarem de acordo com o indivíduo. Assim, os monitores são calibrados sobre *phantons* para obtenção de valores de referência. Utiliza-se a profundidade de 10 mm no cálculo do $H_P(d)$ para estimar a dose efetiva em um indivíduo e, assim, analisar se está dentro dos padrões exigidos pela legislação.

No caso da monitoração individual, por causa da dificuldade de fabricação da esfera ICRU, são utilizados simuladores alternativos, como o S*lab Phantom da ISO*, por exemplo. O Slab Phantom, consiste de uma caixa de polimetilmetacrilato (PMMA) cujas dimensões são 30x30x15 cm^3 preenchido com água. As paredes laterais e posterior desse simulador têm 1 cm de espessura enquanto qua a face frontal tem espessura de 0,5 cm.

Ambas as grandezas, $H^*(d)$ e $H_P(d)$, são definidas pela multiplicação da dose absorvida em um ponto de interesse a profundidade d pelo fator de qualidade da radiação Q, análogo ao fator de ponderação da radiação w_R, como mostra a equação 16.

$$H = Q \cdot D \tag{16}$$

O fator de qualidade da radiação é uma função da transferência linear de energia denotado por L ou *LET* não restrita, que avalia a densidade de ionização ao longo da trajetória da partícula. O valor do LET depende do tipo de partícula e principalmente da sua energia. O fator de qualidade da radiação em função do valor de LET, $Q(L)$, é calculado pela equação 17 segundo a publicação 60 da ICRP [32].

$$Q(L) = \begin{cases} 1; & L \leq 10\, keV/\mu m \\ 0{,}32 \cdot L - 2{,}2; & 10 < L \leq 100\, keV/\mu m \\ 300/\sqrt{L}; & L > 100\, keV/\mu m \end{cases} \tag{17}$$

2.3. RADIOPROTEÇÃO

A radioproteção se dedica à proteção de indivíduos e do meio ambiente contra os efeitos nocivos das radiações ionizantes minimizando a exposição, garantindo a segurança dos IOEs e indivíduos do público por meio de três princípios: justificação, otimização e limitação

da dose. O princípio da justificação estabelece que em qualquer atividade que envolva radiação os benefícios devem superar os riscos da exposição. A otimização refere-se à adoção de medidas que garantam que a exposição à radiação seja mantida tão baixa quanto razoavelmente exequível, levando em consideração fatores técnicos e econômicos. Por fim, a limitação da dose estabelece limites máximos de exposição, tanto para trabalhadores quanto para o público em geral, visando proteger a saúde e prevenir doenças relacionadas à radiação.

2.3.1. MONITOR DE NÊUTRONS DE ALBEDO

Adaptado da astronomia, a técnica de albedo refere-se ao coeficiente de reflexão de partículas incidindo sobre um corpo. No caso da dosimetria de nêutrons, o monitor de albedo avalia as doses ocupacionais pelo fluxo dos nêutrons retroespalhados pelo corpo humano. Não existe um modelo oficial para a estrutura de monitor de albedo. Existem modelos capazes de medir as partículas incidentes e as refletidas de formas distintas, e modelos que não fazem distinção entre as partículas incidentes e as de albedo. O modelo utilizado neste trabalho é mostrado na figura 8.

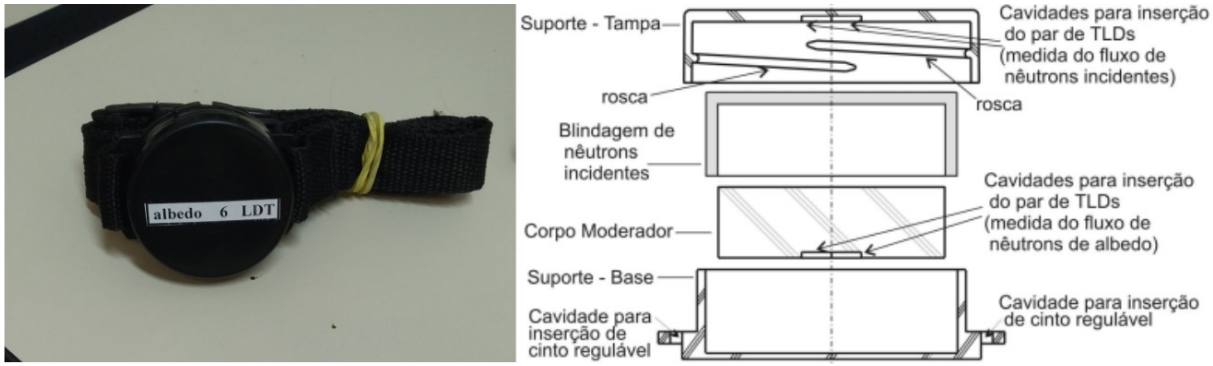

Figura 8 - A esquerda é mostrado o modelo do monitor de nêutrons de albedo do IRD e a direita a estrutura do monitor de albedo IRD. Fonte: extraído de Martins et.al. [10].

Existe um suporte plástico cilíndrico que comporta os demais componentes do monitor. Na tampa do suporte existem duas cavidades onde é inserido um par de cristais, TLD-600 e TLD-700. Entre a tampa e a base, existe uma blindagem frontal e lateral para os nêutrons incidentes, garantindo que o par TLDs da base meça somente os nêutrons refletidos no corpo do usuário. Abaixo da blindagem foi colocado um corpo moderador cuja a função é

levar os nêutrons de albedo que interagem com o monitor ao equilíbrio térmico, termalizá-los, aumentando a sensibilidade do par de albedo. No corpo moderador existe a janela de albedo, que é uma cavidade onde é inserido o segundo par de TLDs, o par de albedo.

Diferente dos TLDs comumente utilizados que são presos na roupa do IOE na altura do tórax, o monitor de albedo é posicionado na altura da cintura pelo uso de um cinto. Dessa forma, a distância entre a janela de albedo e o corpo do usuário se mantém constante diminuindo a incerteza da medida de dose de nêutrons de albedo.

2.3.2. DOSIMETRIA OCUPACIONAL EXTERNA

A monitoração dos IOEs é realizada por meio dos dosímetros termoluminescentes (TLDs). Esses TLDs podem ser posicionados no pulso ou nos dedos do IOE para estimativa da dose recebida nas extremidades, $H_P(0,07)$ quando este manipula fontes radioativas [36]. Os TLDs podem ser posicionados próximos aos olhos para estimar a dose no cristalino, $H_P(3)$ e no tronco do usuário para estimar o $H_P(10)$, que equivale a dose recebida no corpo inteiro [12].

2.4. DOSIMETRIA TERMOLUMINESCENTE

No Brasil, a norma CNEN-NN 3.01 estabelece os limites de doses ocupacionais que os IOEs podem receber em um período de tempo [11]. Para estimar essas doses e avaliar se estão dentro dos limites estabelecidos pela norma, é feita a monitoração individual desses trabalhadores e uma das técnicas mais utilizadas para realizar essa monitoração é termoluminescência.

2.4.1. TERMOLUMINESCÊNCIA

Alguns materiais cristalinos emitem luz quando previamente excitados pelo fenômeno da luminescência. Esses cristais podem ser excitados de diversas formas: pela absorção de luz (fotoluminescência), por forças mecânicas (triboluminescência) e por radiação ionizante (radioluminescência) são algumas delas.

A luminescência pode ocorrer de duas maneiras, pela fluorescência ou pela fosforescência. Na fluorescência, a emissão de luz ocorre em um tempo menor que 10^{-8} segundos após a excitação do cristal, ou seja, é praticamente de forma instantânea. Já na fosforescência, o cristal excitado decai a um estado metaestável e permanece nele por um tempo maior que 10^{-8} segundos. Assim, o cristal necessita receber uma quantidade de energia suficiente para retornar ao estado excitado e, em seguida, decair ao estado fundamental pela emissão de luz [33]. A figura 9 ilustra as duas maneiras da luminescência.

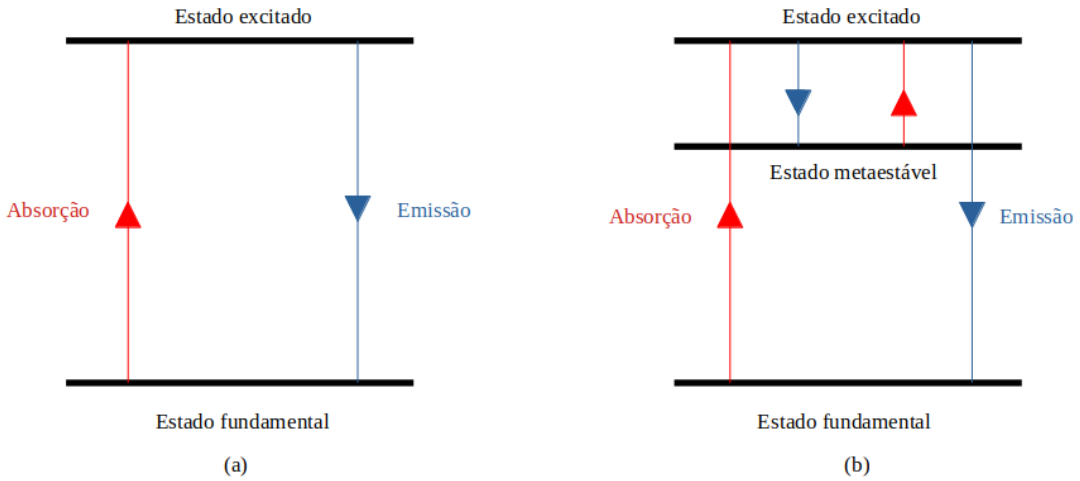

Figura 9 - Esquema dos níveis de energia nos processos de fluorescência e fosforescência. A figura 9 a mostra o processo da fluorescência e a figura 9 b mostra o processo da fosforescência. Fonte: Figura adaptada de Batista [33].

A termoluminescência é uma fosforescência termicamente estimulada, ou seja, o cristal excitado por radiação ionizante e está no estado metaestável, recebe energia em forma de calor para retornar ao estado excitado e, assim, decair ao estado fundamental pela emissão de luz.

A termoluminescência é melhor explicada pela teoria de bandas de energia, figura 10. Quando um material está no estado fundamental, os elétrons ocupam a banda de valência.

Quando o material é excitado, o local possível para os elétrons ocuparem é a banda de condução. Entre essas duas bandas, existem uma região que os elétrons não podem ocupar chamada de banda proibida. Entretanto, devido às imperfeições ou impurezas do material, existem centros de aprisionamento de portadores de carga na banda proibida, o esquema da figura mostra o processo da termoluminescência.

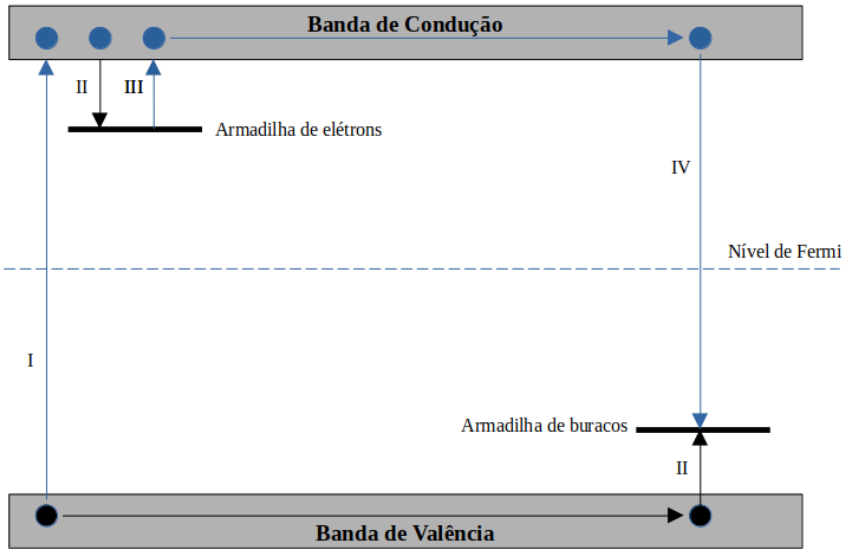

Figura 10 - Esquema da termoluminescência explicado pela teoria de bandas de energia. I Excitação do cristal e geração do par elétron-buraco; II aprisionamento dos portadores de carga; III elétron liberado devido ao aquecimento do cristal; IV recombinação do par elétron-buraco. Fonte: Figura adaptada de Batista .

Quando o cristal absorve a energia da radiação, um elétron da banda de valência transita para a banda de condução resultando em um buraco ou vacância na banda de valência. Essa vacância é capturada pela armadilha de buracos assim como o elétron é aprisionado pela armadilha de elétrons. Quando o cristal é levado ao tratamento térmico, a energia térmica faz com que o elétron saia da armadilha para a banda de condução e, em seguida, decaia para ocorre a recombinação do par elétron-buraco na armadilha de buracos. Nesse decaimento do elétron ocorre a emissão de um fóton de luz visível. A intensidade de luminosa emitida pelo cristal termoluminescente é diretamente proporcional a dose recebida por ele.

2.4.2. DOSIMETRIA POR TLD

Normalmente, para utilizar uma cristal termoluminescente na dosimetria, é feita uma dopagem do cristal com elementos químicos de forma a aumentar a quantidade de armadilhas e, por consequência, a intensidade luminosa emitida por este. Devido a proporcionalidade entre a intensidade luminosa e a dose de radiação recebida, os cristais termoluminescentes são comumente utilizados para estimar as doses em IOEs, desde que haja uma calibração que converta a intensidade luminosa para as grandezas operacionais.

2.4.3. APLICAÇÃO DO TLD-600 E TLD-700 NA DOSIMETRIA DE CAMPOS MISTOS DE NÊUTRONS E FÓTONS

Um dos TLDs mais utilizados para dosimetria de nêutrons é o Fluoreto de Lítio dopado com magnésio e titânio (LiF:Mg,Ti) [39]. O lítio apresenta em sua composição as respectivas proporções de 7,5% e 92,5% dos isótopos ^{6}Li e ^{7}Li [37]. Na dosimetria de nêutrons, o cristal LiF é enriquecido com os isótopos ^{6}Li e ^{7}Li e são denominados TLD-600 e TLD-700, respectivamente, e apresentam as mesmas dopagens de Mg e Ti. Apesar de possuírem propriedades similares, a reação do TLD-600 com nêutrons é mostrada na equação 18.

$$n + {}^{6}_{3}Li \rightarrow {}^{3}_{1}H + {}^{4}_{2}\alpha + 4{,}78\,MeV \qquad (18)$$

Essa reação é a principal responsável pela diferença entre as curvas TL dos TLD-600 e TLD-700.

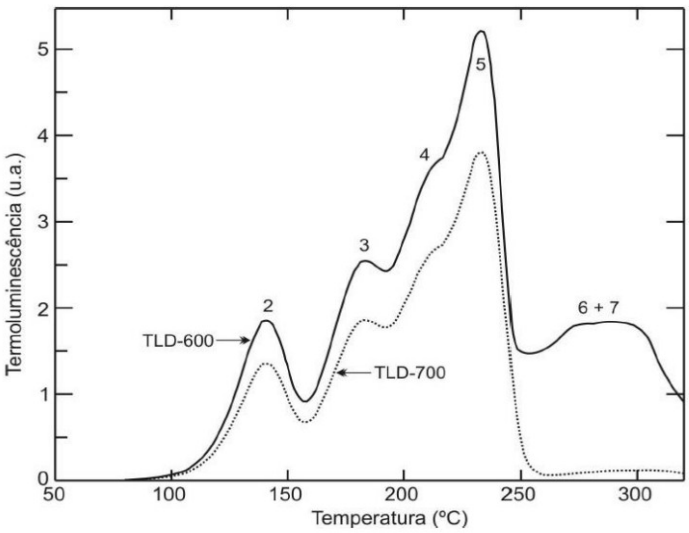

Figura 11 - Curvas TL dos TLD-600 e TLD-700 devido a irradiação com um campo misto de nêutrons e fótons. Fonte: figura extraída de [37].

Observando a figura 11 é possível notar que dos picos 2 a 5 a resposta do TLD-600 é maior que do TLD-700. Essa diferença é devido a contribuição dos nêutrons. Além disso, os picos 6 e 7 se devem a reação mostrada na equação 18 mostrando que o TLD-600 possui alta sensibilidade para fótons e nêutron, enquanto que o TLD-700 é sensível somente a fótons.

Esses TLDs possuem número atômico efetivo muito próximos (8,2 e 8,1) [40]. Assim, não existem diferenças significativas entre as repostas desses TLDs a campos de fótons, porém a resposta a nêutrons é determinada pela seção de choque que depende da energia do nêutron e da composição do TLD. Como o TLD-600 é enriquecido com ^{6}Li (com alta sensibilidade para fótons e nêutrons) e o TLD-700 é enriquecido com ^{7}Li (sensível somente a fótons), suas respostas a campos de nêutrons têm grandes diferenças. Assim, a diferença entre os sinais do TLD-600 e do TLD-700 resulta na resposta devido somente aos nêutrons.

3. SIMULAÇÕES PELO MÉTODO DE MONTE CARLO

O método de Monte Carlo (MC) é frequentemente utilizado em diversas áreas da ciência para solução de problemas estatísticos. O método de Monte Carlo utiliza geradores de números pseudoaleatórios, que são sequências numéricas produzidas de forma aparentemente aleatória mas que são, na verdade, produzidas por um algoritmo computacional, totalmente determinístico. Existe uma variedade muito grande destes algoritmos utilizadas em métodos computacionais. As sequências geradas por cada gerador são caracterizadas por um período, que é a quantidade de números gerados antes que o primeiro número se repita na sequência. Após este período, os números subsequentes passam a se repetir. A semente do gerador, ou "seed" determina em que momento da sequência o gerador de números aleatórios vai iniciar a geração.

Na física das radiações, o método é utilizado por diversos códigos, como MCNP, Penelope, EGS e Geant4, para calcular o transporte de energia da radiação por meio das interações singulares. Cada partícula primária gerada pelo código é acompanhada em todas as suas interações até sua aniquilação ou saída do volume de interesse é chamada de história. Essas interações são sorteadas pela função de densidade de probabilidade conhecida e disponível no código [15].

O Geant4 (Geometry and Tracking) é um software de código aberto desenvolvido pelo CERN que opera na linguagem de programação C++. O software compreende as necessidades dos experimentos modernos tendo aplicabilidade em diversas áreas como Física de Partículas, Engenharia Espacial, Física Nuclear e Física Médica [16].

É um kit de ferramentas que contem os componentes: gerador de eventos, simulador de detector, reconstrução e análise de dados que podem ser usados tanto separadamente, quanto combinados. Devido ao uso dos componentes, foi necessário definir uma interface entre um componente e outro e fornecer partes de um componente para serem usadas em outros [16].

A descrição das interações definidas no Geant4 são tratadas de forma aleatória pelas trajetórias da partículas (*tracks*) e passos (*steps*). Cada *track* é formada pelo conjunto de *steps* de uma partícula e armazena informações de momento, posição, carga e massa de cada partícula. Os *steps* armazenam informações transiente, ou seja, que se alteram no decorrer da

trajetória, como o ponto antes de um passo (*PreStepPoint*) e o ponto após o passo (*PostStepPoint*). Os *steps* armazenam as mudanças na trajetória entre os dois pontos, *PreStepPoint* e *PostStepPoint*, que ocorrem conforme a partícula interagem com o meio. A figura 12 mostra a interface do Geant4.

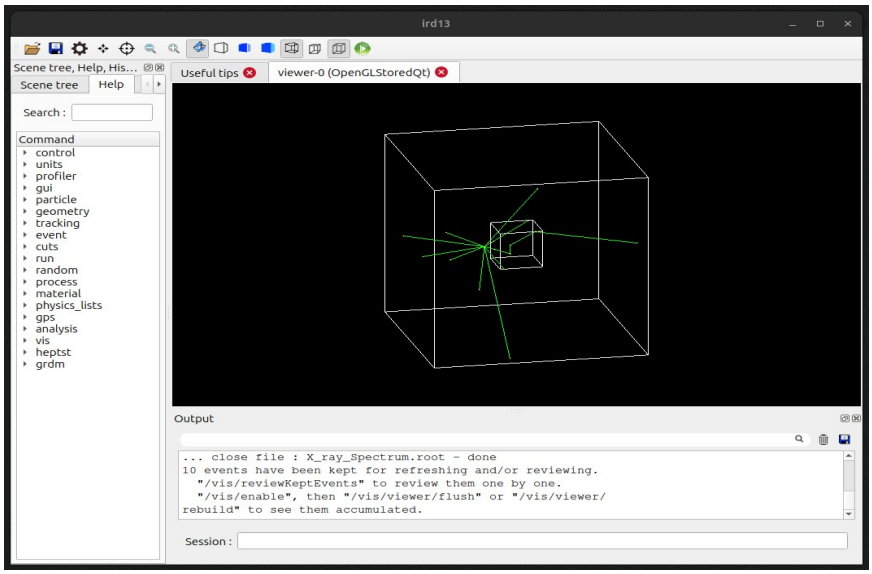

Figura 12 - Interface gráfica para o usuário do Geant4 e visualização de simulação. Fonte: O autor (2025).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho é composto pelas partes computacional, que envolve simulações pelo método de Monte Carlo, e experimental, que utilizou o monitor físico e fontes de radionuclídeos. Para realizar as simulações, o Geant4 versão 10.7.2 foi instalada em um notebook de processador Intel CORE i3 que possui quatro núcleos de processamento. A parte experimental, foi realizada no Laboratório de Irradiações do IRD (LABIR) e dispôs de 25 monitores de nêutrons de albedo, 1 Slab Phantom, uma fonte de ^{241}Am e uma fonte de ^{137}Cs e uma leitora de TLDs da marca Thermo Scientific™ HARSHAW TLD Modelo 5500. Todos os dados foram analisados pelo software de análise estatística QtiPlot e a montagem dos gráficos foi feita através do LibreOffice Calc e pela plataforma Google Colaboratory que permite o desenvolvimento de códigos na linguagem de programação Python.

4.1. SIMULAÇÕES DE MONTE CARLO

Como o objetivo principal deste trabalho é verificar a reposta a campos de fótons do monitor de albedo e calibrá-lo para esses campos através do método de Monte Carlo, foi necessário o desenvolvimento de dois códigos: um para analisar a resposta dos TLDs 600 e 700 separadamente, fora da estrutura do monitor, e o outro para irradiar o monitor com campos de fótons em condições padrão para calibrá-lo para a grandeza $H_P(10)$.

Foi necessária a criação de um ambiente para ocorrerem as interações e obtenção das grandezas de interesse. Esse ambiente, chamado de *mundo*, foi criado através da classe *G4Box* e sua geometria consiste de um cubo de dimensões 3 x 3 x 3 m³. Com a classe *G4LogicalVolume*, seu volume interno foi preenchido com ar seco composto por N_2 (78%), O_2(21%), Ar (0,93%) e CO_2 (0,04%). Para finalizar a criação do mundo, a classe *G4VPhysicalVolume* foi utilizada para definir o volume físico do mundo.

4.1.1. AVALIAÇÃO DA RESPOSTA DO TLD 600 E TLD 700 A CAMPOS DE FÓTONS

A avaliação da resposta dos TLD-600 e TLD-700 aos campos de fótons de referência da norma ISO 4037-1, foi baseada na metodologia de Cardoso *et al.* para obtenção da resposta do TLD-100 a campos de fótons através da razão entre a dose no TLD (D_{TLD}) e o Kerma no ar (*Ka*) para cada energia *E* simulada [23]. Essas respostas foram normalizadas a reposta obtida para energia do ^{137}Cs, como mostra a equação 19.

$$r_{Cs}(E)=\frac{(D_{TLD}/K_a)_E}{(D_{TLD}/K_a)_{Cs}},\quad \delta_r=\sqrt{\left(\frac{\delta_{(D_{TLD}/Ka)_E}}{(D_{TLD}/Ka)_{Cs}}\right)^2+\left(\frac{-(D_{TLD}/Ka)_E\cdot\delta_{(D_{TLD}/Ka)_{Cs}}}{(D_{TLD}/Ka)_{Cs}^2}\right)^2} \qquad (19)$$

Adaptando a metodologia de Cardoso et al. para este trabalho, foi inserido no mundo uma matriz 3x3 de caixas livres no ar chamadas de *cristais*. A matriz está posicionada a 2 metros da fonte. Os cristais estão distantes de 1,12 cm entre si e têm dimensões de 0,32 x 0,32 x 0,09 cm³ (as mesmas dimensões dos TLDs do monitor de albedo). O feixe consiste de uma fonte plana e monoenergética de dimensões 31 x 31 cm² e emite $2{,}5\cdot10^8$ fótons.

As energias utilizadas na simulação foram as energias médias das séries feixe estreito (Narrow Beam) N30 a N300 e as qualidades S-Cs e S-Co para simular as irradiações com os radionuclídeos ^{137}Cs e ^{60}Co [13]. Para as qualidades S-Cs e S-Co, a norma ISO 4037-3 recomenda a inserção de um placa feita de Polimetil metacrilato PMMA de 3 mm de espessura entre o feixe e o detector [28]. Para este trabalho, foi simulado um suporte de PMMA que possui cavidades preenchidas com ar para alocar os cristais. O suporte possui dimensões de 3 x 3 x 0,78 cm³. Como os cristais foram inseridas no centro do suporte, essa espessura garante que exista 3 mm de PMMA entre o feixe e os detectores. A figura 13 mostra o esquema da geometria utilizada para avaliar a resposta dos TLDs.

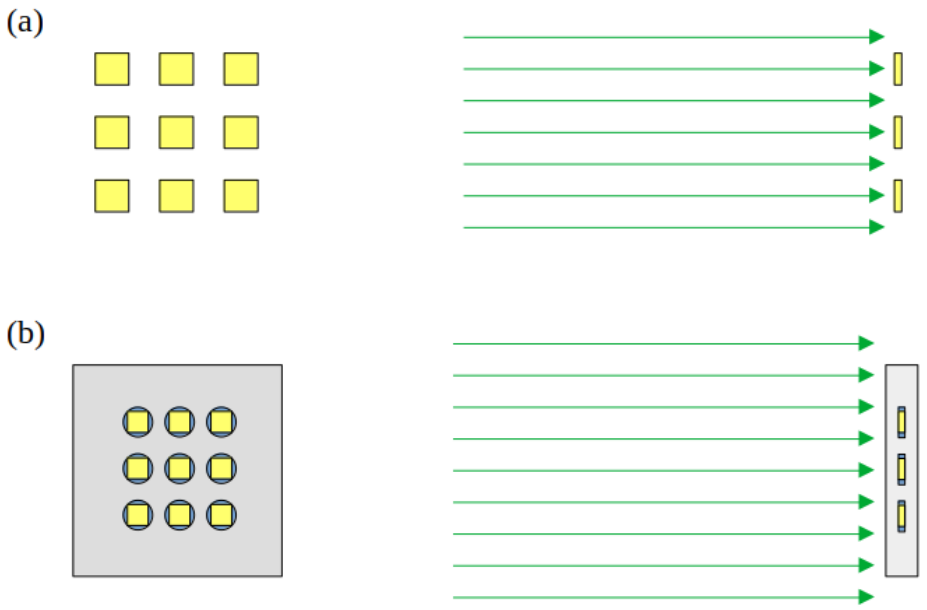

Figura 13 - Esquema da geometria utilizada para estudar a resposta dos TLDs 600 e 700. A figura 13a ilustra a geometria para obter a resposta para as energias abaixo de 662 keV. A Figura 13b ilustra a matriz dentro do suporte de PMMA para obter a resposta para energias do ^{137}Cs e ^{60}Co. Fonte: O autor (2024).

A Dose no TLD (D_{TLD}) foi calculada pela equação 20 considerando a soma da energia depositada no volume do cristal por cada partícula e dividida pela massa desse cristal conforme sua definição na equação 18.

$$D_{TLD} = \frac{\Sigma E_i \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}}{m} \tag{20}$$

onde E_i é a energia depositada em cada interação, em eV, m é a massa do cristal, em kg e 1.610^{-19} é o fator de conversão para energia de elétron-Volt para Joule.

As simulações com o ^{6}LiF e ^{7}LiF foram realizadas separadamente, definindo o volume interno dos cristais da matriz como ^{6}LiF e ^{7}LiF, respectivamente e calculando a dose absorvida em cada elemento da matriz. Assim, primeiro, fez-se a simulação com a matriz de cristais ^{6}LiF para cada energia de referência e, em seguida, o volume interno dos cristais foi alterado para ^{7}LiF e esse procedimento foi repetido. A composição dos cristais simulados foi obtida da descrição do monitor de albedo já implementada no Geant4. A composição dos cristais simulados é: ^{6}LiF (22,9% de ^{6}Li, 1,2% de ^{7}Li e 75,9% de ^{9}F); ^{7}LiF (0,0016% de ^{6}Li, 27% de ^{7}Li e 73% de ^{9}F) [40].

O volume interno dos cristais foi alterado por ar para obtenção da grandeza Kerma no Ar. Para calcular o Kerma na simulação computacional, foi necessário utilizar a fluência dos fótons através do volume do TLD e o coeficiente mássico de transferência de energia. A fluência foi calculada utilizando sua definição alternativa [6] como mostra a seguinte equação 21:

$$\Phi_{E_i} = \Sigma \frac{t_i}{V} \tag{21}$$

onde t_i é o caminho percorrido pelo i-ésimo fóton no volume V do TLD. Esta fluência foi substituída na equação 22 para obtenção do Kerma:

$$K = \Sigma E_i \cdot \Phi_{E_i} \cdot \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho}\right)_{E_i} \tag{22}$$

onde E_i é a energia de cada fóton que chega ao detector, e μ_{tr}/ρ_{Ei} é o coeficiente mássico de transferência de energia para cada fóton. Apesar de ser um feixe monoenergético, os fótons podem sofrer espalhamento nos meios que existem na simulação, a camada de ar entre a fonte e o suporte, o próprio suporte e as cavidades que comportam os cristais. Assim, os coeficientes mássicos de transferência de energia do ar para as energias de 10 a 1500 keV foram inseridos no código [6]. Para utilizar o μ_{tr}/ρ_{Ei} na equação 22, foi feita a interpolação para os fótons que chegam cujo coeficiente está entre dois valores conhecidos, como mostra a equação 23 a seguir.

$$\left(\frac{\mu_{tr}}{\rho}\right)_{E_i} = \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho}\right)_{E_{i-1}} - \frac{\left(E_i - E_{i-1}\right) \cdot \left[\left(\frac{\mu_{tr}}{\rho}\right)_{E_{i-1}} - \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho}\right)_{E_{i+1}}\right]}{E_{i+1} - E_{i-1}} \tag{23}$$

Para cada energia de feixe, os valores de Dose absorvida e Kerma no ar foram calculados através da média aritmética entre os elementos da matriz e a incerteza associada a essas medidas foi definida como o desvio padrão.

O gráfico das respostas relativas em função da energia foi obtido por meio da equação 19 para verificar o comportamento dos cristais TLD-600 e TLD-700, a fim de auxiliar na compreensão do funcionamento dos cristais dentro da estrutura do monitor quando portado por um usuário.

Com a finalidade de verificar se as respostas do ^{6}LiF e ^{7}LiF tem diferença estatisticamente significante, foi realizado o teste Z de compatibilidade, equação 24.

$$Z = \frac{\left| r_{Cs}(E)_{6\,LiF} - r_{Cs}(E)_{7\,LiF} \right|}{\sqrt{\sigma^2_{r_{6\,LiF}} + \sigma^2_{r_{7\,LiF}}}} \leq 3 \qquad (24)$$

As resposta relativas entre os TLDs são consideradas similares, ou seja, não possuem diferença estatisticamente significante, se Z for menor ou igual a três vezes a incerteza combinada dos valores comparados.

4.1.2. CALIBRAÇÃO DO MONITOR DE ALBEDO COM OS CAMPOS DE REFERÊNCIA

A irradiação do monitor de albedo com os campos de referência em condições de calibração, se deu pelo uso de uma descrição do monitor já implementada no Geant4. O monitor simulado foi posicionado sobre a face frontal do *Slab Phantom*, que foi inserido no código, e irradiado pela mesma fonte simulada na para obtenção da resposta dos TLD-600 e TLD-700 livres no ar. Neste trabalho, os espectros de energia recomendados pela norma ISO 4037-1 não foram simulados devido à capacidade limitada de processamento do equipamento utilizado, pois resultaria em um tempo de simulação muito maior que com as fontes monoenergéticas.

A tabela 4 e a figura 14 mostram, respectivamente, as qualidade dos campos e valores de energia de feixe utilizados para irradiar o monitor e a ilustração da geometria utilizada na simulação computacional para realizar a irradiação.

Tabela 4. Campos de referência usados para a irradiação do monitor de albedo sobre o Slab Phantom.

Qualidade da radiação	Energia média [keV]
N-40	33,3
N-60	47,9
S-Am	59,5
N-80	65,2
N-100	83,3
N-150	118
N-200	165
N-250	207
N-300	248
S-Cs	662
S-Co	1253

Fonte: O autor 2024.

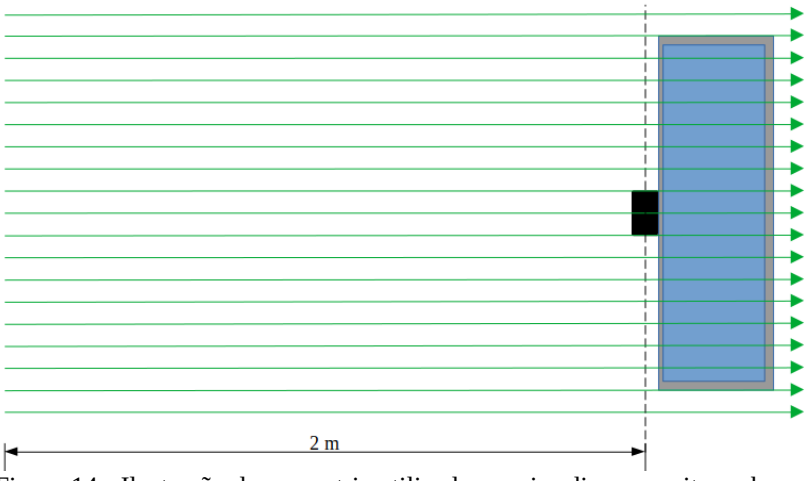

Figura 14 - Ilustração da geometria utilizada para irradiar o monitor sobre o slab phantom com os campos de referência da norma ISO 4037-1 . Fonte: O autor (2024).

Como o monitor possui dois pares de cristais TLDs, sendo um par incidente e um par de albedo, foi necessário garantir que o centro geométrico do monitor estivesse a 2 metros de distância da fonte.

Assim, para cada energia de feixe, foram realizadas 5 simulações com diferentes *seeds* em cada uma delas a dose depositada nos cristais foi calculada pela equação 20. Cada simulação retornou o valor de dose absorvida nos cristais do monitor. O valor médio de dose em cada cristal e a incerteza associada, foram calculados pela média aritmética das doses em cada simulação e desvio padrão dessas doses, respectivamente, como mostra equação 25.

$$\overline{D}=\sum_{i=1}^{5}\frac{D_i}{5},\quad \sigma=\sqrt{\sum_{i=1}^{5}\frac{\left(D_i-\overline{D}\right)^2}{5}} \tag{25}$$

Uma vez calculada a dose média e desvio padrão de cada cristal para as várias energias, tabela 10, também foi necessário comparar as doses entre os cristais de cada componente através do teste Z de compatibilidade, equação 24, para verificar se as doses são similares.

O $H_P(10)$ foi obtido pelo produto do Kerma no ar, obtidos para a avaliação da resposta dos cristais livres no ar, pelo coeficiente de conversão h_{pK}, que expressa a quantidade de $H_P(10)$ por unidade de Kerma no ar, equação 26. Os valores do coeficiente de conversão para cada qualidade de radiação são apresentados na tabela 5.

$$H_P(10)=h_{pK}\cdot K_a \tag{26}$$

Tabela 5. Coeficiente de conversão de Kerma no ar para $H_p(10)$ para cada campo de referência.

Qualidade da Radiação	Coeficiente de conversão h_{pK} [Sv/Gy]
N-30	0,82
N-40	1,21
N-60	1,66
S-Am	1,89
N-80	1,89
N-100	1,88
N-150	1,72
N-200	1,56
N-250	1,48
N-300	1,42
S-Cs	1,21
S-Co	1,15

Fonte: Extraído da norma ISO 4037-3 [28].

Finalmente, o fator de calibração F_C do monitor foi obtido através da razão entre a grandeza de interesse, $H_P(10)$, e a dose de cada cristal do monitor para cada qualidade de radiação Q, como mostra a equação 27 a seguir.

$$F_C(Q)=\left(\frac{H_P(10)}{D_{TLD}}\right)_Q, \quad \delta_{Fc}=\sqrt{\left(\frac{\delta_{H_p(10)}}{D_{TLD}}\right)^2+\left(\frac{-H_P(10)}{(D_{TLD})^2}\right)^2} \tag{27}$$

4.2. EXPERIMENTO

No LABIR, os monitores foram irradiados nas configurações Livre o ar e Sobre o S*lab Phantom* para verificar a influência do retroespalhamento causado pelo simulador de tronco. Para isso, os 25 monitores e as duas fontes radioativas foram distribuídos e utilizados como mostra a tabela 6 a seguir.

Tabela 6. Distribuição dos 25 monitores e das duas fontes radioativas utilizados no LABIR.

Quantidade de Monitores	Destino
5	Controle (*Back Ground - BG*)
5	Exposição ao ^{241}Am Livre no Ar
5	Exposição ao ^{241}Am sobre o *Slab Phantom*
5	Exposição ao ^{137}Cs livre no Ar
5	Exposição ao ^{137}Cs sobre o *Slab Phantom*

Fonte: O autor (2024).

Na avaliação do valor de *BG* não existe discriminação entre par incidente e par de albedo, por não haver um feixe incidente. Assim, o *BG* foi calculado através da média aritmética dos cristais ^{6}LiF e ^{7}LiF e a incerteza associada foi definida como desvio padrão.

Para irradiar os monitores livres no ar, foi utilizado um suporte plástico cuja influência da espessura na medida da dose pôde ser desprezada. Os monitores foram fixados no suporte e no *slab phantom* com fita adesiva. A figura 15 a seguir esquematiza a montagem experimental dos monitores sobre o suporte plástico e sobre o *slab phantom* para irradiação com as fontes de radionuclídeos.

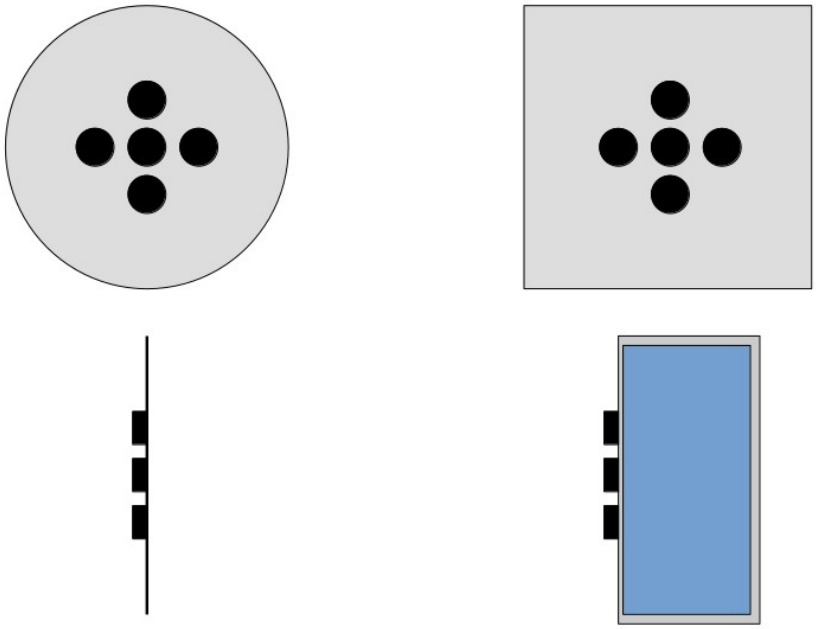

Figura 15 - Disposição dos monitores para irradiação com as fontes de Am-241 e Cs-137. A esquerda a montagem utilizada para irradiar os monitores livres no ar e a direita a montagem dos monitores sobre o slab phantom. Fonte: O autor (2024).

A fonte de ^{241}Am utilizada no LABIR possui baixa atividade, da ordem de $3{,}52 \cdot 10^{9}$ Bq. Por essa razão, os monitores foram expostos à essa fonte por 120 horas nas duas configurações (livre no ar e sobre o *slab phantom*) e na distância de 75 cm da fonte.

A exposição dos monitores à fonte de ^{137}Cs a 1 metro da fonte durante 4,11 minutos. A norma ISO 4037-3 recomenda que para feixes de energia igual ou superior a dos fótons emitidos pelo ^{137}Cs (662 keV), seja colocada uma placa para build-up de 3 mm de PMMA entre a fonte e o monitor. No LABIR não foi utilizada essa placa para verificar se a própria estrutura do monitor seria suficiente para fornecer a condição de equilíbrio de partículas carregadas.

Os monitores foram irradiados com um valor de Kerma no ar de 1,82 mGy para as fontes de ^{241}Am e ^{137}Cs, respectivamente. O tempo de irradiação foi calculado a partir da taxa de Kerma no Ar de cada fonte para as distância já citadas, como mostra a equação 28 a seguir.

$$\int_{0}^{K_0} dK = \int_{0}^{t_0} \lambda \cdot dt \qquad (28)$$

Onde λ é a taxa de Kerma no Ar. Para a fonte de ^{241}Am é de $1{,}57 \cdot 10^{-2}$ mGy/h e para a fonte de ^{137}Cs é de $2{,}70 \cdot 10$ mGy/h.

Após as irradiações, os cristais dos monitores foram levados a leitora para serem tratados termicamente. e obter os valores das leituras das fotomultiplicadoras em nC. Estes valores são associados às doses absorvidas nos cristais, presumindo-se uma linearidade entre as duas grandezas.

O cálculo do $H_p(10)$ foi pelo mesmo processo representado pela equação 26, multiplicando o Kerma irradiado pelo coeficiente de conversão correspondente a cada fonte. Para cada configuração de exposição (livre no ar e sobre o slab phantom), a dose líquida do monitor foi dada calculando a média e desvio padrão entre os ^{6}LiF incidentes dos cinco monitores e subtraindo o valor de BG. Este processo foi repetido para os demais cristais.

Assim, para calcular o fator de calibração do monitor para energias do ^{241}Am e ^{137}Cs, foi feita a razão entre a grandeza de interesse, $H_p(10)$, e o valor medido nos cristais, equação 29.

$$F_C = \frac{H_P(10)}{L - BG}, \quad \delta_{Fc} = \sqrt{\left(\frac{\delta_{H_P(10)}}{L - BG}\right)^2 + \left(\frac{-H_P(10) \cdot \delta_L}{(L^2)^2}\right)^2 + \left(\frac{-H_P(10) \cdot \delta_{BG}}{(L^2)^2}\right)^2} \qquad (29)$$

4.3. COMPARAÇÃO ENTRE AS SIMULAÇÕES E O EXPERIMENTO

Para comparar os resultados obtidos no LABIR com os obtidos nas simulações, foi verificada a influência do retroespalhamentos causado pelo *slab phantom* tanto no laboratório, quanto nas simulações. Para isso, foi necessário alterar alguns parâmetros no código para obtenção da resposta do monitor aos campos de fótons, como distância da fonte e um número maior de fótons emitidos, $5 \cdot 10^{8}$ fótons. No LABIR, as fontes de ^{241}Am e ^{137}Cs estão armazenadas dentro de cápsulas blindadas.

Assim, foram realizadas simulações que reproduzem de forma aproximada as condições do LABIR, distância de 75 cm e 100 cm para as fontes de ^{241}Am e ^{137}Cs, respectivamente, e as configurações do monitor livre no ar e sobre o *slab phantom*.

A comparação entre o comportamento dos cristais no laboratório e nas simulações foi feita normalizando as doses à dose do cristal ^{6}LiF do par incidente. Em seguida, foi analisado se as proporções entre as doses normalizadas são estatisticamente similares pelo teste Z de compatibilidade da equação 24.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das simulações e dos experimentos no LABIR são apresentados de forma separada nas seções 5.1 e 5.2, respectivamente.

5.1. SIMULAÇÕES

A seguir, serão exibidos os resultados das simulações realizadas. Os dados obtidos foram analisados estatisticamente pelo software QtiPlot e com Google Colaboratory utilizando a linguagem de programação Python.

5.1.1. RESPOSTA DO TLD-600 E TLD-700 AOS CAMPOS DE FÓTONS

A resposta dos TLDs foi verificada através da equação 19 para cada energia de feixe. A tabela 7 mostra as doses obtidas no ^{6}LiF e ^{7}LiF.

Tabela 7. Média das doses nos ^{6}LiF e ^{7}LiF obtidas a partir da matriz de TLD e Kerma no Ar (Ka) para cada qualidade de radiação. Teste de compatibilidade entre as doses nos ^{6}LiF e ^{7}LiF. Valores simulados para $2{,}5 \cdot 10^{8}$ histórias.

Energia [keV]	Dose ^{6}LiF [μGy]	Dose ^{7}LiF [μGy]	Ka [μGy]	Teste Z
24,6	0,627 ± 0,003	0,603 ± 0,002	0,628 ± 0,001	6,903
33,3	0,355 ± 0,003	0,341 ± 0,003	0,314 ± 0,006	3,480
47,9	0,196 ± 0,002	0,188 ± 0,002	0,1755 ± 0,0002	2,650
65,2	0,153 + 0,002	0,147 ± 0,002	0,1509 ± 0,0002	2,329
83,3	0,160 ± 0,002	0,154 ± 0,002	0,1617 ± 0,0002	2,294
118	0,219 ± 0,003	0,211 ± 0,003	0,2286 ± 0,0003	2,158
165	0,327 ± 0,03	0,315 ± 0,004	0,3416 ± 0,0003	2,540
207	0,432 ± 0,004	0,416 ± 0,004	0,4529 ± 0,0006	2,933
248	0,537 + 0,007	0,517 ± 0,007	0,5593 ± 0,008	2,060
662	1,54 ± 0,03	1,48 ± 0,02	1,603 ± 0,004	1,644
1253	2,65 ± 0,03	2,57 ± 0,04	2,771 ± 0,004	1,714

Fonte: O autor (2024).

Analisando a tabela 7, observa-se que as doses entre os cristais ^{6}LiF e ^{7}LiF são estatisticamente diferentes para as qualidades N30 e N40. Apesar de a tabela mostrar que para as demais energias as doses entre os cristais ^{6}LiF e ^{7}LiF são compatíveis. O ^{6}LiF apresenta valores de dose maiores que o ^{7}LiF. O esperado era que os cristais não apresentassem essa diferença entre os valores.

Ao calcular o número atômico efetivo (Z_{eff}) dos ^{6}LiF e ^{7}LiF simulados, foram obtidos os valores de 7,55 e 7,38, respectivamente. Esses resultados apresentam uma diferença ligeiramente maior que na literatura. Acredita-se que essa ligeira diferença entre os Z_{eff} dos cristais simulados tenha influenciado na dose absorvida no ^{6}LiF estar ligeiramente maior que a dose absorvida no ^{7}LiF.

Através da equação 19 foi verificada a reposta dos cristais ^{6}LiF e ^{7}LiF relativa a resposta da irradiação com o feixe de ^{137}Cs e sua incerteza associada.

A tabela 8 mostra as respostas relativas a irradiação com o feixe simulado de ^{137}Cs dos ^{6}LiF e ^{7}LiF em função da energia. As repostas dos ^{6}LiF e ^{7}LiF foram comparadas com as por Cardoso et al. para o LiF pelo teste Z de compatibilidade.

Tabela 8. Resposta relativa ao Cs-137 dos cristais ^{6}LiF e ^{7}LiF para cada qualidade de radiação conforme a equação 19 e a comparação entre estes cristais e o LiF através do teste Z, com intervalo de confiança de 3σ. A comparação entre a resposta do ^{6}LiF e LiF é representada por Z(^{6}LiF e LiF) e a comparação entre o ^{7}LiF e LiF é representada por Z(^{7}LiF e LiF).

Energia [keV]	r_{Cs}(E) ^{6}LiF	r_{Cs}(E) ^{7}LiF	r_{Cs}(E) LiF	Z (^{6}LiF e LiF)	Z (^{7}LiF e LiF)
24,6	1,04 ± 0,02	1,04 ± 0,01	1,25 ± 0,06	3,32	3,32
33,3	1,18 ± 0,03	1,18 ± 0,02	1,28 ± 0,02	3,54	3,54
47,9	1,17 ± 0,03	1,16 ± 0,02	1,23 ± 0,03	1,66	1,94
65,2	1,05 ± 0,02	1,07 ± 0,02	1,14 ± 0,02	3,18	2,47
83,3	1,03 ± 0,02	1,03 ± 0,02	1,08 ± 0,02	1,77	1,77
118	1,00 ± 0,02	1,00 ± 0,02	1,03 ± 0,02	1,06	1,06
165	1,00 ± 0,02	1,00 ± 0,02	1,01 ± 0,02	0,35	0,35
207	0,99 ± 0,02	1,00 ± 0,01	1,01 ± 0,02	0,71	0,35
248	1,00 ± 0,02	1,01 ± 0,02	1,00 ± 0,02	0,00	0,35
662	1,00 ± 0,03	1,00 ± 0,02	1,00 ± 0,00	0,00	0,00
1253	1,00 ± 0,02	1,01 ± 0,02	1,00 ± 0,02	0,00	0,35

Fonte: O autor (2024).

A fonte de ^{137}Cs possui um pico de emissão bem definido e, por esse motivo, os dados foram normalizados à resposta dessa energia. Através da normalização, é possível verificar que não há diferença estatística significante os ^{6}LiF e ^{7}LiF. Além disso, nota-se a sensibilidade aproximadamente 18% maior para energias na faixa de 30 - 50 keV.

Entretanto, ao analisar as respostas dos ^{6}LiF e ^{7}LiF e compará-las com as respostas do LiF, nota-se que a irradiação com os feixes de 24,6 e 33,3 keV resultou em respostas diferentes das obtidas por Cardoso et al. para o LiF. O gráfico da figura 16 ilustra as respostas relativas dos cristais deste trabalho e do LiF obtidas por Cardoso et al. em função da energia.

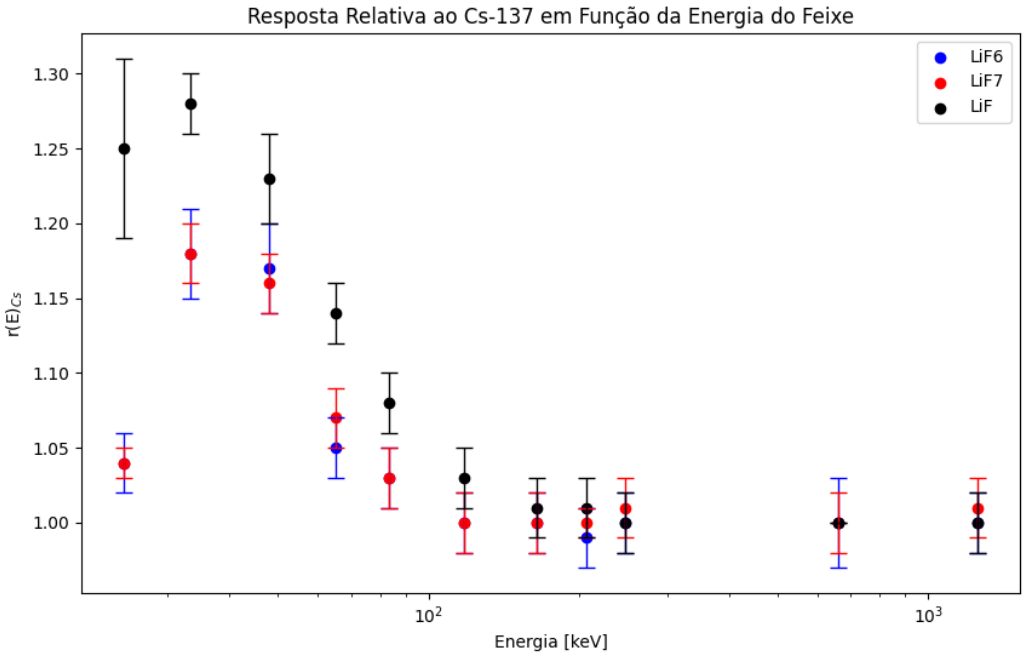

Figura 16 - Resposta dos cristais ^{6}LiF e ^{7}LiF normalizadas a resposta obtida pela irradiação com o feixe de Cs-137. Fonte: O autor (2024).

Neste gráfico é possível observar o comportamento da sensibilidade dos cristais e a discrepância entre as respostas dos ^{6}LiF e ^{7}LiF e o LiF para as energias mais baixas de 24,6 e 33,3 keV.

5.1.2. CALIBRAÇÃO DO MONITOR DE ALBEDO COM OS CAMPOS DE FÓTONS DE REFERÊNCIA

Para calibrar o monitor em $H_P(10)$, o valor da grandeza operacional foi calculado através da equação (26) utilizando os coeficientes de conversão da tabela 5. Os valores da grandeza são mostrados a seguir na tabela 9.

Tabela 9. Equivalente de Dose Individual calculado a partir do Kerma no Ar.

Energia [keV]	$H_P(10)$ [µSv]
24,6	$(2{,}58 \pm 0{,}02)\cdot 10^{-2}$
33,3	$(1{,}91 \pm 0{,}01)\cdot 10^{-2}$
47,9	$(1{,}46 \pm 0{,}01)\cdot 10^{-2}$
59,5	$(1{,}40 \pm 0{,}01)\cdot 10^{-2}$
65,2	$(1{,}43 \pm 0{,}01)\cdot 10^{-2}$
83,3	$(1{,}52 \pm 0{,}01)\cdot 10^{-2}$
118	$(1{,}97 \pm 0{,}01)\cdot 10^{-2}$
165	$(2{,}66 \pm 0{,}02)\cdot 10^{-2}$
207	$(3{,}36 \pm 0{,}02)\cdot 10^{-2}$
248	$(3{,}96 \pm 0{,}03)\cdot 10^{-2}$
662	$(9{,}66 \pm 0{,}04)\cdot 10^{-2}$
1253	$(1{,}59 \pm 0{,}01)\cdot 10^{-1}$

Fonte: O autor (2024).

Para facilitar a visualização das próximas tabelas, os cristais ^{6}LiF e ^{7}LiF do par incidente serão chamados de *6i* e *7i*, respectivamente. Assim como os cristais ^{6}LiF e ^{7}LiF do par de albedo serão chamados de *6a* e *7a*.

As doses nos cristais do monitor devido a irradiação com cada campo de referência simulado são mostradas a seguir na tabela 10.

Tabela 10. Doses obtidas em cada cristal do monitor para cada feixe simulado. Valores simulados para $2{,}5 \cdot 10^{8}$ histórias.

Energia [keV]	Dose 6i [μGy]	Dose 7i [μGy]	Dose 6a [μGy]	Dose 7a [μGy]
24,6	$(1{,}02 \pm 0{,}04)\cdot 10^{-2}$	$(9{,}6 \pm 0{,}3)\cdot 10^{-3}$	$(8{,}2 \pm 0{,}2)\cdot 10^{-3}$	$(8{,}0 \pm 0{,}5)\cdot 10^{-3}$
33,3	$(2{,}6 \pm 0{,}1)\cdot 10^{-2}$	$(2{,}47 \pm 0{,}06)\cdot 10^{-2}$	$(2{,}31 \pm 0{,}03)\cdot 10^{-2}$	$(2{,}21 \pm 0{,}04)\cdot 10^{-2}$
47,9	$(1{,}60 \pm 0{,}05)\cdot 10^{-2}$	$(1{,}58 \pm 0{,}06)\cdot 10^{-2}$	$(1{,}61 \pm 0{,}08)\cdot 10^{-2}$	$(1{,}54 \pm 0{,}06)\cdot 10^{-2}$
59,5	$(1{,}42 \pm 0{,}02)\cdot 10^{-2}$	$(1{,}35 \pm 0{,}05)\cdot 10^{-2}$	$(1{,}38 \pm 0{,}04)\cdot 10^{-2}$	$(1{,}37 \pm 0{,}05)\cdot 10^{-2}$
65,2	$(1{,}33 \pm 0{,}05)\cdot 10^{-2}$	$(1{,}3 \pm 0{,}1)\cdot 10^{-2}$	$(1{,}35 \pm 0{,}09)\cdot 10^{-2}$	$(1{,}28 \pm 0{,}04)\cdot 10^{-2}$
83,3	$(1{,}34 \pm 0{,}06)\cdot 10^{-2}$	$(1{,}30 \pm 0{,}05)\cdot 10^{-2}$	$(1{,}35 \pm 0{,}05)\cdot 10^{-2}$	$(1{,}33 \pm 0{,}04)\cdot 10^{-2}$
118	$(1{,}66 \pm 0{,}03)\cdot 10^{-2}$	$(1{,}6 \pm 0{,}1)\cdot 10^{-2}$	$(1{,}65 \pm 0{,}09)\cdot 10^{-2}$	$(1{,}61 \pm 0{,}07)\cdot 10^{-2}$
165	$(2{,}23 \pm 0{,}09)\cdot 10^{-2}$	$(2{,}21 \pm 0{,}08)\cdot 10^{-2}$	$(2{,}23 \pm 0{,}08)\cdot 10^{-2}$	$(2{,}16 \pm 0{,}05)\cdot 10^{-2}$
207	$(2{,}8 \pm 0{,}1)\cdot 10^{-2}$	$(2{,}66 \pm 0{,}06)\cdot 10^{-2}$	$(2{,}73 \pm 0{,}08)\cdot 10^{-2}$	$(2{,}1 \pm 0{,}1)\cdot 10^{-2}$
248	$(3{,}4 \pm 0{,}2)\cdot 10^{-2}$	$(3{,}2 \pm 0{,}1)\cdot 10^{-2}$	$(3{,}1 \pm 0{,}1)\cdot 10^{-2}$	$(3{,}2 \pm 0{,}2)\cdot 10^{-2}$
662	$(8{,}5 \pm 0{,}4)\cdot 10^{-2}$	$(8{,}2 \pm 0{,}2)\cdot 10^{-2}$	$(8{,}5 \pm 0{,}1)\cdot 10^{-2}$	$(8{,}2 \pm 0{,}3)\cdot 10^{-2}$
1253	$(1{,}38 \pm 0{,}06)\cdot 10^{-1}$	$(1{,}30 \pm 0{,}01)\cdot 10^{-1}$	$(1{,}41 \pm 0{,}04)\cdot 10^{-1}$	$(1{,}3 \pm 0{,}1)\cdot 10^{-1}$

Fonte: O autor (2024).

Apesar de simulado sob as mesmas condições, as doses dos cristais no monitor são menores que as dos cristais livres, devido à estrutura do próprio monitor que atenua mais os fótons incidentes que somente a camada ar. Para calibrar o monitor em $H_p(10)$, a equação 27 foi aplicada a cada cristal em todas as energias usadas na simulação. A tabela 11 mostra os fatores de calibração de cada cristal do monitor para as energias simuladas na irradiação.

Tabela 11. Fatores de calibração de cada cristal do monitor para as várias energia usadas nas simulações. Os números 6 e 7 referem-se, respectivamente, ao TLD-600 e TLD-700. Os índices (i) e (a) representam os cristais do par incidente e do par de albedo, respectivamente.

Energia [keV]	F_C 6i [μSv/μGy]	F_C 7i [μSv/μGy]	F_C 6a [μSv/μGy]	F_C 7a [μSv/μGy]
24,6	2,5 ± 0,1	2,67 ± 0,09	3,2 ± 0,1	3,2 ± 0,2
33,3	0,73 ± 0,03	0,77 ± 0,02	0,82 ± 0,01	0,86 ± 0,02
47,9	0,91 ± 0,03	0,92 ± 0,03	0,90 ± 0,04	0,94 ± 0,04
59,5	0,98 ± 0,02	1,04 ± 0,04	1,01 ± 0,03	1,02 ± 0,04
65,2	1,07 ± 0,04	1,1 ± 0,1	1,06 ± 0,08	1,12 ± 0,03
83,3	1,14 ± 0,06	1,17 ± 0,05	1,13 ± 0,04	1,15 ± 0,03
118	1,19 ± 0,02	1,26 ± 0,08	1,19 ± 0,06	1,22 ± 0,06
165	1,20 ± 0,05	1,20 ± 0,04	1,19 ± 0,05	1,23 ± 0,03
207	1,18 ± 0,05	1,26 ± 0,03	1,23 ± 0,04	1,26 ± 0,05
248	1,16 ± 0,06	1,23 ± 0,03	1,28 ± 0,05	1,24 ± 0,09
662	1,14 ± 0,05	1,18 ± 0,03	1,13 ± 0,02	1,17 ± 0,05
1253	1,15 ± 0,05	1,22 ± 0,09	1,13 ± 0,03	1,20 ± 0,09

Fonte: O autor (2024).

Para comparar a os fatores de calibração entre os TLDs do monitor, os fatores da tabela 11 foram normalizados ao F_C para a energia do ^{137}Cs e, a partir desses resultado foi feito o gráfico da figura 17 a seguir.

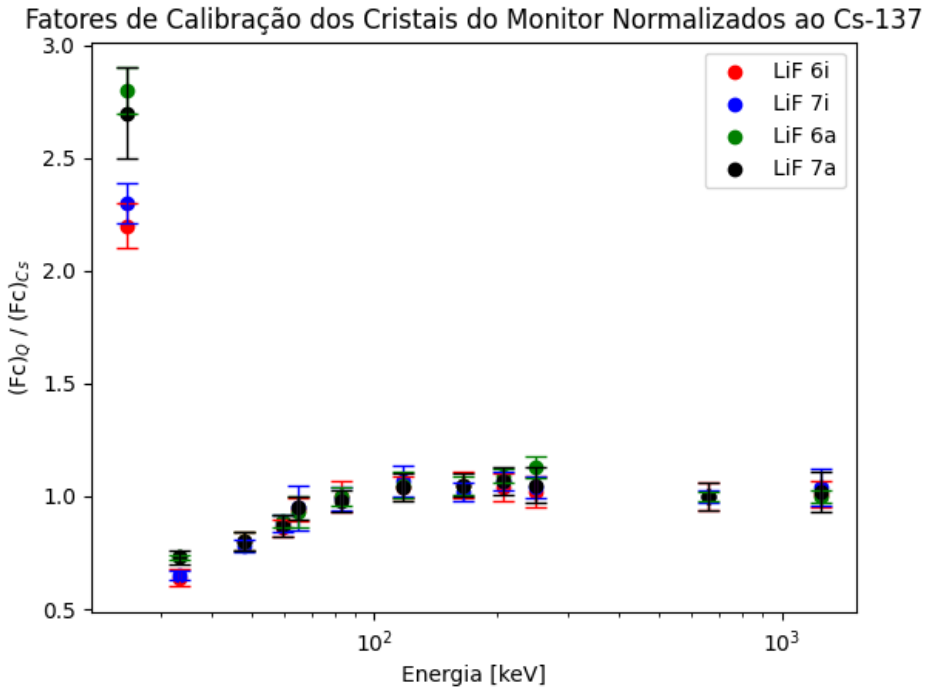

Figura 17 - Fatores de Calibração para as qualidades *Q* de cada cristal do monitor normalizados ao Cs. O índice *i* se refere ao par de cristais para a radiação incidente e o índice *a* para o par de albedo. Fonte: O Autor (2024).

A partir do gráfico acima, é possível notar que os cristais são mais sensíveis para energias abaixo da qualidade N60 (47,9 keV). Não existe diferença estatística entre os fatores de calibração dos cristais *6i* e *7i*, e o mesmo ocorre com *6a* e *7a*. Isso permite analisar a dose média das componentes, em vez da dose de cada cristal individualmente. Além disso vale ressaltar que a componente de albedo apresenta uma dependência energética maior que a componente incidente.

A tabela 12 mostra o fator de calibração para as componentes incidente e de albedo para cada energia utilizada. Esses fatores foram calculados pela razão da média das doses entre o ^{6}LiF e ^{7}LiF em cada componente e o $H_P(10)$. Em seguida, esses fatores foram comparados pelo teste Z utilizando o valor crítico de 3σ para serem considerados similares.

Tabela 12. Fatores de calibração das componentes incidentes e albedo representadas por $Fc_{Inc.}$ e Fc_{Alb}, respectivamente. Os valores de Z da comparação entre a dose das componentes são mostrados na última coluna.

Energia [keV]	Fc_{Inc} [µSv/µGy]	$Fc_{Alb.}$ [µSv/µGy]	Z
24,6	2,59 ± 0,02	3,18 ± 0,03	16,2
33,3	0,749 ± 0,004	0,843 ± 0,004	16,2
47,9	0,916 ± 0,006	0,924 ± 0,006	0,9
59,5	1,009 ± 0,004	1,016 ± 0,004	1,2
65,2	1,097 ± 0,006	1,062 ± 0,006	4,4
83,3	1,16 ± 0,01	1,137 ± 0,009	1,5
118	1,221 ± 0,007	1,208 ± 0,007	1,4
165	1,20 ± 0,01	1,21 ± 0,01	0,9
207	1,22 ± 0,01	1,243 ± 0,009	1,9
248	1,20 ± 0,01	1,26 ± 0,01	4,4
662	1,16 ± 0,01	1,153 ± 0,005	1,1
1253	1,19 ± 0,01	1,16 ± 0,01	1,5

Fonte: O autor (2024).

Ao aplicar o teste Z para comparar os fatores de calibração entre as componentes incidente e de albedo, foi verificado que, para as energias de 24,6, 33,3, 65,2 e 248 keV, os valores de Z foram, respectivamente, 16,2, 16,2, 4,4 e 4,4. Ou seja, para essas energias os fatores não são estatisticamente similares. Para as demais energias, o teste resultou em valores de Z abaixo de 3σ, mostrando que os valores são compatíveis entre si.

Os resultados das tabelas 11 e 12 mostram que devido a similaridade entre as doses dos cristais na componente incidente do monitor e na de albedo, pode ser utilizada a dose média das componentes em vez da dose de cada cristal individualmente. Desta maneira, através das curvas de calibração para as componentes incidente e de albedo foi definido o algoritmo que permite avaliar a dose devido a campos de fótons.

Além disso, vale ressaltar que, apesar de os fatores de calibração da componentes serem compatíveis para a maioria das energias utilizadas neste trabalho, para as quatro energias citadas anteriormente, a componente de albedo apresentou valores maiores de $H_P(10)$ por unidade de dose. Assim, adotando uma postura mais conservadora, a componente de albedo seria a mais adequada para realizar a avaliação da grandeza operacional nos IOEs.

5.2. EXPERIMENTO

As figuras 11(a) e 11(b) mostram a montagem experimental no LABIR para expor os monitores as fontes de ^{241}Am e ^{137}Cs nas configurações livres no ar e sobre o *slab phantom*.

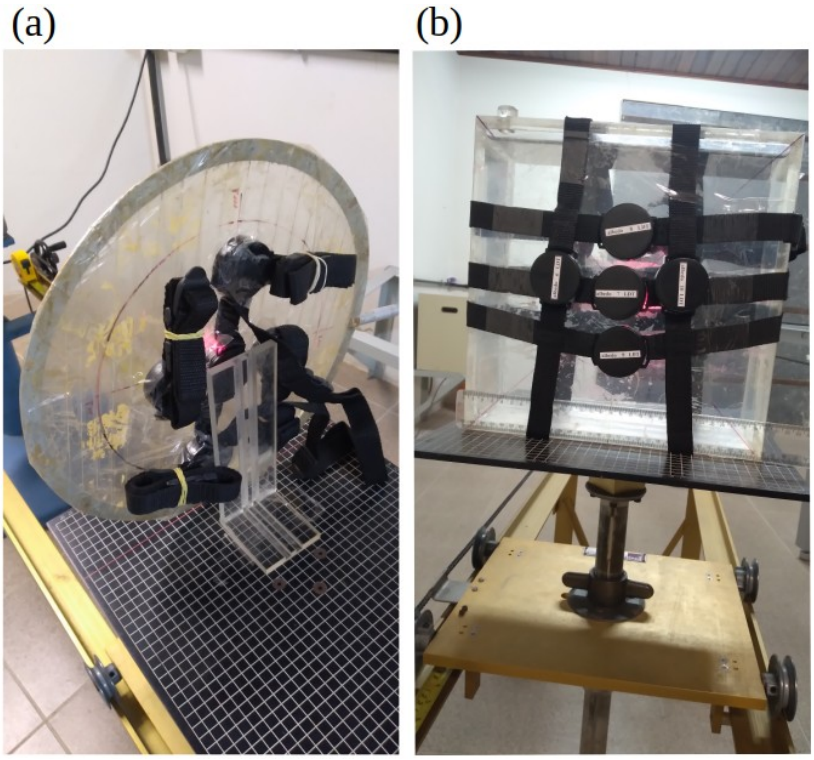

Figura 18 - Montagem experimental no LABIR. A figura (a) mostra os cinco monitores sobre o superte plástico para a irradiação na configuração livre no ar. A figura (b) mostra a montagem para a configuração dos monitores sobre o slab phantom. Fonte: O autor (2023).

Os monitores foram irradiados com valores de Kerma no ar de 1,8 mGy, para as fontes de ^{241}Am e ^{137}Cs. O $H_P(10)$ também foi calculado pela equação 26, resultando nos valores 3,44 e 2,28 mSv respectivamente, para as fontes de ^{241}Am e ^{137}Cs.

As leituras nos monitores referentes as exposições no LABIR foram obtidas pela leitora de TLDs em unidade de carga elétrica. A tabela 13 a seguir mostra as leituras de BG para os cristais ^{6}LiF e ^{7}LiF.

Tabela 13. Leituras de BG nos ^{6}LiF e ^{7}LiF dos cinco monitores de controle.

BG (^{6}LiF) [nC]	BG (^{7}LiF) [nC]
0,932	0,90
1,009	0,83
0,957	0,87
0,997	0,85
1,12	1,01
1,082	1,08
0,998	0,99
1,066	0,92
1,197	0,96
1,039	0,91
1,04 ± 0,08	0,93 ± 0,08

Fonte: O autor (2023).

Observando as médias dos BGs, nota-se que os valores são similares para ambos os cristais no limite das incertezas. A tabela 14 a seguir mostra os valores de dose referentes a exposição à fonte de ^{241}Am dos cinco monitores colocados sobre o slab phantom e dos cinco monitores livres no ar. A fim de tornar mais fácil a visualização das tabelas, os cristais ^{6}LiF e ^{7}LiF do par incidente serão referenciados como *6i* e *7i*, respectivamente, assim como os cristais do par de albedo serão chamados de *6a* e *7a*.

Para cada cristal dos monitores foi obtido um valor de dose. Assim foi tomada a média aritmética e desvio padrão entre os cristais 6i de cada monitor. Os mesmo procedimento foi realizado para os demais cristais. As tabelas 14 e 15 mostram respectivamente as leituras em cada cristal dos monitores irradiados com as fontes de ^{241}Am e ^{137}Cs.

Tabela 14. Leituras *L* referentes a irradiação dos monitores a fonte de Am-241. Os monitores 40001 a 40005 foram expostos na configuração sobre o slab phantom. Os monitores de ID de 40016 a 40020 foram expostos na configuração livre no ar.

Monitor ID	L(6i) [nC]	L(7i) [nC]	L(6a) [nC]	L(7a) [nC]
40001	20,96	20,25	19,92	19,71
40002	21,21	20,3	21,99	19,38
40003	20,07	19,33	19,8	18,41
40004	19,65	20,44	20,27	19,67
40005	21,6	21,31	19,63	19,88
Dose média	20,7 ± 0,4	20,3 ± 0,3	20,3 ± 0,4	19,4 ± 0,3
40016	15,543	15,23	13,182	12,679
40017	15,808	15,726	12,325	12,585
40018	15,984	14,656	12,662	12,752
40019	14,705	14,54	12,43	12,705
40020	14,705	1,774	12,296	12,033
Dose média	15,5 ± 0,3	14,8 ± 0,3	12,6 ± 0,2	12,6 ± 0,1

Fonte: O autor (2024).

A média e desvio padrão para os cristais 6i dos cinco monitores foram calculadas para que fosse possível realizar análises e comparações com os dados das simulações de Monte Carlo. Este procedimento foi repetido para os demais cristais dos cinco monitores.

Analisando os valores de carga nos cristais expostos ao ^{241}Am, foi possível notar que quando o monitor é exposto livre no ar, as leituras no par incidente apresentam valores maiores que no par de albedo, como era esperado devido a ausência do retroespalhamento causado pelo *slab phantom*. Quando o monitor é exposto sobre o simulador, é possível verificar a influência do restroespalhamento, aumentando o valor de leitura nos cristais e tornado as leituras comparáveis entre os pares incidente e de albedo.

Tabela 15. Leituras *L* referentes a irradiação dos monitores a fonte de Cs-137. Os monitores 40006 a 40010 foram expostos na configuração sobre o slab phantom. Os monitores de ID de 40011 a 40015 foram expostos na configuração livre no ar.

Monitor ID	L(6i) [nC]	L(7i) [nC]	L(6a) [nC]	L(7a) [nC]
40006	12,268	12,767	11,323	10,584
40007	12,216	12,996	11,929	11,459
40008	12,515	11,529	11,76	11,63
40009	12,639	12,344	11,534	11,633
40010	12,194	11,879	11,359	11,335
Dose média	12,4 ± 0,1	12,3 ± 0,3	11,6 ± 0,1	11,3 ± 0,2
40011	10,029	10,198	9,031	10,243
40012	10,803	10,687	10,045	9,967
40013	11,174	10,541	9,889	9,917
40014	11,412	10,83	10,269	10,109
40015	10,469	12,735	9,82	9,475
Dose média	10,8 ± 0,2	11,0 ± 0,4	9,8 ± 0,2	9,9 ± 0,1

Os resultados das exposições ao ^{137}Cs apresentam um comportamento diferente devido a energia do feixe. As leituras nos pares incidente e de albedo são comparáveis em ambas as configurações, livre no ar e sobre o *slab phantom*. O retroespalhamento fornecido pelo *slab phantom* não contribuiu com um aumento significativo no valor das leituras.

Os valores de BG foram subtraídos da média das doses dos cristais. Assim, as leituras finais para cada cristal são mostradas na tabela 16 a seguir.

Tabela 16. Média das leituras nos cristais dos monitores nas exposições as fontes de Am-241 e Cs-137 livre no ar e sobre o Slab Phantom.

Leituras das Exposições ao ^{241}Am [nC]			Leituras das Exposições ao ^{137}Cs [nC]	
Cristais	Livre no Ar	Sobre o Phantom	Livre no Ar	Sobre o Phantom
6i	14,3 ± 0,3	19,7 ± 0,4	9,8 ± 0,2	11,4 ± 0,1
7i	13,9 ± 0,3	19,4 ± 0,3	10,1 ± 0,4	11,4 ± 0,3
6a	11,6 ± 0,2	20,3 ± 0,4	9,8 ± 0,2	11,6 ± 0,1
7a	11,7 ± 0,1	19,4 ± 0,3	9,9 ± 0,1	11,3 ± 0,2

Fonte: O autor (2024).

As leituras da tabela acima, confirmam as analises feitas anteriormente, o retroespalhamento fornecido pelo *slab phantom* aumenta de forma significativa a leitura nos cristais, de aproximadamente (37 ± 4)% no par incidente e (76 ± 4)% no par de albedo nas

exposições ao ^{241}Am. Um aumento dessa magnitude não foi observado nas exposições à fonte de ^{137}Cs. Na configuração Livre no Ar, o par albedo apresentou valores de leitura comparáveis ao do par incidente, sugerindo que a estrutura monitor não é suficiente para atenuar os fótons dessa energia, 662 keV. Ao posicionar o monitor sobre o *slab phantom*, a influência do retroespalhamento no aumento das leituras não foi significativa. Isso devido à maior sensibilidade dos cristais às energias mais baixas e sugere que a estrutura do monitor não é suficiente para atenuar os fótons dessa energia ou maiores.

Fazendo a razão entre o $H_P(10)$ e a dose nos cristais, tomadas na irradiação do monitor sobre o *slab phantom*, para encontrar o fator de calibração, foram obtidos os resultados mostrados na tabela 17.

Tabela 17. Fatores de calibração dos cristais devido a irradiação no LABIR.

Cristais	F_C para a fonte de ^{241}Am [mSv/nC]	F_C para a fonte de ^{137}Cs [mSv/nC]
6i	0,175 ± 0,004	0,0989 ± 0,0009
7i	0,177 ± 0,003	0,099 ± 0,003
6a	0,169 ± 0,003	0,0968 ± 0,0008
7a	0,177 ± 0,003	0,099 ± 0,002

Fonte: O autor (2024).

5.2.1. COMPARAÇÃO DAS SIMULAÇÕES COM O EXPERIMENTO

No LABIR, os radionuclídeos de ^{241}Am e ^{137}Cs estão armazenados em capsulas blindadas. As capsulas possuem uma janela que se abre para exposição dos radionuclídeos e um sistema de colimadores para modelar o feixe. Não foi possível verificar as geometrias da disposição dos radionuclídeos nas capsulas e do sistema de colimação do feixe devido ao risco de exposição. Por isso, foram reproduzidos nas simulação de forma a obter um fator de conversão das leituras para Gray.

A tabela 18 abaixo, mostra os resultados obtidos nas simulações reproduzindo de forma aproximada as condições do LABIR para as exposições às fontes de ^{241}Am e ^{137}Cs nas configurações livre no ar e sobre o *slab phantom* com as respectivas distâncias de 0,75 e 1 metros. A fonte simulada é um fonte plana, quadrada de 31x31 cm^2. Primeiramente, foram realizadas as simulações na configuração do monitor livre no ar para as energias

Para facilitar a visualização desta e da próximas tabelas, os cristais ^{6}LiF e ^{7}LiF do par incidente serão chamados de *6i* e *7i*. Assim com os cristais ^{6}LiF e ^{7}LiF do par de albedo serão chamados de *6a* e *7a*.

Tabela 18. Doses nos cristais do monitor obtidas nas simulações da exposição ao Am-241 e ao Cs-137 nas configurações Livre no Ar e Sobre o *Phantom*.

Cristais	Doses da Simulação com ^{241}Am [μGy]		Doses da Simulação com ^{137}Cs [μGy]	
	Livre no Ar	Sobre o *Phantom*	Livre no Ar	Sobre o *Phantom*
6i	$(9,5 \pm 0,6)\cdot 10^{-3}$	$(1,42 \pm 0,02)\cdot 10^{-2}$	$(7,0 \pm 0,6)\cdot 10^{-2}$	$(8,3 \pm 0,5)\cdot 10^{-2}$
7i	$(9,5 \pm 0,9)\cdot 10^{-3}$	$(1,35 \pm 0,05)\cdot 10^{-2}$	$(7,5 \pm 0,3)\cdot 10^{-2}$	$(8,3 \pm 0,4)\cdot 10^{-2}$
6a	$(7,9 \pm 0,4)\cdot 10^{-3}$	$(1,38 \pm 0,04)\cdot 10^{-2}$	$(7,8 \pm 0,4)\cdot 10^{-2}$	$(8,5 \pm 0,3)\cdot 10^{-2}$
7a	$(7,6 \pm 0,3)\cdot 10^{-3}$	$(1,37 \pm 0,05)\cdot 10^{-2}$	$(7,4 \pm 0,3)\cdot 10^{-2}$	$(8,2 \pm 0,3)\cdot 10^{-2}$

Fonte: O autor (2024).

Pela tabela acima, analisando as simulações das exposições ao ^{241}Am, foi verificado que um aumento das doses de (46 ± 9)% no par incidente e de (80 ± 7)% no par de albedo ao colocar o *slab phantom* atrás do monitor. Comparando esses valores da simulação com os aumentos observados no LABIR, (37 ± 4)% na leitura do par incidente e (76 ± 4)% na leitura do par de albedo, obteve-se para o par incidente Z = 0,91 e para o par de albedo Z = 0,50. Isso mostra que o retroespalhamento causado pelo *slab phantom* aumentou as leituras no LABIR e as doses nas simulações com a mesma proporção.

No LABIR, foi observado que as exposições a fonte de ^{137}Cs, ao colocar o *slab phantom* atrás do monitor, o aumento nas leituras não teve a mesma magnitude que nas exposições ao ^{241}Am, (15 ± 3)% no par incidente e de (16 ± 2)% no par de albedo. Simulando as condições laboratoriais da exposição ao ^{137}Cs, monitor livre no ar e sobre *slab phantom*, ambas sem a placa para build-up, foi observado um aumento de (8 ± 6)% nas doses do par incidente e (10 ± 5)% nas doses do par de albedo. Comparando o aumento das doses na simulação com os observados no LABIR, obteve-se para o par incidente Z = 1,04 e para o par de albedo Z = 1,11. A comparação mostra que o retroespalhamento do simulador aumenta o valor das leituras no LABIR e das doses nas simulações na mesma proporção.

Para a energia do ^{137}Cs no laboratório, o aumento da dose nos cristais devido a adição do *slab phantom* é de (15 ± 3)% no par incidente e de (16 ± 2)% no par de albedo, ou seja, a dose nas componentes aumenta da mesma proporção. Nas simulações de Monte Carlo, esse

aumento é de (8 ± 6)% no par incidente e (10 ± 5)% no par de albedo. Mostrando que a dose nas componentes também aumentam na mesma proporção.

Os resultados das tabelas 18 e 16 foram normalizados ao ^{6}LiF do par incidente para serem analisados graficamente. A figura 19 mostra o comportamento do monitor livre no ar para a exposição às fontes de ^{241}Am e ^{137}Cs.

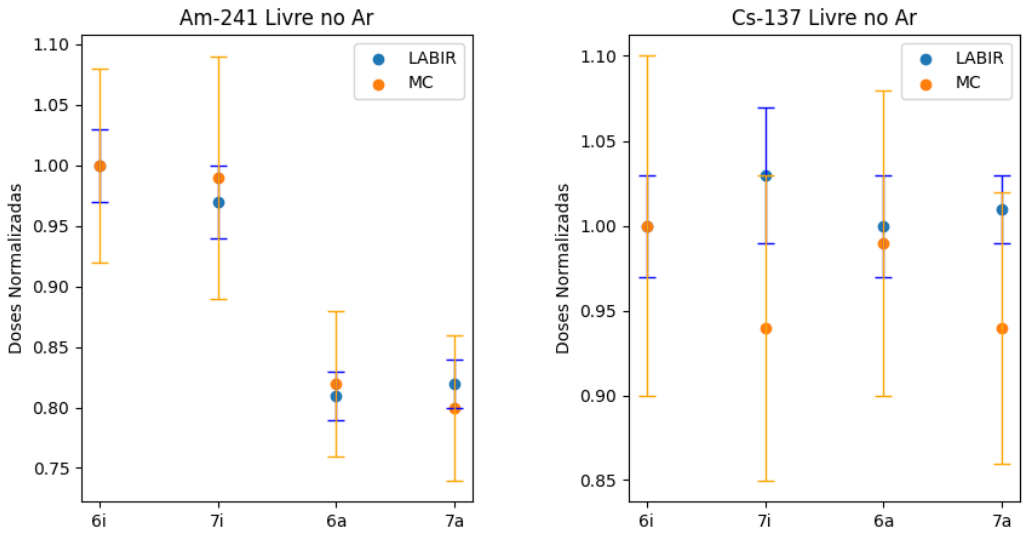

Figura 19 - Leituras do LABIR e doses das simulações referentes a irradiação do monitor livre no ar com as fontes de Am-241 e Cs-137 normalizadas ao LiF-6 do par incidente. Fonte: O autor (2024).

Os gráficos da figura 19 mostram que as simulações com o monitor correspondem aos resultados do laboratório. Para a exposição a fonte de ^{241}Am, era esperado que o par incidente apresentasse valores maiores que o par de albedo, pois além da ausência do retroespalhamento pelo *slab phantom*, a própria estrutura do monitor atenua significativamente os fótons desta energia. Já para a exposição ao ^{137}Cs , foram observados valores similares entre os pares tanto no laboratório, quanto nas simulações. Isso ocorreu, pois a energia desses fótons é alta o suficiente para não serem atenuados significativamente pela estrutura do monitor.

A figura 20 mostra o comportamento do monitor sobre o *slab phantom* para a exposição às fontes de ^{241}Am e ^{137}Cs.

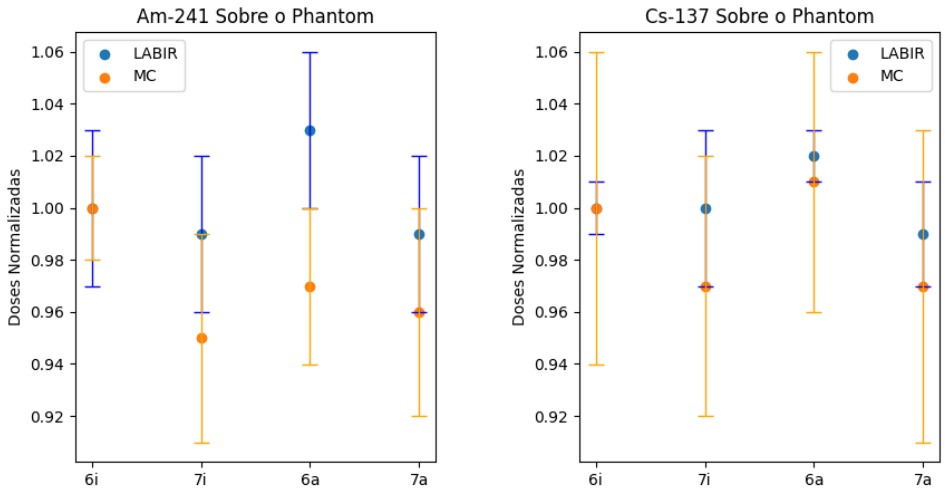

Figura 20 - Leituras do LABIR e doses das simulações referentes a irradiação do monitor sobre o *slab phantom* com as fontes de Am-241 e Cs-137 normalizadas ao LiF-6 do par incidente. Fonte: O autor (2024).

O gráfico da figura 20 mostra que na configuração do monitor sobre o *slab phantom*, é possível verificar a influência do retroespalhamento causado pelo *slab phantom* na energia do ^{241}Am. Os pares incidente e de albedo apresentam valores similares tanto no laboratório, quanto nas simulações. No limite da incerteza, os resultados das simulações são compatíveis com os do laboratório.

O gráfico para a energia do ^{137}Cs mostra que o monitor se comportou da mesma maneira no laboratório e nas simulações, apresentando valores similares para os pares incidente e de albedo.

6. CONCLUSÕES

Pela análise da resposta dos cristais ^{6}LiF e ^{7}LiF livres no ar, foi observado que as doses depositados nos cristais devido aos feixes simulados com energias mais baixas não são compatíveis entre si. Conforme a energia do feixe aumentou, essas doses se tornam compatíveis, porém, as doses no ^{6}LiF são ligeiramente maiores que no ^{7}LiF, cabendo revisar a composição dos cristais implementados no código e considerar correção dessas doses pela sensibilidade dos cristais.

A resposta dos cristais ^{6}LiF e ^{7}LiF livres ar normalizadas a resposta do ^{137}Cs são similares, da figura 16, confirmando as observações de M. M. [10] e contribuindo para o entendimento de seus comportamentos dentro da estrutura do monitor.

Pelas simulações com os campos de referência para calibração do monitor na grandeza $H_P(10)$ foi possível definir um algoritmo para calcular a grandeza operacional em campos de fótons. A análise das componentes incidentes e de albedo separadamente, mostrou que as doses depositadas nos ^{6}LiF e ^{7}LiF de cada par (incidente e de albedo) são similares e respondem da mesma maneira, tornando possível analisar a média entre as doses dos cristais de cada componente.

A comparação entre os fatores de calibração para a avaliar o $H_P(10)$ das componentes mostrou que para baixas energias a componente de albedo possui valores de dose maiores que a componente incidente. Sugerindo que a curva de calibração mais adequada para avaliar a grandeza operacional seja a da componente de albedo.

A comparação dos resultados das simulações de Monte Carlo com os obtidos no LABIR, mostraram que o monitor simulado com as condições aproximadas do laboratório sofreu a mesma influência do retroespalhamento que o monitor no LABIR. Para as exposições ao ^{241}Am, os retroespalhamento do *slab phantom* quando posicionado atrás do monitor aumentou as leituras no par incidente em (37 ± 4)% e (76 ± 4)% no par de albedo. As doses das simulações no par incidente aumentaram em (46 ± 9)% e em (80 ± 7)% no par de albedo.

Para as exposições ao ^{137}Cs, tanto no LABIR, quanto na simulação o aumento pelo retroespalhamento não teve a mesma magnitude para a energia do ^{241}Am. No LABIR o par incidente aumentou em (15 ± 3)% e em (16 ± 2)% no par de albedo. Enquanto nas simulações o aumento nos pares incidente e de albedo foram de (8 ± 6)% e (10 ± 5)%. Essas

proporções de aumento no LABIR e nas simulações são compatíveis entre si, validando a obtenção da resposta a fótons com a descrição do monitor no Geant4 e a relação entre as doses no monitor e o $H_P(10)$.

O espectro de energia dos fótons gerados nos campos de nêutrons usados no IRD na calibração do monitor em $H_P(10)$ ainda não foi estabelecido com precisão. No entanto, este trabalho abrangeu um largo intervalo de energia para obtenção da resposta do monitor a fótons. O espectro de energia dos fótons gerados pelos campos de nêutrons pode ser obtido e, uma vez obtida essa distribuição de energia, as respostas a fótons do monitor de albedo obtidas nesses trabalho podem auxiliar no entendimento do comportamento do monitor a componente de fótons dos campos de nêutrons.

7. Perspectivas futuras

Para futuros trabalhos com monitor de nêutrons de albedo do IRD, deve ser obtida a resposta do monitor aos espectros de fótons dos campos de referência recomendados pela ISO 4037-1, o quanto estas diferem da resposta aos feixes monoenergéticos simulados.

Uma segunda proposta é a obter o espectro de energia do fótons gerados pelos campos de nêutrons e implementar o algoritmo de avaliação do $H_P(10)$, curva de calibração do par de albedo.

Uma última proposta seria implementar a geometria do monitor sobre o *phantom* de voxels masculino e feminino da ICRP e comparar o $H_P(10)$ medido no monitor com a *Dose Efetiva (E)* calculada no *phantom* [41]

REFERÊNCIAS

[1] DELUCA JR, Paul M. ICRU: a historical perspective of 90 years of radiation science. **Radiation protection dosimetry**, v. 132, n. 4, p. 361-364, 2008.

[2] CLARKE, R. H.; VALENTIN, Jack. The History of ICRP and the Evolution of its Policies: Invited by the Commission in October 2008. **Annals of the ICRP**, v. 39, n. 1, p. 75-110, 2009.

[3] HANKINS, Dale E. Progress in personnel neutron dosimetry. 1973.

[4] DE SOUZA, H. V. C. Neutron dosimeter utilizing CR-39. 1991.

[5] FREITAS, B. M. et al. Study of neutron scattering contribution on H p (10) and H*(10) calibration in the Brazilian National Low Scattering Laboratory. **Radiation protection dosimetry**, v. 161, n. 1-4, p. 176-180, 2014.

[6] ATTIX, Frank Herbert. **Introduction to radiological physics and radiation dosimetry**. John Wiley & Sons, 2008.

[7] PODGORšAK, E. B. **Radiation Physics for Medical Physicists**. Berlim: Springer, v. 1, 2006

[8] EISBERG, Robert; RESNICK, Robert. Física Quântica, Ed. Campus, Rio de Janeiro, 1979.

[9] KNOLL, Glenn F. **Radiation detection and measurement**. John Wiley & Sons, 2010.

[10] MARTINS, M. M. **Desenvolvimento e caracterização de um sistema de monitoração individual de nêutrons tipo albedo de duas componentes usando detectores termoluminescentes.** 2008. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

[11] NORMA, C. N. E. N. NN 3.01, Resolução CNEN 27/04 Janeiro/2005, **DIRETRIZES BÁSICAS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA**, Resolução CNEN 164/14 Alteração do item 5.4. 3.1. Publicação: DOU, v. 11, 2014.

[12] BRASIL. Ministério da Saúde. RESOLUÇÃO - RDC Nº 611, DE 9 DE MARÇO DE 2022. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2022.

[13] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Radiological protection-X and gamma reference radiation for calibrating dosemeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy-part 1: radiation characteristics and production methods. **ISO**, v. 4037, p. 1, 2019.

[14] TAUHATA, L. et al. Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos–10ª revisão abril/2014. **Rio de Janeiro: IRD/CNEN**.

[15] FOLKERT, Michael Ryan. **Monte Carlo simulation of neutron shielding for proton therapy facilities**. 1998. Tese de Doutorado. Massachusetts Institute of Technology.

[16] AGOSTINELLI, Sea et al. GEANT4—a simulation toolkit. **Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 506, n. 3, p. 250-303, 2003.

[17] COLLABORATION, Geant et al. Book for application developers. URL http://geant4-userdoc. web. cern. ch/geant4-userdoc/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/BackupVersions, v. 10, p. 5-2.0, 2019.

[18] MARTINS, M. M. et al. Brazilian two-component TLD albedo neutron individual monitoring system. **Radiation measurements**, v. 45, n. 10, p. 1509-1512, 2010.

[19] RIBEIRO, Rosane Moreira; SOUZA-SANTOS, Denison. Monte Carlo characterization of an individual albedo neutron monitor. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, v. 9, n. 2C Suppl., 2021.

[20] NEDAIE, Hassan Ali et al. Neutron dose measurements of Varian and Elekta linacs by TLD600 and TLD700 dosimeters and comparison with MCNP calculations. **Journal of Medical Physics**, v. 39, n. 1, p. 10-17, 2014

[21] MARTINS, M. M. et al. Characterization of a two-component thermoluminescent albedo dosemeter according to ISO 21909. **Radiation Measurements**, v. 46, n. 5, p. 555-560, 2011.

[22] CAVALIERI, Tássio A.; CASTRO, Vinícius A.; SIQUEIRA, Paulo TD. Uso do MCNP para comparação das respostas de dose depositada nos TLD 100, TLD 600 e

TLD 700 em campos de irradiação devido a fontes de 60Co e 241AmBe. **Revista Brasileira de Física Médica**, v. 6, n. 2, p. 91-94, 2012.

[23] CARDOSO, Gabriela Pontes; LACERDA, Marco Aurélio de S. Monte Carlo simulation of the MTS-N LiF: Mg, Ti relative response in function of the photon energy. In: **Journal of Physics: Conference Series**. IOP Publishing, 2021. p. 012050.

[24] GUALDRINI, G. F.; MORELLI, B. **Air kerma to personal dose equivalent conversion factors for the ICRU and ISO recommended slab phantoms for photons from 20 keV to 1 MeV**. SCAN-9701110, 1996.

[25] DAVIS, S. D. et al. The response of lif thermoluminescence dosemeters to photon beams in the energy range from 30 kV x rays to 60Co gamma rays. **Radiation protection dosimetry**, v. 106, n. 1, p. 33-43, 2003.

[26] OKUNO, Emico; YOSHIMURA, Elisabeth Mateus. Física das radiações. Oficina de textos, 2016.

[27] CAVALIERI, Tássio Antonio. Emprego do MCNP no estudo dos TLDs 600 e 700 visando a implementação da caracterização do feixe de irradiação na instalação de BNCT do IEA-R1. **São Paulo. Dissertação de Mestrado-Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo**, 2013.

[28] ISO - International Organization for Standardization. Radiological protection – X and gamma reference radiation for calibratig dosemeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy – Part 3: Calibration of area and personal dosemeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence. 2019 ISO 4037-3.

[29] ICRP, 2009. **Adult Reference Computational Phantoms**. ICRP Publication 110. Ann. ICRP 39 2.

[30] ANDREO, Pedro et al. **Fundamentals of ionizing radiation dosimetry**. John Wiley & Sons, 2017.

[31] ICRP, 2007. **The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103**. Ann. ICRP 37 2-4.

[32] ICRP, 1991. **1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60**. Ann. ICRP 21 1-3.

[33] BATISTA, B. J. B., **Avaliação de Dosímetros Termoluminescentes para Uso em Radioterapia com Fótons de Alta Energia**. Instituto de Física, Universidade de São Paulo. Dissertação de Mestrado. São Paulo, 2011.

[34] ASNI, H. et al. Thermoluminescence energy response of TLD-100 subjected to photon irradiation using Monte Carlo N-particle transport code version 5. **Journal of Engineering Thermophysics**, v. 20, p. 329-333, 2011.

[35] YEOM, Yeon Soo et al. Dose coefficients of mesh-type ICRP reference computational phantoms for idealized external exposures of photons and electrons. **Nuclear Engineering and Technology**, v. 51, n. 3, p. 843-852, 2019.

[36] CNEN-NN, C. N. E. N. 3.05. **Requisitos de Segurança e Proteção Radiológica para Serviços de Medicina Nuclear**, 2013.

[37] FURUTA, Y.; TANAKA, S. Response of 6LiF and 7LiF thermoluminescence dosimeters to fast neutrons. Nuclear Instruments and Methods, v. 104, n. 2, p. 365-374, 1972.

[38] HOEDLMOSER, H. et al. Photon contributions from the 252Cf and 241Am–Be neutron sources at the PSI Calibration Laboratory. Radiation measurements, v. 47, n. 8, p. 567-570, 2012.

[39] PIESCH, E. Progress in albedo neutron dosimetry. Nuclear Instruments and Methods, v. 145, n. 3, p. 613-619, 1977.

[40] FREITAS, Bruno Mendes. Simulação Monte Carlo da resposta de um monitor individual de nêutrons tipo albedo. 2018.

[41] MARTINS, M. C. et al. Dose conversion coefficients for ICRP110 voxel phantom in the Geant4 Monte Carlo code. Radiation Physics and Chemistry, v. 95, p. 309-312, 2014.