



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE FÍSICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM FÍSICA MÉDICA

ANA LUIZA COSTA DE ÁVILA

**O USO DO CÓDIGO DE MONTE CARLO MCNP EM TESES E
DISSERTAÇÕES ACADÊMICAS: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

UBERLÂNDIA-MG

2023

ANA LUIZA COSTA DE ÁVILA

**O USO DO CÓDIGO DE MONTE CARLO MCNP EM TESES E
DISSERTAÇÕES ACADÊMICAS: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação em Física Médica do
Instituto de Física da Universidade
Federal de Uberlândia como
requisito para a obtenção do título de
bacharel em Física Médica.
Orientador: Dr. William de Souza
Santos.

UBERLÂNDIA-MG

2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, por todo o apoio, amor e compreensão durante todos esses anos. À minha mãe Suely, uma mulher forte e exemplar, que eu amo mais que tudo, por todo o esforço que ela faz por mim e por meus irmãos e por me amar incondicionalmente sempre. Aos meus irmãos amados, João Pedro e Rafael por estarem sempre comigo. À minha avó Maria e ao meu pai Sidney que não podem estar mais ao meu lado, mas continuam me acompanhando lá do céu.

Aos meus amigos da faculdade que me ajudaram a chegar até aqui, a me moldar como uma pessoa melhor e que nunca me abandonaram, Antônio, Bruna, Moara, Júlia, Othon e Tawan.

Aos meus amigos Bruna, Carlos Eduardo, Florença, Jéssica, Júlia, Lara, Larissa, Maria Alice, Maria Eduarda e Wilson, que mesmo distantes, estão sempre torcendo por mim.

Ao meu amor, Daniel, que é meu companheiro, atencioso, amoroso e que me apoia em todos os momentos.

A todos os professores da graduação, especialmente, Lúcio e William, que me acolheram e me deram todo o suporte necessário.

Ao meu orientador William, por ter abraçado meu projeto e ter me ajudado tanto.

À Coordenação do curso de Física Médica, por toda a parceria e eficiência.

À Universidade Federal de Uberlândia por toda a estrutura e acolhimento durante esses anos.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	5
INTRODUÇÃO.....	5
CAPÍTULO 2	7
FUNDAMENTOS TEÓRICOS	7
2.1 O método de Monte Carlo	7
2.2 Código Computacional MCNP (Monte Carlo-N Particle)	7
2.3 Versões atualizadas do código MCNP	8
2.4 Grandes áreas da Física Médica	9
2.5 Radioterapia.....	9
2.6 Radiodiagnóstico	10
2.7 Medicina Nuclear	10
2.8 Grandezas Dosimétricas	11
2.8.1 Grandezas Físicas	11
2.8.1.1 Exposição	11
2.8.1.2 Kerma	11
2.8.1.3 Dose Absorvida	12
2.9.1 Grandezas de Proteção	12
2.9.1.1 Dose equivalente no tecido ou no órgão H_T	13
2.9.1.2 Dose efetiva	13
2.10.1 Grandezas operacionais	14
2.10.1.1 Equivalente de dose pessoal	14
2.10.1.2 Equivalente de dose ambiente	14
2.11.1 Grandezas mais utilizadas nas grandes áreas	15
2.11.1.1 Radioterapia.....	15
2.11.1.2 Radiodiagnóstico	15
2.11.1.3 Reator Nuclear.....	15
CAPÍTULO 4	18
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	18
4.1 Resultados classificados por países	18
4.2 Resultados classificados por universidades.....	20
4.3 Resultados classificados por versão de código utilizado.....	23
4.4 Resultados classificados por aplicação.....	24
CONCLUSÕES.....	27

REFERÊNCIAS 28

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Infográfico da distribuição de publicações que utilizam o código MCNP por países.	19
Figura 2: Códigos utilizados e sua quantificação.	24
Figura 3: Distribuição das dissertações e teses por área que utilizaram o código MCNP.	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fatores de ponderação da radiação(w_R) segundo a ICPR-103.	13
Tabela 2: Fator de ponderação do tecido (w_T) segundo a ICPR-103.	14
Tabela 3: Número de publicações que utilizam o código MCNP por país em ordem alfabética.....	18
Tabela 4: Instituições com seu número de publicações que utilizam o código MCNP..	20

LISTA DE SIGLAS

ALGAM	Monte Carlo Estimation of Internal Dose from Gamma-Ray Sources in a Phantom Man
CT	Tomografia Computadorizada
eV	Elétron-volt
EGS	Electron Gamma Shower
GEANT	Geometry and Tracking
ICRP	International Commission on Radiological Protection
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
IOE	Indivíduo Ocupacionalmente Exposto
LANL	Los Alamos National Laboratory
MC	Monte Carlo
MCNP	Monte Carlo N-Particle
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MCNPX	Monte Carlo N-Particle Extended
MMC	Método de Monte Carlo
PENELOPE	Penetration and Energy Loss of Positrons and Electrons
PET	Tomografia por Emissão de Pósitrons
SPECT	Tomografia por Emissão de Fóton Único
Sv	Sievert

RESUMO

O código MCNP é um código de transporte de partículas e é uma ferramenta completa, que vem sendo amplamente utilizada nos mais diversos trabalhos e pesquisas devido à sua versatilidade e capacidade de abranger vários parâmetros de simulações. Existe uma gama de aplicações do método, principalmente, na área de Física Médica, tanto na parte de tratamento quanto na diagnóstica. O presente trabalho tem como objetivo fazer uma revisão bibliográfica, através de buscas em bibliotecas virtuais e universitárias, de teses e dissertações que utilizam o código MCNP, e classificá-las de acordo com os países, as instituições, o tipo de código e a área de aplicação. Foram selecionadas publicações de vinte e sete (27) países diferentes, de cinco (5) continentes, sendo os Estados Unidos com números mais expressivos quantitativamente. No Brasil, a instituição com mais trabalhos que aplicaram o código MCNP é o IPEN. Em relação à área de aplicação, destacam-se reatores nucleares, com uma quantidade significativa de trabalhos, radioterapia, radiodiagnóstico, medicina nuclear e detectores, relacionados à dosimetria.

Palavras-chave: *MCNP, método Monte Carlo, Física Médica, Teses, Dissertações.*

ABSTRACT

The MCNP code is a particle transport code and is a complete tool, which has been widely used in the most diverse works and research due to its versatility and ability to cover various simulation parameters. There is a range of applications of the method, mainly in the area of Medical Physics, both in the treatment and diagnostic areas. The present work aims to carry out a bibliographical review, through searches in virtual and university libraries, of theses and dissertations that use the MCNP code, and classify them according to countries, institutions, type of code and area of application. Publications from twenty-seven (27) different countries were selected, from five (5) continents, with the United States having the most quantitatively significant numbers. In Brazil, the institution with the most work that applied the MCNP code is IPEN. Regarding the area of application, nuclear reactors stand out, with a significant amount of work, radiotherapy, radiodiagnosis, nuclear medicine and detectors, related to dosimetry.

Keywords: MCNP, Monte Carlo method, Medical Physics, Theses, Dissertations

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O método Monte Carlo é uma técnica que combina elementos estatísticos, uma amostragem aleatória, com a capacidade computacional na geração de números pseudoaleatórios e automatização de cálculos. A principal vantagem do método, quando comparado com métodos determinísticos, tem sido a habilidade de adequar-se de forma precisa a qualquer geometria complexa [1].

Na simulação de transporte de partículas são utilizados diversos tipos de códigos que usam o método Monte Carlo, os quais se pode destacar o MCNP [2], o PENELOPE [3], o EGSnrc [4], o ALGAM [5] e o GEANT [6].

O método Monte Carlo (MC) é uma ferramenta bastante eficaz para simular a interação de partículas radioativas com a matéria biológica. Como a capacidade do processamento computacional aumentou significativamente ao longo dos anos, o método em questão tem se tornado um auxílio potencial para a determinação de parâmetros clínicos no planejamento do tratamento em radioterapia e outras aplicações radiodiagnósticas [7].

Por meio do método MC é possível modelar diversos cenários de exposição computacional governados por fenômenos de natureza probabilística como, por exemplos em medicina [8]; cálculo de dose em radioterapia [9]; estudos de sistemas de imagem com radionuclídeos ou raios X [10]; caracterização de fontes de radiação [11] e detectores de radiação [12]; estudos específicos em mamografia e cálculo de radiação espalhada em salas de diagnóstico [13,14]; técnicas de otimização em radiologia convencional [14]. Essas técnicas tornaram-se as melhores alternativas disponíveis para resolver problemas relacionados ao transporte de radiação ionizante em projetos de reações nucleares [15] radioterapia para tratamento de câncer [16]; nos cálculos acoplados nêutrons-fótons para caracterizar a radiação ambiental em um reator nuclear [17], nos cálculos de criticalidade em sistemas multiplicativos [18], em cálculos de fluência em vasos de pressão, em cálculos de eficiência de detectores de radiação [19]; na simulação de sistemas biológicos (incluindo corpo humano) para aplicações em medicina nuclear [20].

O código MCNP, que significa Monte Carlo N-Particle, é um código de transporte de partículas desenvolvido no Laboratório Nacional de Los Alamos (LANL). O MCNP tem evoluído desde a sua introdução durante a Guerra Fria. O código é capaz de simular o transporte de nêutrons com energias de 0 a 20 MeV. Ao usar o código MCNP, o usuário

cria o que é conhecido como arquivo de entrada. Assim, um experimento simulado é criado em um arquivo de entrada apropriado e executado no código MCNP. O arquivo de entrada é uma coleção de “cartões” especificando informações sobre partes específicas do simulado [2].

As mais renomadas universidades e os mais modernos centros de pesquisas vêm utilizando, amplamente, o MCNP em seus trabalhos e pesquisas. Principalmente na área de física médica, que aplica o método em estudos que, na maioria das vezes, buscam otimizar as aplicações e minimizar os riscos das radiações ionizantes, considerando os princípios de proteção radiológica.

1.1 Objetivo

O objetivo do presente trabalho é reunir teses e dissertações que usam o código MCNP, utilizando bibliotecas universitárias, com os critérios de busca sendo os termos descritores “simulações” e “MCNP”, e classificá-las de maneira mais específica possível, como, por exemplo, universidade de origem dos trabalhos, país, código e tipo de aplicação, principalmente, na Física Médica. A fim de facilitar a busca e servir como referência a trabalhos futuros que busquem a aplicação de simulações computacionais da interação da radiação com a matéria.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 O método de Monte Carlo

O método de Monte Carlo (MMC) pode ser descrito como um método estatístico, no qual se utiliza uma sequência de números aleatórios para a realização de uma simulação. Em termos de transporte de radiação, o processo estocástico pode ser visto como uma família de partículas cujas coordenadas individuais mudam aleatoriamente em cada colisão. O comportamento médio dessas partículas é descrito em termos de grandezas macroscópicas, como fluxo ou densidade de partículas. O valor esperado dessas grandezas corresponde à solução determinística da equação de Boltzman (que rege o fenômeno de transporte de radiação). Grandezas específicas como energia depositada ou dose são derivadas destas grandezas. [21]

2.2 Código Computacional MCNP (Monte Carlo-N Particle)

O MCNP foi criado na década de 1970, nos Estados Unidos, sendo desenvolvido pelo laboratório Los Alamos National Laboratory. O código continua sendo aperfeiçoado constantemente, tornando-se assim, mais confiável e mais empregado. [22]

Ele pode ser utilizado para o transporte individual de nêutrons, fótons e elétrons ou no transporte acoplado de nêutrons, fótons e elétrons, incluindo a capacidade de calcular constantes de multiplicação para sistemas críticos. Nêutrons são simulados com energias entre $1E-11$ MeV e 100 MeV, fótons com energia entre 1 keV e 100 GeV e energias de elétrons entre 1 keV e 1 GeV. Este código permite modelar qualquer sistema geométrico tridimensional utilizando bibliotecas de seções de choque na forma pontual (energia contínua) sendo discreta ou em multigrupos. [23]

O arquivo de entrada do MCNP (*input*), permite ao usuário especificar: tipo de fonte, de detector, configuração geométrica e condições gerais do sistema desejado, como tamanho, forma, espectro de energia, composição da fonte de radiação bem como do meio em que a radiação irá interagir e definição da geometria do detector desejado. Os resultados da simulação de um problema no código MCNP correspondem à média de um grande número de variáveis, ordem de 10^6 , ou mais, dependendo somente da precisão

que se deseja obter na resposta do problema. Esses parâmetros que serão utilizados no problema devem ser definidos nos dados de entrada [21].

2.3 Versões atualizadas do código MCNP

A versão mais recente do código MCNP, versão 6.3.0, fornece à comunidade de transporte de partículas de Monte Carlo os mais recentes desenvolvimentos de recursos e correções de bugs no código. O MCNP versão 6.2 tem o mesmo ou melhor desempenho que o MCNP6.1.1, demonstrando 1,5 a 2 vezes mais rápido do que o MCNP6.1. Melhorias significativas foram feitas no tratamento de energia e seção transversal para cálculos de nêutrons e no tratamento eficiente da verificação para a infinidade de opções disponíveis no MCNP® [24].

O código MCNP-4B simula várias geometrias 3D usando volumes 3D chamados células; as células são definidas a partir de combinações de superfícies cujas formas gerais são predefinidas no código, mas cujas formas específicas são especificadas pelo usuário. O programa é capaz de simular interações de fótons, elétrons e nêutrons com a matéria por meio da geometria do problema e da composição dos materiais definidos pelo usuário. Várias distribuições de fontes de energia e configurações espaciais estão disponíveis, assim como diversas opções de contagem (pontuação), incluindo deposição de energia e fluxo de energia integrado no tempo (fluência) normalizado pelo número de partículas iniciais. [25]

O código MCNP4C pode ser utilizado para transporte de nêutrons, fótons, elétrons, transporte combinado de nêutrons e fótons. Outras características importantes que faz o MCNP4C muito versátil e prático para uso são comandos para geração do termo fonte, fontes para cálculo de criticalidade, fontes superficiais e fontes inseridas em células volumétricas, recursos para visualização da geometria de irradiação e arquivos de saída, uma vasta coleção de técnicas de redução de variância, coleção de bibliotecas de seção de choque e uma estrutura flexível para cálculo das grandezas de interesse. Embora muito amplo, o MCNP4C é limitado para problemas com geometrias que contenham um grande número de células [23].

O código MCNP5 é uma versão reescrita do MCNP4C, incluindo ajustes na física de transporte de fótons, novas técnicas de redução de variância, diferentes opções de termos fonte e aperfeiçoamento no suporte para utilização do código em paralela, considerando, entretanto, as principais características da versão MCNP4C [26].

O código MCNPX é uma combinação do código MCNP4C com o código de transporte e interação de nucleons, pions, muons, íons leves e anti-nucleons em geometrias complexas. Ele contém todas as capacidades do MCNP4C e do MCNP5, incluindo a capacidade de transportar 34 novos tipos de partículas. O MCNPX pode simular o transporte de fótons, elétrons, nêutrons, prótons e partículas carregadas na matéria para amplas faixas de energias [27].

2.4 Grandes áreas da Física Médica

A Física Médica é o ramo da Física que compreende a aplicação dos conceitos, leis, modelos, agentes e métodos da Física para a prevenção, diagnóstico e tratamento de doenças, desempenhando uma importante função na assistência médica, na pesquisa biomédica e na otimização da proteção radiológica [28]

Tal ramo pode ser dividido em três grandes áreas: a Radioterapia, o Radiodiagnóstico e a Medicina Nuclear, cada uma delas com diferentes atribuições, mas todas com conceitos interligados.

2.5 Radioterapia

A radioterapia é um tratamento no qual se utiliza radiação ionizante, ou seja, uma radiação capaz de ionizar átomos, para aniquilar ou impedir o crescimento de células tumorais. Dependendo da distância entre a fonte de radiação e o volume alvo, isso é o tecido a ser tratado, a radioterapia pode ser dividida em duas categorias: a teleterapia, em que a fonte de radiação fica a uma certa distância do paciente; e a braquiterapia, em que a fonte é inserida diretamente no tecido afetado. [29]

A teleterapia é realizada com equipamentos chamados de aceleradores lineares. O acelerador linear é um dispositivo que utiliza ondas eletromagnéticas de alta frequência para acelerar partículas carregadas, como elétrons, a altas energias através de um tubo linear. O próprio feixe de elétrons de alta energia pode ser usado para tratar tumores superficiais ou pode ser feito para atingir um alvo para produzir raios X para tratar tumores profundos [30].

A braquiterapia é um método de tratamento no qual fontes radioativas seladas são usadas para fornecer radiação a uma curta distância por aplicação intersticial, intracavitária ou superficial. Com este modo de terapia, uma dose elevada de radiação pode ser administrada localmente ao tumor, com queda rápida da dose no tecido normal

circundante. No passado, a braquiterapia era realizada principalmente com fontes de rádio ou radônio. Atualmente, o uso de radionuclídeos produzidos artificialmente, como ^{137}Cs , ^{192}Ir , ^{198}Au , ^{125}I e ^{103}Pd , é mais comum. [30]

2.6 Radiodiagnóstico

O radiodiagnóstico é a área da Física Médica responsável pelas técnicas para diagnóstico, como ressonância magnética, ultrassonografia, tomografia computadorizada, entre outros. Além disso, também cabe ao físico da área a radioproteção.

Imagens médicas do corpo humano requerem alguma forma de energia. Nas técnicas de imagem médica utilizadas em radiologia, a energia utilizada para produzir a imagem deve ser capaz de penetrar nos tecidos. Na radiologia diagnóstica, o espectro eletromagnético fora da região da luz visível é utilizado para imagens médicas, incluindo raios X em mamografia e tomografia computadorizada; radiofrequência em imagens de ressonância magnética e raios gama em medicina nuclear. A energia mecânica, na forma de ondas sonoras de alta frequência, é usada em imagens de ultrassom [31].

2.7 Medicina Nuclear

A medicina nuclear é um ramo específico da medicina que utiliza substâncias radioativas para terapia e imagem. A imagem em medicina nuclear refere-se à técnica de utilização de radionuclídeos para estudar a funcionalidade do processo biológico a nível celular e subcelular, sendo também considerada parte da imagem molecular. A ideia fundamental da imagem em medicina nuclear é marcar uma substância biológica com um isótopo radioativo, um radiofármaco. Quando os radioisótopos usados em imagens médicas decaem, os fótons são emitidos como resultado direto ou indireto do decaimento. O radiofármaco é introduzido em um sistema biológico onde a cinética do radiofármaco pode ser estudada usando uma modalidade de imagem de medicina nuclear como PET, câmara de cintilação e SPECT para obter imagens dos fótons emitidos [29].

2.8 Grandezas Dosimétricas

Para estabelecer os princípios e os sistemas de proteção radiológica, são necessárias grandezas dosimétricas para quantificar tanto a exposição externa como a exposição interna de seres humanos à radiação. A exposição externa ocorre com fontes emissoras de radiação fora do corpo e a interna, com radionuclídeos dentro do corpo, que nele adentraram via inalação, ingestão ou injeção. Os campos de radiação externos podem ser descritos por grandezas físicas, mas os campos internos dependem de parâmetros biocinéticos, anatômicos e fisiológicos do corpo humano e são extremamente difíceis de estimar [32].

As grandezas dosimétricas, ou as grandezas de física das radiações podem ser classificadas em três categorias: grandezas físicas, grandezas de proteção e grandezas operacionais.

2.8.1 Grandezas Físicas

2.8.1.1 Exposição

A exposição, expressa por X , é uma grandeza definida apenas para fótons (raios -x e gama) interagindo no ar. Ela dá uma medida da capacidade de fótons ionizarem o ar. Basicamente, ela caracteriza um feixe de raios -x ou gama e mede a quantidade de carga elétrica de mesmo sinal produzida no ar, por unidade de massa do ar. Essa carga elétrica resulta das ionizações efetuadas por partículas carregadas, como o elétron emitido nos efeitos fotoelétrico e Compton, e ambos, elétron e pósitron, emitidos em processo de produção de pares [32]. A definição de exposição é definida na Equação 1:

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (\text{Equação 1})$$

onde dQ é o valor absoluto da carga total de íons de mesmo sinal, produzidos no ar, quando todos os elétrons e pósitrons liberados ou criados por fótons, num elemento de volume de ar cuja massa é dm , forem freados no ar [32].

2.8.1.2 Kerma

O kerma (K) é uma grandeza válida somente para a radiação indiretamente ionizante (gama, raios-x e nêutrons) e para qualquer meio, e pode ser definida como a

soma de todas as energias cinéticas iniciais dos elétrons liberados pelos fótons em um volume de massa dm [32]. Sua definição é dada pela Equação 2:

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad (\text{Equação 2})$$

onde dE_{tr} é a energia transferida ao meio e dm o volume de massa. A energia de fótons, por exemplo, é cedida à matéria primeiramente ao elétron, nos efeitos fotoelétrico e Compton, e ao elétron e pósitron, na produção de pares. Em seguida, a partícula carregada transfere energia à matéria por meio de aquecimento, excitações e ionizações [32].

2.8.1.3 Dose Absorvida

A grandeza física mais importante em radiobiologia, radiologia e proteção radiológica é a dose absorvida D , que se relaciona com a energia da radiação absorvida [32]. Ela é definida pela Equação 3:

$$D = \frac{dE_{ab}}{dm} \quad (\text{Equação 3})$$

onde dE_{ab} é a energia média depositada pela radiação em um volume elementar de massa dm [32]. Essa grandeza vale para qualquer meio, para qualquer tipo de radiação e qualquer geometria de irradiação. Ela foi definida para suprir as limitações da grandeza exposição.

2.9.1 Grandezas de Proteção

Nas grandezas de proteção estão incluídas a dose equivalente no tecido ou no órgão H_T e a dose efetiva E , que são usadas nas recomendações para limitar a dose no tecido ou órgão, no primeiro caso, e no corpo todo, no segundo caso. Essas grandezas não são práticas, por não serem mensuráveis, mas podem ser avaliadas por meio de cálculo se as condições de irradiação forem conhecidas. Os fatores de ponderação da radiação e de tecido para essas grandezas são, respectivamente, o w_R e o w_T . A unidade de dose equivalente e dose efetiva é o Sievert [32].

2.9.1.1 Dose equivalente no tecido ou no órgão H_T

A dose equivalente no tecido ou no órgão (H_T) (Equação 4) é definida para qualquer tipo de radiação, e o meio é o tecido ou órgão. É obtida a partir da dose absorvida média $D_{T,R}$ no tecido ou órgão T multiplicando pelo o fator de ponderação da radiação (w_R), exposto à radiação do tipo R.

$$H_T = \sum_R w_R \times D_{T,R} \quad (\text{Equação 4})$$

A dose equivalente é usada para limitar a exposição do cristalino, da pele, das mãos e dos pés, e também para o cálculo da dose efetiva [32]. Os valores de w_R para alguns tipos de radiação estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Fatores de ponderação da radiação (w_R) segundo a ICPR-103.

Tipo de Radiação	Fator de Ponderação de radiação, w_R
Fótons	1
Elétrons e múons	1
Prótons e píons pesados	2
Partículas alfa, fragmentos de fissão, íons pesados	20
Nêutrons	Função contínua da energia do nêutron

2.9.1.2 Dose efetiva

A grandeza de proteção dose efetiva E (Equação 5) serve para estabelecer limites de exposição do corpo todo à radiação, a fim de efeitos cancerígenos e hereditários. É a soma de doses equivalentes nos tecidos ou órgãos H_T multiplicada pelo fator de ponderação de tecido ou órgão w_T , e sua unidade é o sievert [32].

$$E = \sum_T w_T \times H_T \quad (\text{Equação 5})$$

Os fatores de ponderação de tecido ou órgão w_T , apresentados na Tabela 2, são relacionados com a sensibilidade de um dado tecido ou órgão à radiação, no que concerne à indução de câncer e a efeitos hereditários [32]

Tabela 2: Fator de ponderação do tecido (w_T) segundo a ICRP 103 (ICRP, 2007).

Órgão; tecido	w_T	$\sum W_T$
Medula óssea, cólon, pulmão, estômago, mama, tecidos restantes**	0,12*	0,72
Gônadas	0,08	0,08
Bexiga, esôfago, fígado, tireóide	0,04	0,16
Superfície óssea, cérebro, glândulas salivares, pele	0,01	0,04
Total		1

*Cada; ** Tecidos restantes: glândula adrenal, região extratorácica, vesícula biliar, coração, rins, mucosa oral, nódulos linfáticos, músculo, pâncreas, próstata, intestino delgado, baço, timo, útero; cérvix.

2.10.1 Grandezas operacionais

Existem as recomendações internacionais e nacionais de limitação de dose de radiação, e as pessoas ocupacionalmente expostas devem obedecer a essa limitação. As grandezas utilizadas na limitação, porém, não são mensuráveis. Para correlacioná-las com o campo de radiação, foram introduzidas as grandezas operacionais para medidas de exposição à radiação externa [32].

As duas principais grandezas introduzidas são o equivalente de dose pessoal, $H_p(d)$, e o equivalente de dose ambiente $H^*(d)$, à profundidade d , para os casos de irradiação com fontes externas ao corpo [32].

2.10.1.1 Equivalente de dose pessoal

O equivalente de dose pessoal $H_p(d)$ é uma grandeza operacional para monitoração individual externa (radiação que incide num indivíduo de fora para dentro do corpo). A grandeza é obtida pelo produto da dose absorvida em um ponto, na profundidade d do corpo humano, pelo fator de qualidade Q da radiação nesse ponto. O valor $H_p(d)$ é obtido por meio do monitor individual que o indivíduo ocupacionalmente exposto (IOE) utiliza no local do corpo representativo à exposição que, geralmente é no nível do tórax. Na rotina, a dose é acumulada durante um mês para posterior processamento do dosímetro [32].

2.10.1.2 Equivalente de dose ambiente

Para monitoração de área em ambientes de trabalho, usa-se o equivalente de dose ambiente. A grandeza $H^*(d)$ pode ser obtida pelo produto da dose absorvida em um ponto

pelo fator de qualidade Q da radiação e corresponde ao que seria produzido em uma esfera de tecido equivalente de 30 cm de diâmetro, na profundidade d [32].

2.11.1 Grandezas mais utilizadas nas grandes áreas

2.11.1.1 Radioterapia

Na teleterapia enquadram-se os feixes de raios X, gama, elétrons de alta energia e nêutrons, estando a fonte a muitos centímetros da região a ser tratada. E na braquiterapia temos as formas de radioterapia, externa ou internamente ao paciente, onde a fonte está bem próxima, em contato ou mesmo implantada no tecido a ser tratado [33].

Para medir exposição diretamente, utiliza-se um dispositivo que seja capaz de coletar cargas de um único sinal produzidas por elétrons secundários criados em um volume de ar de massa conhecida. O instrumento que satisfaz estas necessidades, ou seja, que pode medir a exposição à radiação de acordo com a sua definição, é a chamada câmara de ionização padrão. [33]

2.11.1.2 Radiodiagnóstico

Na área de radiodiagnóstico, a grandeza fundamental na qual os padrões nacionais são calibrados é o kerma no ar. A partir do kerma no ar podem-se determinar todas as demais grandezas de uso prático.

As medições de radiação, nesta área, são fundamentais para os programas de controle de qualidade dos equipamentos de raios-X e para medir ou estimar doses a que estão submetidos os pacientes, ou seja, na dosimetria do paciente. Para o controle de qualidade, a grandeza kerma no ar é suficiente, tanto na caracterização e controle da fonte (campo de radiação incidente no paciente) quanto para a avaliação do desempenho do sistema de captação e registro da imagem (campo de radiação pós-paciente) [34].

2.11.1.3 Reator Nuclear

Um reator nuclear é uma instalação capaz de converter energia nuclear em energia térmica. Os reatores têm a capacidade de iniciar, controlar e manter as reações nucleares

em cadeia que ocorrem no núcleo desta instalação, denominado fissão nuclear controlada [35].

As reações de fissão nuclear subjacentes aos reatores de potência – isto é, reatores construídos para produzir energia eléctrica, propulsão de navios ou outras formas de utilização de energia – convertem quantidades mensuráveis de massa em energia [36].

O conhecimento das taxas de reação nuclear no combustível de um reator é um problema fundamental na área de Física de Reatores. De seu conhecimento pode-se obter informações extremamente importantes sobre a operação e segurança de um reator nuclear [37]. Nesse contexto, o código de Monte Carlo MCNP tem sido bastante usado para fazer cálculos de fluxo neutrônico, criticalidade e queima no combustível nuclear [38].

Os reatores nucleares também são utilizados para a produção de radioisótopos utilizados na medicina nuclear, pesquisas e aplicações industriais.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

A pesquisa bibliográfica foi feita baseada em um levantamento feito em bibliotecas de universidades públicas e privadas, em institutos de pesquisas espalhados pelo mundo. Essa revisão buscou ser bastante completa, atualizada e classificada em diferentes parâmetros. Informações detalhadas, temporal e espacialmente abrangentes, para sustentar o nível suficiente de uma documentação de consulta.

A coleta de dados foi feita buscando teses e dissertações que utilizaram algum código MCNP com aplicação em áreas da física. As bibliotecas eletrônicas universitárias foram a maior fonte, usando os termos descritores de interesse, como simulações e código MCNP. A palavra-chave utilizada foi “MCNP”, e de acordo com as aplicações, os trabalhos foram selecionados. Alguns sites de universidades têm acesso limitado, por questões de domínio, e não puderam ser listados.

Um aspecto importante de seleção foi a tradução de alguns trabalhos, com idiomas muito distantes do português, não sendo possível sua compreensão e escolha.

Os trabalhos obtidos datam desde o ano de 1980 até o ano de 2022. As publicações tiveram um aumento significativo, de acordo com a evolução do código.

Após apuração dos trabalhos, estes foram classificados conforme os seguintes critérios:

- a) Países;
- b) Instituições;
- c) Tipo e versão do código MCNP aplicado;
- d) Aplicação na área física.

Tendo feito a classificação, atrelada a uma leitura exploratória, ou seja, uma leitura mais aprofundada de temas mais relacionados à Física Médica, os dados foram agrupados em tabelas e os gráficos foram plotados.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados classificados por países

O levantamento realizado conta com trabalhos de vinte e sete países, sendo distribuídos por cinco continentes, América, Europa, África, Ásia e Oceania. Na Tabela 1, pode-se verificar os países que publicaram trabalhos que utilizam o código MNCP e sua respectiva quantificação.

Tabela 3: Número de publicações que utilizam o código MCNP por país em ordem alfabética.

País	Publicações
África do Sul	12
Alemanha	7
Austrália	4
Áustria	1
Bélgica	2
Brasil	61
Canadá	41
Colômbia	1
Dinamarca	1
Escócia	1
Eslovênia	1
Espanha	7
Estados Unidos	1407
Finlândia	1
França	14
Gana	3
Grécia	7
Holanda	2
Índia	1
Inglaterra	12
Itália	2
Japão	2
Portugal	1
República Tcheca	7
Sérvia	1
Suécia	10
Suíça	3
Total	1612

Para facilitar a visualização do leitor, os dados da Tabela 1 foram distribuídos na Figura 1, representados por um infográfico.

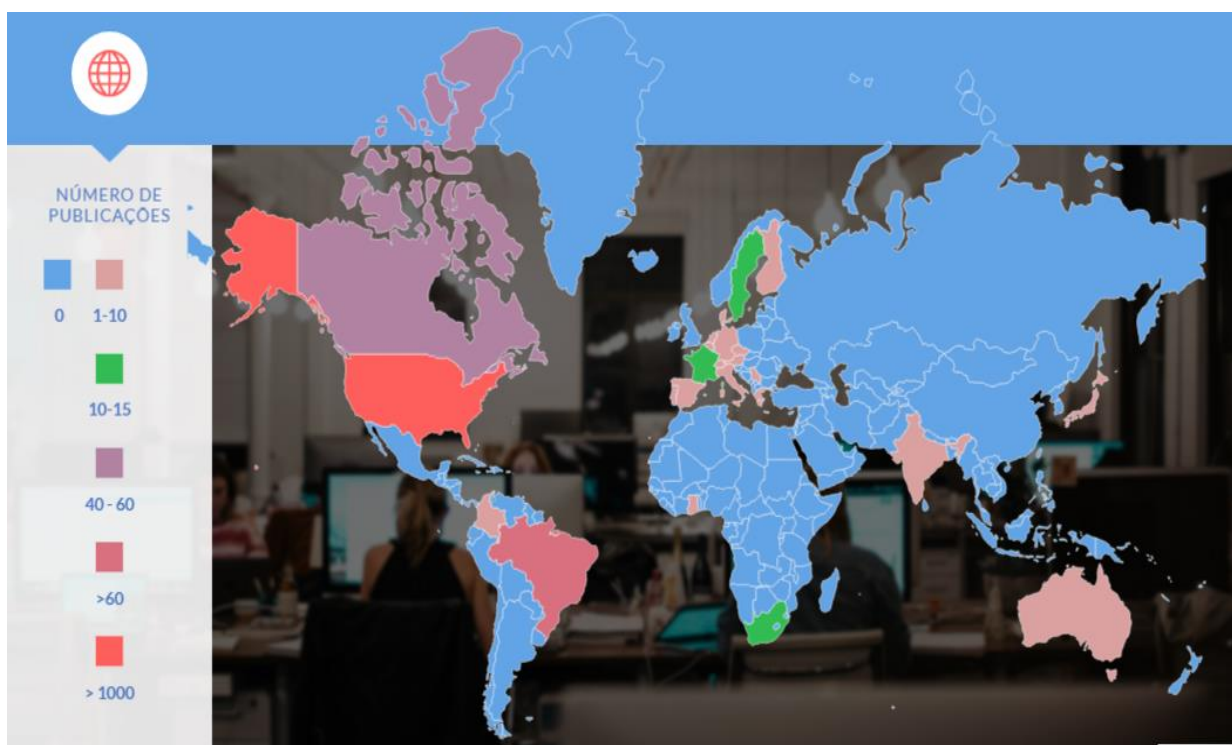


Figura 1: Infográfico da distribuição de publicações que utilizam o código MCNP por países.

Como mostrado na Figura 1, do total de 27 países avaliados, pode-se perceber que os Estados Unidos lideram as estatísticas, com mil quatrocentos e sete (1407) trabalhos, entre teses e dissertações. Sendo seguido pelo Brasil, com sessenta e um (61) trabalhos e o Canadá, com quarenta e uma (41) publicações.

Entre os países da Europa, os que mais tiveram publicações foram a França, com quatorze (14), a Inglaterra, com doze (12) e a Suécia com dez (10).

Os representantes do continente africano, são a África do Sul, que publicou doze (12) trabalhos e Gana, três (3).

Já a Ásia conta com duas (2) publicações do Japão e uma (1) da Índia. E a Austrália é a representante da Oceania com quatro (4).

4.2 Resultados classificados por universidades

As teses e dissertações reunidas são de cento e cinquenta e seis instituições localizadas nos países localizadas nos 27 países avaliados. Os principais resultados estão apresentados na Tabela 2, assim como o número de publicações de cada:

Tabela 4: Instituições com seu número de publicações que utilizam o código MCNP.

INSTITUIÇÃO	PAÍS	TESES	DISSERTAÇÕES	TOTAL
Air Force Institute of Technology	Estados Unidos	30	7	37
Aix-Marseille Université	França	0	1	1
Anna University	Índia	0	1	1
Aristotle University of Thessaloniki	Grécia	0	1	1
Arizona State University	Estados Unidos	0	8	8
Atlanta University	Estados Unidos	1	0	1
Brigham Young University	Estados Unidos	1	1	2
Brno University of Technology	República Tcheca	7	0	7
Carleton University	Estados Unidos	1	0	1
Case Western Reserve University	Estados Unidos	0	3	3
Chalmers University of Technology	Suécia	4	0	4
Clemson University	Estados Unidos	1	2	3
Collège militaire royal du Canada	Canadá	2	4	4
Colorado School of Mines	Estados Unidos	4	3	7
Columbia University	Estados Unidos	0	2	2
Danmarks Tekniske Universitet	Dinamarca	0	1	1
Duke University	Estados Unidos	0	1	1
Durham University	Inglaterra	0	1	1
East Carolina University	Estados Unidos	0	1	1
École des Mines de Nantes	França	0	1	1
École doctorale de Physique	França	0	2	2
École polytechnique fédérale de Lausanne	França	0	1	1
Eidgenössische Technische Hochschule	Suíça	1	0	1
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales	Espanha	2	1	3
Georgia Institute of Technology	Estados Unidos	59	49	108
Graduate University for Advanced Studies	Japão	0	1	1
Helsinki University of Technology	Finlândia	0	1	1
Idaho State University	Estados Unidos	2	3	5
Illinois Institute of Technology	Estados Unidos	0	1	1
Imperial College of Science, Technology and Medicine	Inglaterra	0	1	1
Indiana University	Estados Unidos	0	7	7
Instituto de Engenharia Nuclear	Brasil	6	2	8
Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro	Brasil	2	1	3

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares	Brasil	24	11	35
Instituto Tecnológico de Aeronáutica	Brasil	1	0	1
Iowa State University	Estados Unidos	0	1	1
Kansas State University	Estados Unidos	17	20	37
Karlsruher Institut für Technologie	Alemanha	1	1	1
Kungliga Tekniska Högskolan	Suécia	2	0	2
Lancaster University	Inglaterra	0	4	4
Louisiana State University	Estados Unidos	1	0	1
Massachusetts Institute of Technology	Estados Unidos	92	74	166
McGill University	Canadá	1	1	2
McMaster University	Canadá	7	4	11
Michigan State University	Estados Unidos	0	2	2
Mid Sweden University	Suécia	2	0	2
Mississippi State University	Estados Unidos	1	0	1
Missouri University of Science and Technology	Estados Unidos	31	19	50
Montana State University	Estados Unidos	0	1	1
Nagoya University	Japão	0	1	1
National and Kapodistrian University of Athens	Grécia	0	2	2
National Technical University of Athens	Grécia	0	1	1
Naval Postgraduate School	Estados Unidos	4	0	4
Normandie Université	França	0	1	1
North Carolina State University	Estados Unidos	9	24	33
Northern Illinois University	Estados Unidos	0	1	1
Northwestern University	Estados Unidos	0	1	1
Ohio State University	Estados Unidos	15	28	43
Ohio University		2	1	3
Oklahoma State University	Estados Unidos	0	1	1
Old Dominion University	Estados Unidos	0	1	1
Oregon State University	Estados Unidos	74	31	105
Oxford University	Inglaterra	0	1	1
Pennsylvania State University	Estados Unidos	3	10	13
Portland State University	Estados Unidos	1	0	1
Princeton University	Estados Unidos	0	3	3
Purdue University	Estados Unidos	8	20	28
Rensselaer Polytechnic Institute	Estados Unidos	2	8	10
Royal Melbourne Institute of Technology	Austrália	0	1	1
San Jose State University	Estados Unidos	1	0	1
Stellenbosch University	África do Sul	1	0	1
Technische Universität Clausthal	Alemanha	0	1	1
Technische Universität Darmstadt	Alemanha	0	1	1
Technische Universität Dresden	Alemanha	0	2	2
Texas A&M University	Estados Unidos	107	56	163
Universidad Nacional De Colombia	Colômbia	1	0	1

Universidade de Lisboa	Portugal	1	0	1
Universidade de São Paulo	Brasil	0	1	1
Universidade do Estado do Rio de Janeiro	Brasil	1	0	1
Universidade Federal de Minas Gerais	Brasil	3	8	11
Università di Bologna	Itália	0	2	2
Universität Basel	Suíça	0	1	1
Universitat Politècnica de Catalunya	Espanha	0	1	1
Universitat Politècnica de València	Espanha	0	3	3
Universität Stuttgart	Alemanha	0	2	2
Universität Wien	Áustria	1	0	1
Université catholique de Louvain	Bélgica	0	1	1
Université de Montréal	Canadá	2	0	2
Université de Strasbourg	França	0	1	1
Université Grenoble Alpes	França	0	6	6
Université libre de Bruxelles	Bélgica	0	1	1
Université Paris Sud	França	0	1	1
Université Paris-Saclay	França	0	1	1
University of Alabama	Estados Unidos	1	0	1
University of Arizona	Estados Unidos	4	5	9
University of California	Estados Unidos	2	52	54
University of Chicago	Estados Unidos	0	7	7
University of Cincinnati	Estados Unidos	2	13	15
University of Crete	Grécia	0	1	1
University of Florida	Estados Unidos	18	20	38
University of Ghana	Gana	1	2	3
University of Glasgow	Inglaterra	0	1	1
University of Hawai'i	Estados Unidos	0	1	1
University of Idaho	Estados Unidos	4	1	5
University of Illinois	Estados Unidos	11	7	18
University of Ioannina	Grécia	0	2	2
University of Iowa	Estados Unidos	0	1	1
University of Johannesburg	África do Sul	1	0	1
University of Kansas	Estados Unidos	0	1	1
University of Kentucky	Estados Unidos	0	2	2
University of Leicester	Inglaterra	0	1	1
University of Liverpool	Inglaterra	0	1	1
University of Manchester	Inglaterra	1	0	1
University of Maryland	Estados Unidos	0	3	3
University of Massachusetts	Estados Unidos	2	1	3
University of Michigan	Estados Unidos	0	52	52
University of Minnesota	Estados Unidos	0	1	1
University of Missouri	Estados Unidos	5	17	22
University of Nevada	Estados Unidos	9	9	18
University of New Hampshire	Estados Unidos	0	1	1
University of New Mexico	Estados Unidos	21	14	35

University of North Carolina	Estados Unidos	1	1	2
University of Notre Dame	Estados Unidos	0	2	2
University of Ontario Institute of Technology	Canadá	15	1	16
University of Pennsylvania	Estados Unidos	0	2	2
University of Rochester	Estados Unidos	0	1	1
University of South Carolina	Estados Unidos	2	1	3
University of Surrey	Inglaterra	0	2	2
University of Tennessee	Estados Unidos	21	43	64
University of Texas	Estados Unidos	32	50	82
University of the Western Cape	África do Sul	1	0	1
University of Toledo	Estados Unidos	9	9	18
University of Toronto	Canadá	1	4	5
University of Utah	Estados Unidos	6	6	12
University of Virginia	Estados Unidos	0	1	1
University of Wisconsin	Estados Unidos	1	22	23
University of Wollongong	Austrália	1	2	3
Univerza v Mariboru	Eslovênia	0	1	1
Univerzitet u Novom Sadu	Sérvia	0	1	1
Uppsala Universitet	Suécia	2	0	2
Vanderbilt University	Estados Unidos	1	1	2
Virginia Commonwealth University	Estados Unidos	4	3	7
Virginia Polytechnic Institute and State University	Estados Unidos	5	9	14
Wake Forest University	Estados Unidos	0	1	1
Washington State University	Estados Unidos	0	1	1
Washington University	Estados Unidos	0	2	2
Wayne State University	Estados Unidos	0	2	2
Worcester Polytechnic Institute	Estados Unidos	2	3	5
Youngstown State University	Estados Unidos	1	0	1
Total		753	862	1612

A instituição com o maior número de publicações é o Massachusetts Institute Of Technology ou MIT (Instituto de Tecnologia de Massachusetts), localizado nos Estados Unidos, que detém a maior quantidade de universidades e, conseqüentemente, mais publicações, com cento e sessenta e seis (166). No Brasil, o maior representante de trabalhos que aplicaram o código MCNP é o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, o IPEN, com trinta e cinco (35) teses e dissertações.

4.3 Resultados classificados por versão de código utilizado

Os códigos utilizados nos trabalhos podem ser relacionados com o passar dos anos, à medida que suas versões foram atualizadas e também com as aplicações.

A primeira publicação encontrada que utilizou o MCNP foi em 1980, quando o código era o MCNP versão 2A. Já o mais recente aplicado, é o MCNP6.2. Apesar de já existir a versão 6.3.0, a busca dos trabalhos foi até o ano de 2022, quando a versão mais recente era a 6.2.

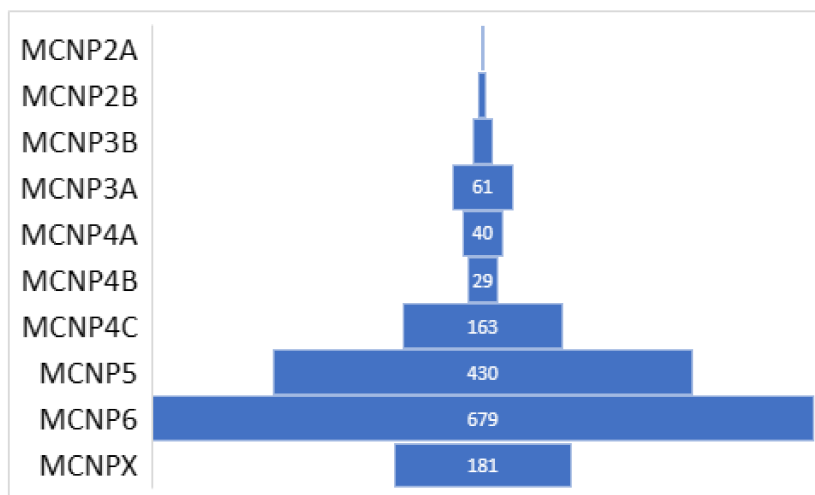


Figura 2: Códigos utilizados e sua quantificação.

O código MCNP2A foi utilizado em dois trabalhos dos anos de 1980 e 1981. De 1983 a 1989, as publicações que aplicaram o MCNP, usaram a versão 2B.

De 1990 a 1986, a versão mais utilizada foi a MCNP3A. Dos anos 2000 em diante, os códigos variam bastante, principalmente de acordo com a aplicação. Como por exemplo, nos estudos de reatores nucleares de água leve, o código MCNP4C era mais utilizado para altas energias e o MCNPX, para baixas energias.

A radioterapia é uma aplicação em que a maioria dos seus estudos em questão utiliza os códigos MCNP4C, MCNP5 e MCNP6.

4.4 Resultados classificados por aplicação

Analisando todos os mil seiscentos e doze (1612) trabalhos, eles também foram classificados de acordo com a sua aplicação, visando, principalmente, as áreas de física já citadas.

A Figura 3 mostra a distribuição mundial das publicações por área de aplicação em que foi utilizado o código MCNP como principal ferramenta de pesquisa.



Figura 3: Distribuição das dissertações e teses por área que utilizaram o código MCNP.

Dos mil seiscentos e doze trabalhos, cerca de 44,42% utilizaram o código MCNP para estudos sobre reator nuclear, sendo desde reações nucleares envolvendo núcleos pesados e prótons até o desenvolvimento de uma nova metodologia para a medida da reatividade. Também há uma grande quantidade de trabalhos sobre composição, temperatura e efeitos das barras e varetas que compõem um reator.

Já na área de detectores e dosimetria, estão agrupados os trabalhos que desenvolveram algum tipo de detector, entre eles, cintiladores e dosímetros individuais, e câmaras de ionização; ou testam a eficiência detectores que já são amplamente utilizados, bem como os elementos que os constituem. Além disso, uma gama de trabalhos, a maioria dos Estados Unidos, apresentaram leituras de radiação cósmica e terrestre. Nessa categoria, estão 33,31% das publicações analisadas.

O radiodiagnóstico concentra teses e dissertações que fizeram algum tipo de estudo dos equipamentos utilizados nos exames da área, como tomografia computadorizada e mamografia, bem como medidas de proteção radiológica que visam o bem-estar nos indivíduos ocupacionalmente expostos e dos pacientes. Foram encontrados 8,56% que usaram o código MCNP neste âmbito.

A radioterapia concentra 7,32% das análises, sendo o Brasil com números mais expressivos nessa área. Síntese, caracterização e dosimetria de sementes radioativas

aplicadas na braquiterapia e modelagem de um sistema de planejamento em radioterapia utilizando o código MCNP são alguns exemplos dos estudos desenvolvidos nessa área. Dos quatro trabalhos publicados na Austrália, três são sobre a radioterapia, sendo o país o segundo representante da categoria.

A medicina nuclear representa 6,39% dos números, sendo dominante nas publicações, apenas na Colômbia, apesar dos Estados Unidos publicarem oitenta e três trabalhos sobre o assunto, incluindo diversos sobre a produção de radionuclídeos e moléculas traçadoras utilizados nas técnicas, como PET-CT.

CONCLUSÕES

Este trabalho objetivava uma revisão bibliográfica de teses e dissertações que utilizaram o código MCNP e uma classificação mais completa possível. Com a busca das publicações e todo o levantamento de dados feito, pode-se concluir que o MCNP é aplicado em todos os continentes do mundo, confirmando a popularidade e credibilidade que possui, sendo a América o que mais faz uso da ferramenta. A instituição que detém o maior número de publicações é o Massachusetts Institute of Technology-MIT, e a representante do Brasil é o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares-IPEN.

Os códigos utilizados nas publicações desde 1980 foram o MCNP2A, MCNP2B, MCNP3A, MCNP3B, MCNP4A, MCNP4B, MCNP4C, MCNPX, MCNP5 e MCNP6, sendo os dois últimos em maior número.

Já quanto as aplicações, os reatores nucleares possuem uma vasta quantidade de pesquisas que aplicaram o código em algum aspecto de seu funcionamento e suas instalações. Em quinze países dos vinte e sete em questão, tiveram essa aplicação na área de estudo.

Todos os trabalhos são de extrema relevância para as áreas de medicina, radioterapia, radiodiagnóstico, medicina nuclear, dosimetria, proteção radiológica e todos os aspectos envolvidos.

REFERÊNCIAS

- [1] W. Nelson e H. Hirayama, “EGS4 Code System,” Califórnia, 1985.
- [2] Los Alamos National Laboratory, 2023. [Online]. Available: <https://mcnp.lanl.gov/>.
- [3] J. Baro, J. Sempau e F. Salvat, “PENELOPE: an algorithm for Monte Carlo simulation of the penetration and energy loss of electrons and positrons in matter,” *Nucl Instrum Method*, pp. 31-46, 1995.
- [4] W. Nelson, H. Hirayama e D. Rogers, “EGS4 code system,” Califórnia, 1985.
- [5] J. Ryman, W. G. e K. Eckerman, “ALGAM A Monte Carlo radiation transport code for calculating specific absorbed fractions of energu from internal or external proton sources,” 1987.
- [6] Agostinelli, “GEANT4-a simulation toolkit,” *Nucl Instrum Method*, pp. 250-303, 2003.
- [7] Salvat, *PENELOPE 2008: A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport*, Barcelona, 2011.
- [8] R. Dranga, “An MCNP Feasibility Study for a Switchable Radioactive Gamma Source for SPECT Gamma Camera Calibration or Blood Irradiation,” Ottawa, 2016.
- [9] A. Mazer, “Dosimetric Studies using a 3D System for Quality Assurance In Radiation Therapy,” Cambridge, 2019.
- [10] D. A. Montgomery, “An Integrative Approach Concerning Radiological Protection of the Environment: Plant Influence on Biogeochemistry and Transport, Plant Uptake, and Non-Human Biota Dosimetry for Select Radionuclides,” Clemson, 2020.
- [11] C. W. Freitas, “Estudo Da Fonte De Co60 Simulada Em MCNP Aplicado à Braquiterapia,” Rio de Janeiro, 2020.
- [12] C. Navye, “Study of LaBr3 (Ce) Detector Response to High Energy Helium Ions,” Oshawa, 2022.
- [13] L. Azevedo, “Análise da radiação espalhada durante exames de raio-X em leitos de suporte ventilatório pulmonar durante a pandemia de SARS-COV-2,” Uberlândia, 2020.
- [14] K. J. Silverstrim, “Image Optimization in Digital Dental Radiography,” Austin, 2014.

- [15] P. F. T. Matuoka, “Study of Nuclear Reactions Involving Heavy Nuclei and Intermediate and High-energy Protons and an Application in Nuclear Reactor Physics (ADS),” São Paulo, 2016.
- [16] P. L. Dreyer, “Implantable Depots for Interstitial Delivery of Radiolabeled Gold Nanoparticles Using a Brachytherapy Technique,” Toronto, 2019.
- [17] E. Gonnelli, “Neutron Lifetimes and Return Fraction Experimental Determination and Analyses in Several Configurations of the IPEN/MB-01 Nuclear Reactor and Its Impact in the Determination of the Reactivity of the System,” São Paulo, 2017.
- [18] R. S. Raju, “Beyond the Solid Core Nuclear Thermal Rocket: A Computational Investigation into Criticality and Neutronics Performance of Advanced Liquid and Gas Core Reactor Approaches for Next Generation Performance,” Ann Arbor, 2022.
- [19] M. E. Bedir, “Design, Development and Characterization of a Hand-Held Radiation Detector for Radio-Guided Surgery,” 2020.
- [20] M. N. Cyr, “Detection of Gadolinium in Liver and Kidney Phantoms Using X-Ray Fluorescence,” Hamilton, 2020.
- [21] H. Yoriyaz, “Método de Monte Carlo: princípios e aplicações em Física Médica,” *Revista Brasileira de Física Médica*, pp. 141-149, 2009.
- [22] J. V. M. S. F. L. Oliveira, “Monte Carlo Simulation of a Medical Linear Accelerator for Generation of Phase Spaces,” em *International Nuclear Atlantic Conference*, Recife, 2013.
- [23] F. A. Lopes, “Cálculo dos Coeficientes de conversão para dose efetiva para prótons utilizando simulador antropomórfico matemático,” Rio de Janeiro, 2008.
- [24] Los Alamos National Security, “MCNP® USER’S MANUAL Code Version 6.2,” Novo México, 2018.
- [25] H. Yoriyaz, “Monte Carlo MCNP-4B–Based Absorbed Dose Distribution Estimates for Patient-Specific Dosimetry,” São Paulo, 2001.
- [26] Los Alamos National Laboratory, “MCNP® USER’S MANUAL VERSION 5.1.60”.
- [27] D. Pelowitz, “MCNPXTM User’s Manual, Version 2.5.0. Los Alamos National Laboratory Report LA-CP-05-0369.,” 2005.
- [28] “Associação Brasileira de Física Médica,” 2021. [Online]. Available: <https://www.abfm.org.br/>.

- [29] S. Tabakov, F. Milano, S.-E. Strand, C. Lewis e P. Sprawls, Encyclopaedia of Medical Physics volume I and II, Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2013.
- [30] F. M. Khan e J. P. Gibbons, The Physics of Radiation Therapy, Filadélfia: LIPPINCOTT WILLIAMS & WILKINS, 2014.
- [31] J. T. Bushberg, A. Seiberet, E. Leidholdt e J. Boone, The Essential Physics of Medical Imaging, Filadélfia: by LIPPINCOTT WILLIAMS & WILKINS, 2012.
- [32] E. Okuno e E. Yoshimura, Física das Radiações, São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- [33] L. Scaff, Física da Radioterapia, São Paulo: Sarvier, 1997.
- [34] M. M. O. Ramos e L. Tauhata, “Grandezas e Unidades para Radiação Ionizante,” Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes, Rio de Janeiro, 2002.
- [35] O. Planas, “ENERGIA NUCLEAR,” 2012. [Online]. Available: https://pt.energia-nuclear.net/usinas-nucleares/reator-nuclear#google_vignette.
- [36] E. E. Lewis, Fundamentals of Nuclear Reactor Physics, 2008.
- [37] L. F. L. Mura, “Experimental Determination of Nuclear Reaction Rates in ^{238}U and ^{235}U along of the Radius of Fuel Pellets of the IPEN/MB-01 Reactor,” São Paulo, 2015.
- [38] H. Matsumoto, M. Ouisloumen e T. Takeda, “Development of Spatially Dependent Resonance Shielding Method,” 2005.