



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE FÍSICA – BACHARELADO EM FÍSICA MÉDICA

ALYNE PATRICIA MARQUES MOREIRA

**FUNDAMENTOS E PRÁTICAS DA MEDICINA NUCLEAR:
RADIOFÁRMACOS, CONTROLE DE QUALIDADE E
RADIOPROTEÇÃO**

Uberlândia – MG

2026

ALYNE PATRICIA MARQUES MOREIRA

**FUNDAMENTOS E PRÁTICAS DA MEDICINA NUCLEAR:
RADIOFÁRMACOS, CONTROLE DE QUALIDADE E
RADIOPROTEÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto de Física da Universidade Federal de
Uberlândia como requisito parcial para obtenção do
título de Bacharel em Física Médica.

Orientador: Prof. Dr. João Carlos de Oliveira Guerra

Uberlândia – MG

2026

ALYNE PATRICIA MARQUES MOREIRA

**FUNDAMENTOS E PRÁTICAS DA MEDICINA NUCLEAR:
RADIOFÁRMACOS, CONTROLE DE QUALIDADE E
RADIOPROTEÇÃO**

BANCA EXAMINADORA:

Orientador: Prof. Dr. João Carlos de Oliveira Guerra

Membro: Profa. Dra. Ana Paula Perini

Membro: Prof. Dr. Djalmir Nestor Messias

Uberlândia – MG

2026

Dedico este trabalho àqueles que amo e que já não estão mais entre nós, em especial à minha avó Maria Eliza e à minha tia Albina Moreira, que permanecem para sempre em minha memória e em meu coração.

AGRADECIMENTO

A realização deste trabalho representa mais do que uma conquista acadêmica, é a materialização de um sonho construído com esforço, fé e o apoio de muitas pessoas queridas. Agradeço, primeiramente, a Deus, por me dar força nos momentos difíceis, luz nos caminhos escuros e por sustentar minha fé quando tudo parecia incerto.

Aos meus pais, Luiz Pinheiro Moreira Júnior e Aline Delane Martins Moreira, meu eterno agradecimento por serem minha base segura, meu alicerce em cada momento desta jornada, e cada gesto de cuidado de vocês está, de alguma forma, dentro deste trabalho. Aos meus irmãos, Luiz Gustavo e Luiz Henrique, obrigada por cada palavra de amor e carinho, por vibrarem comigo nas conquistas e me acolherem nos momentos de dúvida. Obrigada por nunca desistirem desse sonho, que nunca foi só meu, e por acreditarem em mim mesmo quando eu duvidei. Vocês são parte essencial em cada passo que dou, e essa conquista é, sem dúvida, nossa.

À minha avó, Maria Rodrigues Moreira, por suas orações silenciosas, cheias de amor e esperança, que chegaram até mim como abraço e consolo em momentos difíceis. Um agradecimento especial à minha tia Delaine Moreira, que sempre esteve presente com seu carinho e incentivo, torcendo por mim em cada etapa dessa caminhada. Sua presença fez toda a diferença. Às minhas outras tias e familiares, incluindo primos e primas, que sempre me acolheram com carinho e incentivo, meu sincero obrigada. Cada palavra de apoio fez toda a diferença nessa jornada.

Um agradecimento especial ao meu namorado, Leonardo Tavares, e à sua mãe, Rosemary Tavares, que nunca duvidaram da minha capacidade e tornaram essa jornada mais leve, estando presentes quando precisei e até mesmo quando me senti sozinha por estar longe daqueles que são minha base. Obrigada por todo suporte, cuidado, paciência e por serem força nos momentos em que precisei me reerguer. Estendo esse agradecimento a toda a família Tavares, incluindo primos e tios, que também me acolheram e torceram por mim ao longo desse caminho.

Ao meu orientador, professor Dr. João Carlos de Oliveira Guerra, minha profunda gratidão pela confiança depositada em mim, por acolher esse trabalho com tanta dedicação e por me guiar com paciência, sabedoria e disponibilidade em cada etapa. Sua orientação atenciosa e seu incentivo constante foram fundamentais para que eu pudesse concluir esta pesquisa com segurança e motivação.

Às minhas amigas, obrigada por estarem ao meu lado em cada etapa dessa caminhada, por cada palavra de incentivo, por comemorarem comigo as conquistas e por me apoiarem nos momentos mais difíceis. Vocês tornaram essa trajetória mais leve, e essa conquista também é um pouco de cada uma de vocês.

Ao Instituto de Física da Universidade Federal de Uberlândia (INFIS-UFU) e aos professores em geral, meu agradecimento pela formação, pelo espaço de aprendizado e pelas oportunidades oferecidas ao longo da graduação.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte desta conquista, meus mais sinceros e emocionados agradecimentos.

"Consagre ao Senhor tudo o que você faz, e
os seus planos serão bem-sucedidos."

(Provérbios 16:3)

RESUMO

Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre a atuação do físico médico na medicina nuclear, com foco nos processos de controle de qualidade de equipamentos, no funcionamento da radiofarmácia e no gerenciamento de rejeitos radioativos. São abordados também o histórico e a evolução da especialidade, bem como os fundamentos físicos da radiação, com ênfase no processo de decaimento radioativo dos radiofármacos utilizados nos procedimentos diagnósticos e terapêuticos. A metodologia adotada é descritiva e qualitativa, fundamentada na consulta a normas técnicas da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), publicações da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) e artigos científicos da área. Espera-se, com este trabalho, evidenciar a relação entre os fundamentos teóricos da Física Médica e os aspectos técnicos e normativos que sustentam o controle de qualidade e a radioproteção em serviços de medicina nuclear, contribuindo para a compreensão do papel do físico médico nessa área.

Palavras-chave: Medicina Nuclear; Físico Médico; Controle de Qualidade; Radiofármacos; Radioproteção.

ABSTRACT

This work presents a literature review on the role of the medical physicist in nuclear medicine, focusing on equipment quality control processes, radiopharmacy operation, and radioactive waste management. It also addresses the history and evolution of the specialty, as well as the physical fundamentals of radiation, with emphasis on the radioactive decay of the radiopharmaceuticals used in diagnostic and therapeutic procedures. The methodology adopted is descriptive and qualitative, grounded in the consultation of technical standards issued by the Brazilian National Nuclear Energy Commission (CNEN), publications of the International Atomic Energy Agency (IAEA), and scientific articles in the field. The aim of this work is to highlight the relationship between the theoretical foundations of Medical Physics and the technical and regulatory aspects that underpin quality control and radiation protection in nuclear medicine services, contributing to an understanding of the medical physicist's role in this area.

Keywords: Nuclear Medicine; Medical Physicist; Quality Control; Radiopharmaceuticals; Radiation Protection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de decaimento do molibdênio-99 (^{99}Mo) para o tecnécio-99m ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) e tecnécio-99 (^{99}Tc)	20
Figura 2 – Equipamento de PET/CT, evidenciando o gantry, onde estão acoplados os detectores do sistema PET e do sistema de tomografia computadorizada, e a mesa móvel utilizada para o posicionamento e deslocamento do paciente durante o exame	23
Figura 3 – Imagens de PET/CT em corte coronal: TC (esquerda), PET (centro) e fusão PET/CT (direita)	26
Figura 4 – Equipamento de Gama Câmara, evidenciando os cabeçotes detectores acoplados ao gantry, responsáveis pela captação da radiação gama, e a mesa de exame utilizada para o posicionamento do paciente durante a aquisição das imagens	27
Figura 5 – Imagens de cintilografia óssea de corpo inteiro, evidenciando a distribuição do radiofármaco ($^{99\text{m}}\text{Tc-MDP}$) pelo esqueleto do paciente, com as regiões de maior captação representando pontos de maior atividade osteoblástica.....	32
Figura 6 – Gerador de molibdênio-99/tecnécio-99m acondicionado em blindagem de chumbo, com frascos de cloreto de sódio 0,9% e coletor a vácuo posicionados nas extremidades do sistema de eluição	34
Figura 7 – Frasco de cloreto de sódio 0,9% (6 mL) utilizado como solução eluente no processo de eluição do gerador.....	35
Figura 8 – Frasco coletor a vácuo, estéril e apirogênico, utilizado na coleta do eluato de tecnécio-99m	35
Figura 9 – Curiômetro (medidor de atividade) modelo CRC-15W, utilizado para aferição da atividade dos radiofármacos na radiofarmácia	36
Figura 10: Depósito de decaimento blindado com chumbo, utilizado para o armazenamento de rejeitos radioativos até que sua atividade atinja níveis seguros para descarte.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Testes de controle de qualidade do PET/CT	25
Tabela 2 – Testes de controle de qualidade da gama câmara.....	30
Tabela 3 – Testes de controle de qualidade do curiômetro (medidor de atividade).....	39

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	14
OBJETIVOS.....	15
1. CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA DA MEDICINA NUCLEAR	16
2. FUNDAMENTOS FÍSICOS DA RADIAÇÃO E DECAIMENTO RADIOATIVO DOS RADIOFÁRMACOS	18
2.1. Fundamentos Físicos da Radiação.....	18
2.2. Decaimento Radioativo dos Radiofármacos Utilizados em Medicina Nuclear	19
3. CONTROLE DE QUALIDADE EM EQUIPAMENTOS DE MEDICINA NUCLEAR ..	22
3.1. Controle de Qualidade em PET/CT.....	22
3.1.1. Inspeção Visual da Integridade Física do Sistema.....	23
3.1.2. Verificação da Estabilidade do Sistema de Detectores - (DQA)	23
3.1.3. Sensibilidade.....	24
3.1.4. Normalização - FASTCAL	24
3.1.5. Formação e Interpretação da Imagem no Exame de PET/CT	25
3.2. Controle de Qualidade em Gama Câmara	26
3.2.1. Uniformidade Intrínseca para Alta Densidade de Contagem	28
3.2.2. Resolução e Linearidade Espacial Intrínsecas.....	28
3.2.3. Centro de Rotação da Câmara SPECT	29
3.2.4. Cintilografia Óssea	31
4. RADIOFARMÁCIA: CALIBRAÇÃO, PREPARO E CONTROLE DE QUALIDADE DOS RADIOFÁRMACOS	33
4.1. A Radiofarmácia em Serviços de Medicina Nuclear.....	33
4.2. Geradores de Radionuclídeos	33
4.3. Calibração e Controle de Qualidade do Curiômetro	36
4.3.1. Repetibilidade.....	37
4.3.2. Exatidão	37
4.3.3. Precisão.....	38

4.3.4.	Linearidade	38
4.3.5.	Teste de Geometria	38
5.	GERENCIAMENTO DE REJEITOS RADIOATIVOS	41
5.1.	Classificação dos Rejeitos Radioativos	41
5.2.	Etapas e Gerenciamento de Rejeitos	41
5.3.	Armazenamento e Decaimento dos Rejeitos	42
5.4.	Rejeitos Gerados em Procedimentos de Iodoterapia	42
6.	RADIOPROTEÇÃO EM SERVIÇOS DE MEDICINA NUCLEAR	44
6.1.	Princípios Gerais de Radioproteção	44
6.2.	Classificação de Áreas e Sinalização.....	44
6.3.	Monitoração Individual e Dosimetria.....	45
6.4.	Radioproteção em Procedimento de Iodoterapia.....	45
6.5.	A Relação entre Radioproteção e Controle de Qualidade	46
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

INTRODUÇÃO

A medicina nuclear teve origem a partir da descoberta da radioatividade e se consolidou ao longo do século XX como uma especialidade médica independente (Cint Medicina Nuclear, 2015). Hoje ela ocupa um espaço central tanto no diagnóstico quanto no tratamento de diversas doenças, ao utilizar radiofármacos capazes de revelar o funcionamento de órgãos e tecidos ou de atuar diretamente sobre células doentes, como ocorre na iodoterapia empregada no tratamento do câncer de tireoide (Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), 2020). Dentro desse cenário, o físico médico desempenha uma função que vai muito além do suporte técnico, é ele quem garante que pacientes, trabalhadores e o público em geral estejam protegidos da radiação, e quem assegura que os equipamentos e procedimentos operem dentro dos padrões de qualidade exigidos pela prática clínica (Dutra, s.d.).

Um serviço de medicina nuclear, de forma geral, está estruturado para atender às diferentes etapas de um exame ou tratamento, recebimento e manuseio de radiofármacos na radiofarmácia, calibração e testes de controle de qualidade em equipamentos como Gama Câmara e PET/CT (*Positron Emission Tomography/Computed Tomography*, ou Tomografia por Emissão de Pósitrons associada à Tomografia Computadorizada), procedimentos terapêuticos como a iodoterapia, e o gerenciamento adequado dos rejeitos radioativos gerados ao longo desses processos. Cada uma dessas etapas envolve rotinas técnicas específicas e é regida por normas nacionais e internacionais que buscam garantir a segurança de todos os envolvidos (Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), 2013).

Entre essas rotinas, destacam-se os treinamentos de radioproteção e o gerenciamento dos rejeitos radioativos. Esse gerenciamento inclui as medições realizadas antes da liberação do lixo, já que materiais com atividade residual permanecem armazenados em recipientes de chumbo até o decaimento adequado. Destacam-se também a calibração e os testes de controle de qualidade do PET/CT e da Gama Câmara, além do funcionamento da radiofarmácia, com ênfase na eluição do tecnécio-99m e no uso de geradores como o de gálio-68. Por fim, há os critérios de liberação de ambientes terapêuticos após a alta de pacientes submetidos à iodoterapia (Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), 2013).

A relevância deste trabalho está em relacionar essas rotinas técnicas à fundamentação teórica construída ao longo da graduação em Física Médica, mostrando como os princípios de radioproteção e controle de qualidade se traduzem na prática de um serviço de medicina nuclear.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo analisar os processos de controle de qualidade, radioproteção e gerenciamento de rejeitos radioativos em serviços de medicina nuclear, correlacionando os aspectos técnicos e operacionais aos fundamentos teóricos da física das radiações e às normas vigentes.

Objetivos Específicos

- Apresentar um breve histórico da medicina nuclear, contextualizando seu desenvolvimento e suas principais aplicações diagnósticas e terapêuticas;
- Descrever os fundamentos físicos da radiação, com ênfase no processo de decaimento radioativo dos radiofármacos utilizados em medicina nuclear;
- Descrever os princípios e procedimentos de radioproteção adotados em serviços de medicina nuclear, incluindo o gerenciamento de rejeitos radioativos;
- Apresentar os principais testes de controle de qualidade aplicados aos equipamentos de PET/CT, como os testes de sensibilidade, FASTCAL e verificação da estabilidade do sistema de detectores, e de Gama Câmara, como os testes de uniformidade, resolução espacial, linearidade espacial intrínseca e centro de rotação;
- Discutir o manuseio, a calibração e o preparo de radiofármacos na radiofarmácia, incluindo o funcionamento do gerador de tecnécio-99m;
- Analisar os critérios de segurança radiológica envolvidos na liberação de leitos de pacientes submetidos à iodoterapia;
- Relacionar esses processos técnicos à formação teórica em Física Médica, evidenciando a importância do físico médico na garantia da qualidade e segurança dos serviços de medicina nuclear.

1. CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA DA MEDICINA NUCLEAR

A história da Medicina Nuclear está diretamente ligada à descoberta da radioatividade. Em 1896, Henri Becquerel identificou a radioatividade natural do urânio, sendo esse considerado o primeiro isótopo radioativo natural descoberto. Dois anos depois, em 1898, Marie Curie aprofundou os estudos sobre esse fenômeno, consolidando as bases científicas que, décadas mais tarde, dariam origem à especialidade (Cint Medicina Nuclear, 2015).

O uso médico da radioatividade começou a se delinear em 1923, quando George de Hevesy utilizou pela primeira vez um traçador radioativo em uma exploração biológica. Em 1934, isótopos artificiais do iodo passaram a ser empregados nos primeiros estudos sobre a fisiologia da glândula tireoide, e em 1939 ocorreu a primeira aplicação terapêutica do iodo-131 no tratamento de doenças tireoidianas, marcando a entrada da especialidade também no campo terapêutico, e não apenas diagnóstico (Cint Medicina Nuclear, 2015).

A partir de 1940, consolidou-se a chamada Medicina Atômica, que empregava o iodo-131 tanto no diagnóstico quanto no tratamento de doenças da tireoide, expandindo-se posteriormente para outras aplicações, como estudos hematológicos. Foi somente em 1952 que o termo Medicina Nuclear passou a substituir a denominação original de Medicina Atômica, nome pelo qual a especialidade é conhecida até hoje (Cint Medicina Nuclear, 2015).

Paralelamente à evolução clínica, houve um intenso desenvolvimento tecnológico dos equipamentos de imagem. Em 1951, Benedict Cassen desenvolveu o primeiro scanner com cristal de cintilação, dando origem ao termo "cintilografia" (Cint Medicina Nuclear, 2015). Poucos anos depois, ainda na década de 1950, Hal Anger inventou a câmara de cintilação, equipamento que se tornaria a base para os sistemas tomográficos atuais, como o SPECT (Single-Photon Emission Computed Tomography) e o PET (Positron Emission Tomography) (Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), 2020).

A radiofarmácia também acompanhou essa evolução, tendo como marco histórico o surgimento, em 1962, dos geradores de tecnécio-99m, isótopo que se tornaria o mais utilizado em procedimentos de Medicina Nuclear até os dias atuais. Já a partir de 1956, iniciou-se a fase laboratorial da especialidade, com o desenvolvimento de técnicas de radioimunoensaio para análise de fluidos orgânicos (Cint Medicina Nuclear, 2015).

Com o crescimento da complexidade dos equipamentos, dos radiofármacos utilizados e das exigências regulatórias associadas à radiação ionizante, tornou-se indispensável a atuação de um profissional especializado em garantir a segurança e a qualidade dos procedimentos, o físico médico, cuja presença nos serviços de Medicina Nuclear se consolidou como parte essencial da equipe multiprofissional (Dutra, s.d.).

Atualmente, essa evolução histórica se reflete em equipamentos de tecnologia avançada, como sistemas híbridos de PET/CT e câmaras de cintilação de última geração, que reúnem décadas de desenvolvimento técnico em prol de diagnósticos mais precisos e tratamentos mais seguros (Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), 2020).

2. FUNDAMENTOS FÍSICOS DA RADIAÇÃO E DECAIMENTO RADIOATIVO DOS RADIOFÁRMACOS

Este capítulo aborda os fundamentos físicos que sustentam a utilização de radiofármacos em medicina nuclear, apresentando os principais tipos de decaimento radioativo e o conceito de meia-vida física. Em seguida, são discutidas as características de decaimento dos radionuclídeos mais utilizados na prática clínica, tecnécio-99m, iodo-131, gálio-68 e flúor-18, relacionando suas propriedades físicas às respectivas aplicações diagnósticas e terapêuticas.

2.1. Fundamentos Físicos da Radiação

A Medicina Nuclear fundamenta-se na utilização de átomos instáveis, chamados radionuclídeos, cujo núcleo possui excesso de energia e tende a se reorganizar espontaneamente em busca de estabilidade. Esse processo de reorganização, conhecido como decaimento radioativo, ocorre com a emissão de radiação na forma de partículas ou de energia eletromagnética, e é justamente essa emissão que permite tanto a obtenção de imagens diagnósticas quanto a realização de tratamentos terapêuticos (Bailey et al., 2014).

Existem diferentes tipos de decaimento radioativo, sendo os principais o decaimento alfa, o decaimento beta e a emissão gama. No decaimento alfa, o núcleo emite uma partícula composta por dois prótons e dois nêutrons, resultando em um novo elemento de número atômico reduzido. No decaimento beta, ocorre a conversão de um nêutron em próton (ou vice-versa), com emissão de um elétron ou pósitron. Já a emissão gama consiste na liberação de energia eletromagnética, sem alteração do número atômico ou de massa, sendo esse o tipo de radiação mais explorado na obtenção de imagens em Medicina Nuclear (Bailey et al., 2014).

O comportamento do decaimento radioativo é descrito por uma lei exponencial, segundo a qual a atividade de uma amostra radioativa diminui de forma previsível ao longo do tempo. Esse comportamento é caracterizado pela meia-vida física do radionuclídeo, definida como o tempo necessário para que a atividade de uma determinada quantidade de material radioativo se reduza à metade. A meia-vida é uma propriedade fundamental na escolha dos radiofármacos utilizados na prática clínica, pois determina tanto a janela de tempo útil para realização dos procedimentos quanto o tempo necessário para o decaimento seguro dos rejeitos gerados (Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), 2020).

Matematicamente, esse comportamento é descrito pela seguinte equação:

$$A = A_0 \cdot e^{(-\lambda t)} \quad (1)$$

onde A representa a atividade do radionuclídeo em um instante de tempo t , A_0 é a atividade inicial da amostra, e é a base do logaritmo natural, e λ é a constante de decaimento, característica de cada radionuclídeo, relacionada à meia-vida física ($T_{1/2}$) pela expressão:

$$\lambda = \ln(2)/T_{1/2}. \quad (2)$$

Quanto maior o valor de λ , mais rápido o radionuclídeo decai e, consequentemente, menor sua meia-vida (Bailey et al., 2014).

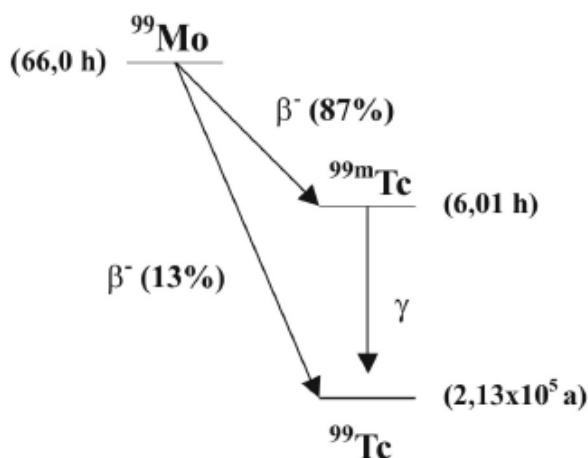
A compreensão desses parâmetros é fundamental para a prática da Medicina Nuclear, uma vez que a meia-vida física de cada radionuclídeo determina diretamente o planejamento das doses administradas, o tempo de espera necessário para a realização dos exames após a injeção do radiofármaco, bem como os prazos de armazenamento e descarte adequados dos rejeitos radioativos gerados nos serviços. Dessa forma, o conhecimento do comportamento do decaimento radioativo não se restringe a um aspecto puramente teórico, mas constitui a base física que sustenta a segurança, a eficácia diagnóstica e o gerenciamento adequado dos materiais radioativos utilizados na rotina clínica.

2.2. Decaimento Radioativo dos Radiofármacos Utilizados em Medicina Nuclear

Os radiofármacos utilizados em Medicina Nuclear apresentam meias-vidas físicas e modos de decaimento bastante distintos entre si, características que determinam diretamente sua aplicação clínica, seja em procedimentos diagnósticos ou terapêuticos.

O tecnécio-99m, radionuclídeo mais utilizado em procedimentos diagnósticos, é obtido a partir do decaimento do molibdênio-99, que possui meia-vida de 66,0 horas e decai por emissão beta menos (87%) diretamente para o tecnécio-99m, e por uma via secundária (13%) para o tecnécio-99. O tecnécio-99m, por sua vez, possui meia-vida de 6,01 horas e decai por emissão gama para o tecnécio-99, isótopo praticamente estável, com meia-vida de $2,13 \times 10^5$ anos (Figura 1). Essa cadeia de decaimento é o que possibilita o uso do gerador de molibdênio-tecnécio nos serviços de medicina nuclear, permitindo a obtenção do tecnécio-99m diretamente no local de uso (Bailey et al., 2014).

Figura 1: Esquema de decaimento do molibdênio-99 (^{99}Mo) para o tecnécio-99m ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) e tecnécio-99 (^{99}Tc).



Fonte: Adaptado de Mesquita e Santos (2011).

O iodo-131, empregado tanto em diagnóstico quanto no tratamento de doenças da tireoide, decai por emissão beta menos para o xenônio-131, com meia-vida física de aproximadamente 8 dias e emissão gama principal de 364 keV, energia utilizada tanto para fins diagnósticos quanto para a detecção externa do radiofármaco após sua administração terapêutica (Bailey et al., 2014).

O gálio-68, utilizado em procedimentos de tomografia por emissão de pósitrons, é um emissor de pósitrons de meia-vida curta, de aproximadamente 68 minutos. Radionuclídeos com essa característica são disponibilizados aos serviços por meio de geradores, solução que viabiliza logisticamente o seu uso. No caso do gálio-68, o gerador tem como radionuclídeo pai o germânio-68, de meia-vida igual a 271 dias, o que permite que o sistema opere por até dois anos, com eluições a cada cinco horas (Bailey et al., 2014).

O flúor-18 é o radionuclídeo empregado na marcação da fludesoxiglicose (FDG), o traçador mais utilizado em exames de PET. Por ser um análogo da glicose, o FDG possibilita avaliar o metabolismo glicídico dos tecidos, o que fundamenta seu uso em oncologia. Seu decaimento ocorre por emissão de pósitron, com probabilidade de 96,7%, originando o oxigênio-18, e sua meia-vida física é de aproximadamente 110 minutos (Bailey et al., 2014).

Essa diversidade de meias-vidas e modos de decaimento reflete a necessidade de adequação entre as propriedades físicas de cada radionuclídeo e sua finalidade clínica.

Radionuclídeos de meia-vida curta, como o gálio-68 e o flúor-18, exigem que sua obtenção ocorra próxima ao momento do uso. Já os de meia-vida mais longa, como o iodo-131, permitem maior flexibilidade logística, mas demandam cuidados adicionais de radioproteção. Segundo a IAEA (2020), essas diferenças se refletem diretamente no planejamento do serviço, o emprego de radiofármacos de meia-vida curta requer suprimento confiável ou produção local, enquanto o uso do iodo-131 pode exigir sistemas de ventilação específicos nos quartos terapêuticos e a retenção dos efluentes até que ocorra decaimento suficiente para sua liberação.

3. CONTROLE DE QUALIDADE EM EQUIPAMENTOS DE MEDICINA NUCLEAR

Este capítulo aborda os principais testes de controle de qualidade aplicados aos equipamentos utilizados em serviços de medicina nuclear, com destaque para o PET/CT e Gama Câmara. São apresentados os testes exigidos pela norma CNEN NN 3.05, seus objetivos e periodicidades, evidenciando a importância dessas rotinas para garantir a confiabilidade das imagens diagnósticas.

3.1. Controle de Qualidade em PET/CT

O controle de qualidade em equipamentos de PET/CT tem como finalidade garantir que as imagens produzidas sejam precisas, reprodutíveis e confiáveis para fins diagnósticos, além de assegurar que as doses de radiação administradas aos pacientes estejam dentro dos padrões de segurança estabelecidos. No Brasil, esses testes são regulamentados pela norma CNEN NN 3.05, que estabelece os tipos de teste exigidos para equipamentos de diagnóstico por emissão de pósitrons, bem como a frequência mínima com que cada um deve ser realizado (Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), 2013).

A Figura 2 apresenta um equipamento de PET/CT, mostrando sua estrutura típica: o *gantry*, que abriga tanto os anéis de detectores da tomografia por emissão de pósitrons quanto o conjunto tubo-detectores da tomografia computadorizada, e a mesa móvel, na qual o paciente é posicionado e que se desloca ao longo do túnel durante o exame. A integração dos dois sistemas em um único aparelho permite que as imagens funcionais do PET, que mostram a distribuição do radiofármaco no organismo, sejam sobrepostas às imagens anatômicas de alta resolução da TC, facilitando a localização de alterações metabólicas. Além do ganho na localização, o acoplamento da TC possibilita seu emprego na correção de atenuação, o que reduz a duração do exame e os artefatos de movimento e viabiliza a quantificação acurada das imagens (IAEA, 2020). É sobre esse tipo de equipamento que incidem os testes de controle de qualidade discutidos nesta seção, uma vez que desvios no alinhamento entre os dois sistemas ou na calibração dos detectores comprometem a confiabilidade das imagens geradas.

Figura 2: Equipamento de PET/CT, evidenciando o *gantry*, onde estão acoplados os detectores do sistema PET e do sistema de tomografia computadorizada, e a mesa móvel utilizada para o posicionamento e deslocamento do paciente durante o exame.



Fonte: CDI Premium, s.d.

Esses testes devem ser executados em periodicidades distintas, conforme estabelecido pela norma CNEN NN 3.05 (Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), 2013), envolvendo a inspeção visual da integridade física do sistema, a verificação da estabilidade do sistema de detectores, o teste de sensibilidade e a calibração FASTCAL, os quais serão apresentados detalhadamente a seguir.

3.1.1. Inspeção Visual da Integridade Física do Sistema

Antes de qualquer coisa, é preciso garantir que o equipamento está fisicamente em bom estado sem danos causados pelo transporte, pela instalação ou pelo próprio uso diário. Esse teste funciona como uma "checagem visual" simples: o físico observa o aparelho, a estação onde as imagens são processadas e os dispositivos onde os dados são armazenados, procurando por qualquer sinal de problema, como cabos soltos, painéis danificados ou peças com aparência estranha. É um teste rápido, mas importante, porque um dano físico não identificado pode comprometer tanto a segurança quanto a qualidade das imagens geradas. Por isso, ele é feito na chegada do equipamento e repetido todos os dias, antes de começar os exames (Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), 2013).

3.1.2. Verificação da Estabilidade do Sistema de Detectores - (DQA)

A Verificação da Estabilidade do Sistema de Detectores corresponde ao teste diário previsto no Anexo IV da norma CNEN NN 3.05, também conhecido como *blank scan*. Ela

funciona como um teste de partida realizado pelo próprio equipamento diariamente, antes do início dos exames, no qual o sistema verifica a constância do desempenho de seus módulos detectores, comparando-o com os valores de referência estabelecidos durante os testes de aceitação do equipamento. Caso algum parâmetro esteja fora do esperado, o equipamento não é liberado para uso até que o problema seja identificado e corrigido. Trata-se, portanto, de uma garantia diária de que o aparelho está funcionando adequadamente antes de gerar qualquer imagem destinada a um diagnóstico real (Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), 2013).

3.1.3. Sensibilidade

A sensibilidade mede o quão bom o equipamento é em captar a radiação emitida pelo radiofármaco dentro do paciente, avaliando a eficiência intrínseca e geométrica do sistema PET. Quanto maior a sensibilidade, melhor o aparelho aproveita a radiação emitida pelo paciente, permitindo gerar imagens de melhor qualidade com a mesma quantidade de radiofármaco ou, alternativamente, reduzir a dose administrada mantendo uma qualidade de imagem equivalente, o que contribui diretamente para a redução da exposição do paciente à radiação. O mecanismo físico de detecção que fundamenta esse teste a captação em coincidência dos fótons de aniquilação, é detalhado na seção 3.1.5. Por se tratar de um teste mais elaborado, ele é realizado apenas na instalação do equipamento e, posteriormente, com periodicidade anual (Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), 2013; Bailey et al., 2014).

3.1.4. Normalização - FASTCAL

O PET/CT possui milhares de detectores que, com o tempo e o uso, passam a apresentar pequenas variações de sensibilidade entre si. O FASTCAL corrige rapidamente essas diferenças, equalizando a resposta de todos os detectores antes de cada exame, de modo que a imagem final não apresente inconsistências causadas por essas variações (Bailey et al., 2014). Na norma CNEN NN 3.05, esse procedimento corresponde ao teste de Normalização, previsto no Anexo IV, com periodicidade trimestral ou conforme recomendação do fabricante (CNEN, 2013).

Tabela 1: Testes de controle de qualidade do PET/CT.

Teste	Periodicidade	Objetivo
Inspeção visual da integridade física do sistema	Aceitação / Diário	Analisar visualmente o sistema, a estação de aquisição/processamento e os dispositivos de armazenamento de dados, verificando danos de transporte, fabricação ou instalação.
Verificação da estabilidade do sistema de detectores (DQA)	Aceitação / Diário	Verificar a constância do desempenho dos módulos detectores, comparando os parâmetros aos valores de referência estabelecidos na instalação, liberando o equipamento para uso clínico.
Normalização (FASTCAL)	Aceitação / Trimestral ou conforme fabricante	Adquirir dados sobre a eficiência dos detectores para uso na correção de sua não uniformidade.
Sensibilidade	Aceitação / Anual	Verificar a eficiência intrínseca e geométrica do sistema PET na detecção da radiação emitida pelo radiofármaco

Fonte: adaptado de CNEN 3.05, 2013 (Anexo IV).

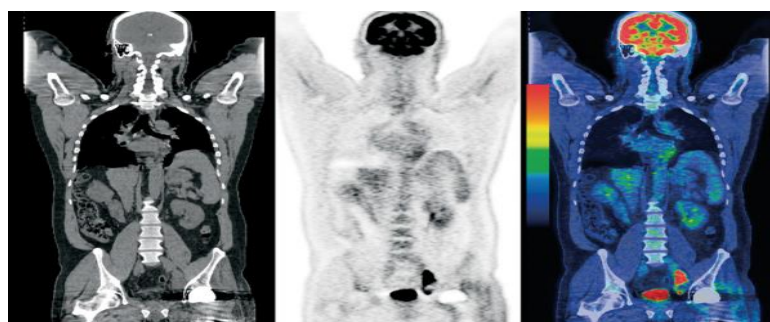
A Tabela 1 sintetiza os testes de controle de qualidade selecionados para detalhamento neste trabalho, evidenciando que a rotina de verificação do PET/CT combina testes de periodicidade diária, como a inspeção visual e a verificação da estabilidade do sistema de detectores, com testes de periodicidade intermediária, como a normalização, realizada trimestralmente ou conforme recomendação do fabricante, e testes de periodicidade mais espaçada, como o de sensibilidade, realizado anualmente. Essa combinação busca garantir que pequenas falhas sejam identificadas rapidamente no dia a dia, enquanto parâmetros mais complexos do sistema sejam avaliados em intervalos que permitam uma análise mais aprofundada do desempenho do equipamento. Vale destacar que a norma CNEN NN 3.05 prevê, no Anexo IV, um conjunto mais amplo de testes para o PET/CT, como os testes de qualidade de imagem, de resolução espacial e de calibração de coincidência, os quais não são menos relevantes, mas foram deixados fora do escopo deste trabalho em função do recorte adotado, que priorizou os testes de rotina mais diretamente associados à verificação diária e periódica do desempenho do equipamento.

3.1.5. Formação e Interpretação da Imagem no Exame de PET/CT

No exame de PET/CT, o radiofármaco administrado por via endovenosa, geralmente o ^{18}F -FDG (fludesoxiglicose marcada com flúor-18), é um análogo da glicose captado preferencialmente pelas células de maior atividade metabólica, como as tumorais. Após um período de repouso, necessário à sua distribuição pelo organismo, inicia-se a aquisição. O

flúor-18 emite pósitrons que, ao se aniquilarem com elétrons dos tecidos vizinhos, geram dois fótons de 511 keV em direções opostas, captados simultaneamente pelos detectores. É essa detecção em coincidência que permite localizar o ponto de origem da emissão (Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), 2009; Bailey et al., 2014).

Figura 3: Imagens de PET/CT em corte coronal: TC (esquerda), PET (centro) e fusão PET/CT (direita).



Fonte: Multimagem, s.d.

A partir dos dados de coincidência captados pelos detectores, o equipamento reconstrói separadamente a imagem anatômica, obtida pela tomografia computadorizada, e a imagem funcional, obtida pela tomografia por emissão de pósitrons, na qual as regiões de maior concentração do radiofármaco aparecem destacadas, geralmente representadas em uma escala de cores que vai do azul (menor captação) ao vermelho e amarelo (maior captação), indicando maior atividade metabólica local. Essas duas imagens são então fusionadas em uma única imagem de PET/CT, permitindo localizar com precisão as alterações metabólicas identificadas em relação às estruturas anatômicas do paciente, o que aumenta significativamente a acurácia diagnóstica em relação à análise isolada de cada modalidade.

3.2. Controle de Qualidade em Gama Câmara

A Gama Câmara é um dos equipamentos mais utilizados em serviços de medicina nuclear, sendo empregada na obtenção de imagens cintilográficas planas e tomográficas (SPECT). Assim como o PET/CT, esse equipamento requer testes periódicos de controle de qualidade, conforme especificado nos anexos da norma CNEN NN 3.05 (Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), 2013).

A Figura 4 ilustra um equipamento de Gama Câmara, composto por um ou mais detectores (cabeçotes), responsáveis pela captação da radiação gama emitida pelo radiofármaco administrado ao paciente, acoplados a um sistema de suporte que permite seu posicionamento e movimentação ao redor do paciente, além de uma mesa de exame na qual o paciente é posicionado durante a aquisição das imagens. Os detectores podem ser ajustados em diferentes ângulos e distâncias em relação ao paciente, o que possibilita tanto a aquisição de imagens planas quanto a rotação necessária para a reconstrução de imagens tomográficas (SPECT). É sobre esse conjunto de detectores e seus componentes eletrônicos associados que incidem os testes de controle de qualidade previstos na norma CNEN NN 3.05, uma vez que qualquer desvio na uniformidade de resposta ou na calibração dos cristais detectores compromete diretamente a qualidade diagnóstica das imagens obtidas.

Figura 4: Equipamento de Gama Câmara, evidenciando os cabeçotes detectores acoplados ao *gantry*, responsáveis pela captação da radiação gama, e a mesa de exame utilizada para o posicionamento do paciente durante a aquisição das imagens.



Fonte: Mediso, s.d.

Os testes de controle de qualidade da Gama Câmara têm por objetivo verificar o correto funcionamento dos detectores e garantir que o equipamento produza imagens com resolução, uniformidade e linearidade adequadas para o diagnóstico. Esses testes devem ser realizados com frequências distintas, que variam entre diárias, semanais, mensais, semestrais e anuais, conforme estabelecido pela norma CNEN NN 3.05 (Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), 2013), e envolvem parâmetros como a uniformidade intrínseca para alta

densidade de contagem, a resolução e linearidade espacial intrínsecas e o centro de rotação da câmara SPECT, os quais serão detalhados a seguir.

3.2.1. Uniformidade Intrínseca para Alta Densidade de Contagem

Esse teste avalia a resposta intrínseca da Gama Câmara, ou seja, a capacidade do sistema de detectores, sem o uso do colimador, de produzir uma imagem homogênea quando exposto a um fluxo espacialmente uniforme de radiação. Para isso, utiliza-se uma fonte radioativa pontual de referência, posicionada a uma distância adequada do detector, de modo que os fótons emitidos atinjam toda a superfície do cristal de cintilação de maneira uniforme. O sistema é ajustado com uma janela simétrica de energia centralizada sobre o fotópico do radionuclídeo mais utilizado na rotina clínica, geralmente o tecnécio-99m, garantindo que apenas os fótons com a energia esperada sejam considerados na formação da imagem, descartando eventos espalhados ou de energia incompatível.

O teste é realizado sob condições de alta densidade de contagem, ou seja, com um número elevado de fótons detectados durante a aquisição. Essa condição aumenta a sensibilidade do teste a pequenas variações na resposta do detector, uma vez que, com mais contagens, diferenças sutis entre regiões do cristal, causadas, por exemplo, por variações na eficiência dos fotomultiplicadores ou por pequenas imperfeições no cristal de cintilação, tornam-se estatisticamente mais evidentes e detectáveis. Caso alguma região do detector apresente resposta significativamente diferente das demais, esse desvio é identificado na imagem resultante como uma área de intensidade irregular, o que, se não corrigido, pode comprometer a interpretação clínica de exames reais, sendo confundido com alterações fisiológicas ou patológicas no paciente.

Por sua maior sensibilidade a pequenas não conformidades, esse teste é realizado com periodicidade mensal, conforme estabelecido no Anexo II da norma CNEN NN 3.05 (Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), 2013; Bailey et al., 2014).

3.2.2. Resolução e Linearidade Espacial Intrínsecas

Esse teste avalia dois aspectos que, juntos, garantem que a imagem representa fielmente a realidade: a nitidez dos detalhes e a fidelidade geométrica da imagem.

Para a realização do teste, o colimador é removido e posiciona-se sobre o cristal do detector um simulador de fendas (phantom), constituído por uma máscara de chumbo com fendas estreitas, paralelas e regularmente espaçadas. Uma fonte pontual de tecnécio-99m é colocada a uma distância superior a cinco vezes a maior dimensão do campo de visão útil do detector, de modo que a radiação atinja o cristal de maneira uniforme (Bailey et al., 2014).

Como as fendas são muito estreitas, o ideal seria que o detector reproduzisse na imagem linhas igualmente finas. Na prática, porém, o sistema sempre gera um pequeno espalhamento ao redor de cada linha, resultado de limitações físicas do processo de detecção. Ao se medir a intensidade dessa imagem ao longo de um corte transversal à fenda, obtém-se uma curva com um pico central. A FWHM (do inglês *Full Width at Half Maximum*, ou "largura à meia-altura") é justamente a largura dessa curva medida na metade da sua altura máxima: quanto mais estreita for essa largura, menor é o borramento gerado pelo sistema e maior é a capacidade do equipamento de distinguir dois pontos próximos como estruturas separadas, ou seja, melhor é a resolução espacial (Bailey et al., 2014).

A linearidade espacial é avaliada na mesma imagem. Como as fendas do simulador são perfeitamente retas e regularmente espaçadas, qualquer distorção reproduzida pelo sistema, linhas onduladas, tortas ou com espaçamento irregular, indica um problema de linearidade do detector (Bailey et al., 2014).

Um desvio significativo em qualquer um desses dois parâmetros compromete a capacidade do sistema de identificar corretamente lesões pequenas ou estruturas anatômicas bem delimitadas, podendo inclusive impactar o desempenho de outros testes de controle de qualidade, como o de desempenho SPECT, conforme observado em avaliações de serviços de medicina nuclear no Brasil (Kubo et al., 2017). Por isso, esse teste é realizado mensalmente, conforme estabelecido no Anexo II da norma CNEN NN 3.05 (Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), 2013).

3.2.3. Centro de Rotação da Câmara SPECT

Esse teste é específico para quando a Gama Câmara realiza exames tomográficos (SPECT), nos quais ela gira em torno do paciente capturando várias imagens de ângulos diferentes, que depois são reconstruídas matematicamente em cortes transversais do corpo, de forma semelhante ao que ocorre em uma tomografia computadorizada comum. Para que

essa reconstrução funcione corretamente, o sistema computacional precisa saber com exatidão em torno de qual ponto o centro de rotação, a câmara está girando. Caso esse eixo esteja desalinhado, mesmo que minimamente, o algoritmo de reconstrução aplica a correção espacial em um ponto incorreto, o que aparece na imagem final como borrões, estruturas duplicadas ou distorções em formato de anel, prejudicando seriamente a interpretação clínica do exame (Bailey et al., 2014). Por isso, o teste verifica o alinhamento do centro de rotação com o eixo Y e a angulação (*tilt*) do detector em relação ao eixo de rotação Z, também com periodicidade mensal, conforme estabelecido no Anexo II da norma CNEN NN 3.05 (Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), 2013).

Tabela 2: Testes de controle de qualidade da gama câmara.

Teste	Periodicidade	Objetivo
Uniformidade intrínseca para alta densidade de contagem	Aceitação / Mensal	Testar a resposta intrínseca da câmara para um fluxo espacialmente uniforme de fótons, usando janela simétrica de energia centralizada sobre o fotópico, para altas densidades de contagens.
Resolução e linearidade espacial intrínsecas	Aceitação / Mensal	Testar a resolução espacial intrínseca da câmara por meio da largura à meia-altura (FWHM) e sua linearidade.
Centro de rotação da câmara SPECT	Aceitação / Mensal	Testar o desvio do centro de rotação do sistema, o alinhamento com o eixo Y e a angulação (<i>tilt</i>) do detector em relação ao eixo de rotação (Z).

Fonte: adaptado de CNEN 3.05, 2013 (Anexo II).

A Tabela 2 apresenta os testes de controle de qualidade selecionados para detalhamento neste trabalho, todos com periodicidade mensal, além da verificação na aceitação do equipamento. Diferentemente dos testes do PET/CT apresentados na Tabela 1, que se dividem entre rotinas diárias, trimestrais e anuais, os testes aqui selecionados da Gama Câmara concentram-se em uma frequência intermediária, o que reflete a necessidade de monitorar de forma regular parâmetros sensíveis, como a uniformidade, a resolução espacial e o centro de rotação, que impactam diretamente a qualidade das imagens cintilográficas e tomográficas geradas pelo equipamento. Vale destacar que a norma CNEN NN 3.05 prevê, no Anexo II, um conjunto mais amplo de testes para a Gama Câmara, com periodicidades que variam de diária a semestral, não abordados neste trabalho.

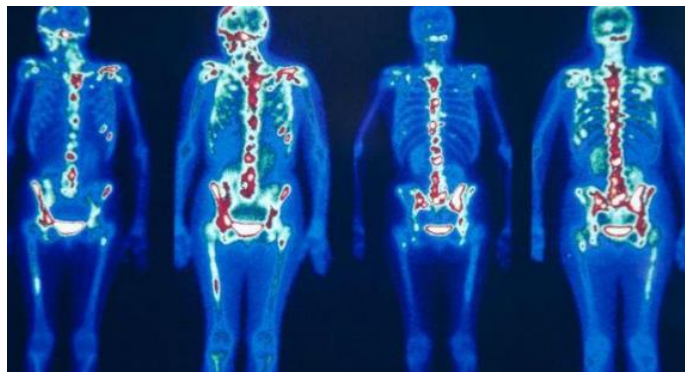
3.2.4. Cintilografia Óssea

A cintilografia óssea é um dos exames mais realizados na rotina dos serviços de medicina nuclear, sendo utilizada na avaliação de doenças ósseas de natureza maligna ou benigna. Uma das principais vantagens desse exame é permitir a visualização de todo o esqueleto em um único procedimento, sendo especialmente sensível para identificar alterações funcionais ósseas que muitas vezes ainda não são detectáveis em exames radiográficos convencionais (Bionuclear, s.d.).

O radiofármaco utilizado nesse exame é o MDP (metileno difosfonato) marcado com tecnécio-99m ($^{99m}\text{Tc-MDP}$), administrado por via endovenosa ao paciente. Esse composto possui grande afinidade pelo tecido ósseo, concentrando-se preferencialmente em regiões de maior atividade osteoblástica, ou seja, onde há maior remodelação óssea em curso, processo que se intensifica naturalmente durante o crescimento, mas também em situações patológicas, como fraturas em consolidação, processos inflamatórios e, principalmente, na presença de lesões metastáticas (Bailey et al., 2014).

O exame ocorre em duas etapas: após a aplicação do radiofármaco, o paciente aguarda um período de aproximadamente 3 a 4 horas para que o composto se distribua adequadamente pelo esqueleto e seja eliminado do restante do organismo por via renal, garantindo um melhor contraste entre o tecido ósseo e os tecidos moles adjacentes. Durante esse intervalo, recomenda-se a ingestão de líquidos, o que contribui tanto para a redução da dose de radiação recebida quanto para a melhoria da qualidade da imagem final. Após a realização do exame, o paciente deve continuar ingerindo bastante água para auxiliar na eliminação do radiofármaco remanescente no organismo (Bionuclear, s.d.).

Figura 5: Imagens de cintilografia óssea de corpo inteiro, evidenciando a distribuição do radiofármaco (^{99m}Tc -MDP) pelo esqueleto do paciente, com as regiões de maior captação representando pontos de maior atividade osteoblástica.



Fonte: Bionuclear, s.d.

A imagem da cintilografia óssea é adquirida pela Gama Câmara, geralmente na modalidade de corpo inteiro (*whole body*), captando simultaneamente as vistas anterior e posterior do esqueleto do paciente. Nas imagens resultantes, as regiões de maior captação do radiofármaco e, portanto, de maior atividade osteoblástica, aparecem com maior intensidade de contagem, formando o que se chama de "pontos quentes" (*hot spots*), enquanto áreas de menor atividade metabólica óssea aparecem como "pontos frios" (*cold spots*), podendo indicar necrose óssea ou ausência de fluxo sanguíneo local. A interpretação dessas variações de captação, correlacionada ao contexto clínico do paciente, permite ao médico nuclear identificar precocemente alterações ósseas de origem tumoral, infecciosa, traumática ou degenerativa (Bailey et al., 2014).

4. RADIOFARMÁCIA: CALIBRAÇÃO, PREPARO E CONTROLE DE QUALIDADE DOS RADIOFÁRMACOS

Este capítulo aborda a radiofarmácia, setor responsável pelo recebimento, manuseio, calibração e preparo dos radiofármacos utilizados nos exames e tratamentos de medicina nuclear. São apresentados o funcionamento dos geradores de radionuclídeos, os testes de controle de qualidade do curiômetro (calibrador de dose) e os procedimentos envolvidos no cálculo e preparo das doses administradas aos pacientes.

4.1. A Radiofarmácia em Serviços de Medicina Nuclear

A radiofarmácia é o setor responsável por receber, armazenar, manipular e preparar os radiofármacos utilizados nos procedimentos diagnósticos e terapêuticos de um serviço de medicina nuclear. De acordo com a norma CNEN NN 3.05, essas atividades devem ocorrer em um laboratório específico, destinado à manipulação e ao armazenamento de fontes radioativas em uso, cuja infraestrutura deve possuir bancadas com superfícies impermeáveis, lisas e de fácil descontaminação, cuba com no mínimo 40 cm de profundidade, torneira sem controle manual e sistema de exaustão de ar adequado (Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), 2013).

Diferentemente de outros medicamentos, os radiofármacos possuem tempo de uso limitado, já que sua atividade radioativa diminui continuamente por decaimento, por isso, boa parte deles precisa ser preparada no próprio local de uso, pouco antes de sua administração ao paciente, sobre bancada lisa, sem ranhuras, recoberta com plástico e papel absorvente e provida de blindagem adequada (CNEN, 2013). Antes da administração ao paciente, a norma exige ainda que a atividade do radiofármaco seja previamente aferida no medidor de atividade, considerando a geometria adequada para cada tipo de recipiente utilizado (Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), 2013).

Essa característica torna a radiofarmácia um setor de rotina intensa e de trabalho técnico exigente, no qual o físico médico atua diretamente no controle de qualidade dos equipamentos e no cálculo das doses preparadas (Dutra, s.d.).

4.2. Geradores de Radionuclídeos

O gerador de radionuclídeos é um sistema utilizado na radiofarmácia para obter, diretamente no serviço de medicina nuclear, um radionuclídeo de meia-vida curta a partir do

decaimento contínuo de um "radionuclídeo pai" de meia-vida mais longa, que fica armazenado dentro do próprio gerador. O radionuclídeo produzido, chamado de "radionuclídeo filho", é extraído periodicamente por um processo denominado eluição, e é a partir dele que os radiofármacos são preparados para uso clínico.

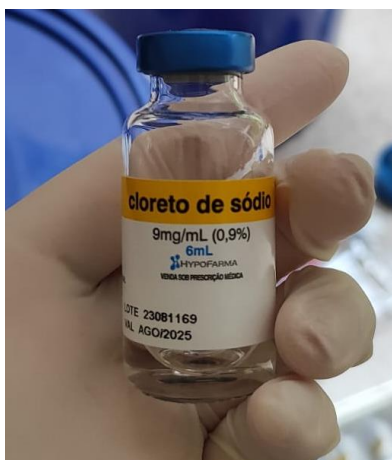
O exemplo mais utilizado é o gerador de molibdênio-99/tecnécio-99m, já discutido no Capítulo 2. O molibdênio-99, com meia-vida de 66 horas, decai continuamente formando tecnécio-99m, que pode ser extraído do gerador por eluição, geralmente realizada uma vez ao dia. Esse gerador costuma ser recebido pela radiofarmácia periodicamente, já que sua atividade útil se esgota após alguns dias de uso (Cint Medicina Nuclear, 2015).

Figura 6: Gerador de molibdênio-99/tecnécio-99m acondicionado em blindagem de chumbo, com frascos de cloreto de sódio 0,9% e coletor a vácuo posicionados nas extremidades do sistema de eluição.



Fonte: Autor (2026).

Figura 7: Frasco de cloreto de sódio 0,9% (6 mL) utilizado como solução eluente no processo de eluição do gerador.



Fonte: Autor (2026).

Figura 8: Frasco coletor a vácuo, estéril e apirogênico, utilizado na coleta do eluato de tecnécio-99m.



Fonte: Autor (2026).

Na prática, o gerador de molibdênio-99/tecnécio-99m é mantido acondicionado em uma blindagem de chumbo, que reduz a exposição à radiação durante seu manuseio no dia a dia da radiofarmácia (Figura 6). O processo de eluição consiste na passagem de uma solução salina cloreto de sódio a 0,9%, através da coluna do gerador, arrastando consigo o tecnécio-99m formado a partir do decaimento do molibdênio-99 (Figura 7). Essa solução eluente é conectada a um frasco coletor a vácuo, estéril e apirogênico, posicionado na outra extremidade

do sistema, responsável por receber o eluato de tecnécio-99m já pronto para ser utilizado no preparo dos radiofármacos (Figura 8).

Outro exemplo relevante é o gerador de gálio-68, utilizado na produção de radiofármacos para exames de PET/CT. Nesse gerador, o radionuclídeo pai é o germânio-68, que possui meia-vida de aproximadamente 271 dias e decai continuamente, regenerando o gálio-68 dentro do próprio gerador. O gálio-68, radionuclídeo filho, é um emissor de pósitron com meia-vida de aproximadamente 68 minutos, diferente do tecnécio-99m, que é emissor de radiação gama. Por sua meia-vida ser muito curta, a eluição do gálio-68 costuma ser feita próxima ao horário do exame, mas é justamente a meia-vida longa do germânio-68 que permite que o gerador continue produzindo gálio-68 por vários meses antes de precisar ser substituído (Mithun, 2021).

4.3. Calibração e Controle de Qualidade do Curiômetro

O curiômetro, também chamado de ativímetro ou calibrador de dose, é o instrumento responsável por medir a atividade dos radiofármacos antes de sua administração ao paciente. Como essa medição influencia diretamente a dose recebida pelo paciente e a qualidade do exame ou tratamento, a norma CNEN NN 3.05 estabelece um conjunto de testes de controle de qualidade específicos para esse equipamento (Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), 2013).

Figura 9: Curiômetro (medidor de atividade) modelo CRC-15W, utilizado para aferição da atividade dos radiofármacos na radiofarmácia.



Fonte: Autor (2026).

O curiômetro (Figura 9) é o modelo CRC-15W, equipamento responsável por medir a atividade dos radiofármacos preparados na radiofarmácia antes de sua administração ao paciente. Ele funciona como uma câmara de ionização do tipo poço, na qual a amostra radioativa é inserida para que sua atividade seja determinada com precisão, em becquerels (Bq) ou em suas unidades derivadas, como o megabecquerel (MBq) ou o gigabecquerel (GBq). É nesse equipamento que são realizados os testes de repetibilidade, exatidão, precisão e linearidade, detalhados a seguir, além da verificação final da dose de cada radiofármaco preparado, garantindo que a atividade administrada ao paciente esteja dentro do valor prescrito e dos limites de segurança estabelecidos pela norma CNEN NN 3.05 (Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), 2013).

4.3.1. Repetibilidade

Esse teste verifica a constância da resposta do curiômetro ao longo do tempo, utilizando fontes radioativas de referência, geralmente de meia-vida longa (como Cs-137, Ba-133 ou Co-57), cuja atividade praticamente não varia durante o período de uso do equipamento. As leituras obtidas em cada verificação são comparadas a valores previamente estabelecidos, sendo permitido um desvio máximo de 5%, caso esse limite seja ultrapassado, o curiômetro não deve continuar em uso até ser verificado e, se necessário, recalibrado. Por ser realizado diariamente, esse teste funciona como uma checagem rápida no início de cada dia de trabalho, conforme estabelecido no Anexo V da norma CNEN NN 3.05 (Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), 2013)

4.3.2. Exatidão

Esse teste compara os resultados obtidos pelo curiômetro com o valor de referência declarado no certificado de calibração de uma fonte padrão, verificando se a medição do equipamento corresponde à atividade real da fonte. Diferentemente do teste de repetibilidade, que avalia se o equipamento se mantém estável consigo mesmo ao longo do tempo, a exatidão avalia se ele mede corretamente o valor real da atividade. Por exigir fontes padronizadas com certificado de calibração rastreável, esse teste tem periodicidade semestral, sendo permitido um desvio máximo de 10% em relação ao valor de referência, conforme estabelecido no Anexo V da norma CNEN NN 3.05 (Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), 2013).

4.3.3. Precisão

Esse teste avalia a reprodutibilidade das medições do curiômetro, ou seja, sua capacidade de fornecer resultados consistentes em medições sucessivas de uma mesma fonte, nas mesmas condições. Um equipamento pode até apresentar exatidão adequada em uma única medição, mas mostrar variações inaceitáveis entre medições repetidas, o que comprometeria a confiabilidade das doses calculadas no dia a dia. A norma estabelece um limite de aceitação de $\pm 5\%$ para esse teste, com periodicidade semestral, conforme estabelecido no Anexo V da norma CNEN NN 3.05 (Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), 2013).

4.3.4. Linearidade

Esse teste verifica se a resposta do curiômetro permanece proporcional à atividade medida ao longo de toda a faixa de atividades utilizadas na rotina clínica, desde atividades baixas, típicas de procedimentos diagnósticos, até atividades mais altas, usadas em procedimentos terapêuticos. É realizado por meio de medições sequenciais de uma fonte de meia-vida curta, geralmente tecnécio-99m, registradas à medida que sua atividade decai naturalmente, permitindo construir uma curva de resposta do equipamento em função da atividade. Os resultados devem permanecer dentro de um intervalo de $\pm 10\%$ em relação ao valor esperado, e o teste tem periodicidade anual, conforme o Anexo V da norma CNEN NN 3.05 (Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), 2013).

4.3.5. Teste de Geometria

Esse teste verifica se os fatores de calibração do curiômetro permanecem corretos quando a amostra radioativa é medida em recipientes ou volumes diferentes daqueles utilizados nos testes de rotina, como seringas, frascos ou embalagens de diferentes tamanhos e formatos. Isso é necessário porque a geometria da amostra, ou seja, sua forma, volume e posicionamento dentro da câmara de ionização pode influenciar a eficiência de detecção do equipamento, mesmo quando a atividade real permanece a mesma. Sem essa correção, o curiômetro poderia indicar valores de atividade incorretos apenas por conta de uma mudança no tipo de recipiente utilizado, comprometendo a precisão da dose calculada. Por isso, esse teste é realizado anualmente, conforme estabelecido no Anexo V da norma CNEN NN 3.05 (Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), 2013).

Os testes de controle de qualidade do curiômetro (medidor de atividade) são fundamentais para garantir que a atividade dos radiofármacos administrados aos pacientes seja medida com exatidão e confiabilidade, uma vez que qualquer desvio nesse equipamento compromete diretamente o cálculo das doses prescritas. A Tabela 3 sintetiza os testes selecionados para detalhamento neste trabalho, conforme estabelecido no Anexo V da norma CNEN NN 3.05.

Tabela 3: Testes de controle de qualidade do curiômetro (medidor de atividade).

Teste	Periodicidade	Objetivo
Repetibilidade	Diário	Verificar a constância na resposta do equipamento para diferentes fontes de referência, dentro de um intervalo de $\pm 5\%$.
Exatidão	Semestral	Verificar a exatidão nas medidas do curiômetro por meio da utilização de fontes de referência, dentro de um intervalo de $\pm 10\%$.
Precisão	Semestral	Verificar a reprodutibilidade nas medidas do curiômetro por meio da utilização de fontes de referência, dentro de um intervalo de $\pm 5\%$.
Linearidade	Anual	Verificar a linearidade nas medidas do curiômetro através da utilização de uma fonte de meia-vida curta, dentro de um intervalo de $\pm 10\%$.
Teste de geometria	Anual	Verificar se os fatores de calibração do equipamento para recipientes e volumes diferentes daqueles usados nos testes usuais estão corretos.

Fonte: adaptado de CNEN NN 3.05, 2013(Anexo V).

Assim como observado nos equipamentos de imagem discutidos anteriormente, os testes do curiômetro combinam diferentes periodicidades de acordo com a sensibilidade de cada parâmetro avaliado: a repetibilidade, realizada diariamente, funciona como uma checagem rápida da estabilidade do equipamento no início de cada dia de trabalho, enquanto a exatidão e a precisão, de periodicidade semestral, avaliam de forma mais criteriosa a correspondência entre o valor medido e o valor real da atividade. Já a linearidade e o teste de geometria, realizados anualmente, avaliam o comportamento do equipamento em condições mais amplas de uso, garantindo que a resposta do curiômetro permaneça confiável tanto em diferentes faixas de atividade quanto em diferentes geometrias de amostra. Vale destacar que a norma CNEN NN 3.05 prevê, no mesmo Anexo V, testes diários adicionais (ajuste do zero,

radiação de fundo e alta voltagem), não abordados neste trabalho (Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), 2013).

5. GERENCIAMENTO DE REJEITOS RADIOATIVOS

Este capítulo aborda o gerenciamento dos rejeitos radioativos gerados em serviços de medicina nuclear, apresentando sua classificação segundo a norma CNEN NN 8.01, as etapas do processo de gerenciamento e os critérios de armazenamento e liberação desses materiais, com atenção especial aos rejeitos gerados em procedimentos de iodoterapia.

5.1. Classificação dos Rejeitos Radioativos

A norma CNEN NN 8.01 classifica os rejeitos radioativos em diferentes classes, de acordo com seu nível de atividade e sua meia-vida. Os Rejeitos Isentos (Classe 0) são aqueles cujos níveis de atividade ou concentração de atividade estão abaixo dos limites de dispensa estabelecidos pela norma, podendo ser descartados como resíduo comum, sem restrições radiológicas adicionais. Já os Rejeitos de Meia-Vida Muito Curta (Classe 1) possuem meia-vida inferior a 100 dias, característica que permite seu armazenamento até o decaimento completo, sendo posteriormente liberados sem restrições radiológicas. Os Rejeitos de Baixo e Médio Níveis de Radiação (Classe 2) apresentam meia-vida superior à dos rejeitos de Classe 1 e níveis de atividade mais elevados, exigindo depósitos específicos licenciados para seu armazenamento definitivo (Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), 2025).

Na rotina de um serviço de medicina nuclear, a maior parte dos rejeitos gerados corresponde a materiais contendo radionuclídeos de meia-vida curta, como o tecnécio-99m e o gálio-68, o que permite seu decaimento em um período relativamente curto de armazenamento antes da liberação (Ferreira et al., 2011), enquadrando-se predominantemente nas Classes 0 e 1 previstas na norma CNEN NN 8.01 (Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), 2025).

5.2. Etapas e Gerenciamento de Rejeitos

O gerenciamento dos rejeitos radioativos em serviços de medicina nuclear segue, de forma geral, quatro etapas principais: segregação, embalagem, armazenamento temporário e liberação. A segregação consiste na separação dos rejeitos radioativos dos demais resíduos comuns já no momento de sua geração, evitando a mistura de materiais com diferentes níveis de atividade. A embalagem garante o acondicionamento adequado do material, com identificação de seu conteúdo, origem, tipo de radionuclídeo e data de geração.

O armazenamento temporário ocorre em local monitorado, geralmente próximo à área onde os rejeitos são gerados, permitindo o decaimento gradual da atividade radioativa até que atinjam níveis seguros. Por fim, a liberação ocorre somente após a verificação de que a atividade do rejeito está abaixo dos limites de dispensa estabelecidos pela norma, permitindo seu descarte como resíduo comum (Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), 2025).

5.3. Armazenamento e Decaimento dos Rejeitos

O armazenamento dos rejeitos radioativos até seu decaimento é uma das etapas mais importantes do processo, especialmente considerando as meias-vidas relativamente curtas dos radionuclídeos utilizados na rotina clínica. Materiais como seringas, frascos, luvas e outros itens utilizados na manipulação de radiofármacos são armazenados de forma segregada e monitorada até que sua atividade atinja os níveis de dispensa estabelecidos pela norma CNEN NN 8.01 (Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), 2025). O acompanhamento da atividade desses rejeitos pode ser realizado com o auxílio de detectores como o Geiger-Müller, permitindo verificar se os níveis de radiação estão de acordo com os limites de liberação estabelecidos (Ferreira et al., 2011).

5.4. Rejeitos Gerados em Procedimentos de Iodoterapia

A iodoterapia é um tratamento utilizado principalmente em casos de câncer de tireoide e de hipertireoidismo, no qual o paciente recebe, por via oral, uma dose de iodo-131 na forma de cápsula ou solução líquida. Por ser um isótopo do iodo, o organismo o absorve de forma semelhante ao iodo natural, concentrando-se principalmente na glândula tireoide ou em tecidos remanescentes após cirurgia. Uma vez concentrado nesses tecidos, o iodo-131 emite radiação beta, responsável pelo efeito terapêutico de destruir células tireoidianas remanescentes ou metástases, e radiação gama, que permite, complementarmente, a obtenção de imagens de controle do tratamento (Instituto Nacional De Câncer, 2022; American Cancer Society, 2019).

Após a administração, o paciente permanece internado em um quarto terapêutico específico, projetado com blindagem radiológica adequada, até que sua atividade corporal residual atinja níveis considerados seguros para alta hospitalar. É justamente durante esse período de internação que são gerados os rejeitos radioativos associados ao procedimento, tratados a seguir.

Considerando que o iodo-131 administrado ao paciente é parcialmente eliminado pela urina, saliva e suor, os materiais utilizados durante o período de internação como roupas de cama, toalhas e utensílios descartáveis podem se contaminar e são tratados como rejeitos radioativos, armazenados adequadamente até seu decaimento, seguindo os mesmos critérios de segregação, monitoramento e liberação aplicados aos demais rejeitos do serviço (Ferreira et al., 2011).

Figura 10: Depósito de decaimento blindado com chumbo, utilizado para o armazenamento de rejeitos radioativos até que sua atividade atinja níveis seguros para descarte.



Fonte: GRX São Paulo, s.d.

Esses depósitos, como o ilustrado na Figura 10, permitem que os materiais contaminados fiquem devidamente segregados e monitorados durante todo o período necessário ao decaimento de sua atividade, evitando o descarte prematuro e o risco de exposição de trabalhadores e do público a esses rejeitos. Esse cuidado no armazenamento e na liberação dos rejeitos radioativos, discutido ao longo deste capítulo, está diretamente relacionado aos princípios de radioproteção que serão apresentados a seguir, uma vez que o gerenciamento adequado dos rejeitos é parte essencial da proteção radiológica de pacientes, trabalhadores e público em um serviço de medicina nuclear.

6. RADIOPROTEÇÃO EM SERVIÇOS DE MEDICINA NUCLEAR

Este capítulo aborda os princípios de radioproteção aplicados aos serviços de medicina nuclear, incluindo os fundamentos que orientam a proteção radiológica de pacientes, trabalhadores e público, a classificação das áreas de trabalho, a monitoração individual dos profissionais expostos à radiação e os cuidados específicos relacionados aos procedimentos terapêuticos, relacionando esses princípios às práticas de controle de qualidade discutidas nos capítulos anteriores.

6.1. Princípios Gerais de Radioproteção

A radioproteção em serviços que utilizam fontes de radiação ionizante, como a medicina nuclear, fundamenta-se em três princípios básicos, estabelecidos internacionalmente pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) e incorporados à legislação brasileira por meio da norma CNEN NN 3.01: justificação, otimização e limitação de dose.

O princípio da justificação estabelece que nenhuma prática envolvendo exposição à radiação deve ser adotada, a menos que produza um benefício líquido positivo ou seja, que os benefícios do procedimento superem os riscos radiológicos envolvidos. O princípio da otimização, também conhecido pelo termo ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*), determina que as doses de radiação devem ser mantidas tão baixas quanto razoavelmente exequíveis, levando em conta fatores econômicos e sociais. Já o princípio da limitação de dose estabelece valores máximos de dose que não podem ser ultrapassados em exposições ocupacionais e de público, garantindo um limite de segurança mesmo quando a otimização já foi aplicada (Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), 2024).

6.2. Classificação de Áreas e Sinalização

Os serviços de medicina nuclear são organizados em áreas classificadas de acordo com o nível de exposição à radiação esperado em cada ambiente, como forma de orientar o acesso e o comportamento dos profissionais e visitantes. Áreas onde há manipulação direta de fontes radioativas, como a radiofarmácia, as salas de exame (Gama Câmara e PET/CT) e os quartos destinados à iodoterapia, são classificadas como áreas controladas, exigindo sinalização específica com o símbolo internacional de radiação ionizante, além de restrições de acesso a pessoas não autorizadas (Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), 2013).

Não basta, porém, afixar o símbolo. A sinalização precisa informar também o que há ali: qual material, equipamento ou atividade justifica a classificação daquele espaço. Isso vale para os acessos às áreas supervisionadas, que devem ser identificados como tal. É essa indicação que torna o risco radiológico reconhecível de imediato, antes da entrada no ambiente. Cumprindo um papel fundamental na radioproteção ao comunicar de forma imediata o nível de risco radiológico de cada ambiente (Machado et al., 2011).

6.3. Monitoração Individual e Dosimetria

A monitoração individual é um dos pilares da radioproteção ocupacional em serviços de medicina nuclear, permitindo o acompanhamento contínuo da dose de radiação recebida por cada profissional exposto ao longo do tempo. Essa monitoração é realizada por meio de dosímetros individuais, de uso exclusivo de cada trabalhador, que devem ser armazenados no local apropriado ao término da jornada de trabalho (Machado et al., 2011), sendo posteriormente analisados por laboratórios acreditados, responsáveis por emitir os registros periódicos de dose acumulada de cada profissional (Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), 2024).

Os resultados da dosimetria individual são fundamentais para verificar se os limites de dose estabelecidos pela norma CNEN NN 3.01 estão sendo respeitados e para identificar precocemente eventuais desvios na rotina de trabalho que possam estar elevando a exposição de determinado profissional, permitindo ações corretivas antes que ocorram exposições significativas (Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), 2024).

6.4. Radioproteção em Procedimento de Iodoterapia

Os procedimentos de iodoterapia demandam cuidados de radioproteção específicos, tanto pela atividade elevada do iodo-131 administrado ao paciente quanto pelo fato de o paciente permanecer internado, tornando-se, temporariamente, uma fonte de radiação para os profissionais e demais pessoas ao seu redor. Por esse motivo, os quartos terapêuticos possuem estrutura de blindagem específica, e o acesso a eles é restrito durante o período de internação.

A liberação do paciente para alta hospitalar é realizada pelo Supervisor de Proteção Radiológica em conjunto com o médico nuclear, por meio de medições da taxa de dose a 2 metros do paciente, que deve ser inferior a 0,03 mSv/h para que a alta seja autorizada,

conforme os critérios estabelecidos pela norma (Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), 2013).

A liberação do quarto terapêutico, por sua vez, ocorre em um momento posterior à saída do paciente e está relacionada principalmente à possível contaminação radioativa residual presente em superfícies, no banheiro, na cama e em outros objetos do ambiente. Após a alta, o quarto deve ser monitorado, e qualquer contaminação encontrada deve ser removida antes que o ambiente possa ser utilizado por outro paciente. As roupas de cama, de banho e as vestimentas utilizadas durante a internação também devem ser monitoradas e, caso apresentem contaminação, armazenadas como rejeito radioativo até seu decaimento, conforme discutido na seção 5.4. Somente após a confirmação, por escrito, de que os níveis de contaminação estão dentro dos limites de segurança é que o ambiente pode ser liberado para nova ocupação ou para acesso de outros profissionais e visitantes (COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN), 2013).

6.5.A Relação entre Radioproteção e Controle de Qualidade

Embora radioproteção e controle de qualidade sejam frequentemente tratados como temas distintos, ambos estão profundamente interligados na rotina de um serviço de medicina nuclear. Equipamentos com desempenho comprometido, seja por falha de calibração, seja por desvios identificados nos testes de controle de qualidade discutidos nos capítulos anteriores, podem levar à necessidade de repetição de exames, aumentando desnecessariamente a exposição do paciente à radiação. Da mesma forma, uma radiofarmácia com procedimentos de preparo e calibração de dose inadequados pode resultar na administração de atividades acima ou abaixo do prescrito, comprometendo tanto a eficácia diagnóstica ou terapêutica quanto a segurança radiológica do paciente (Bailey et al., 2014).

É justamente nessa interseção entre qualidade técnica e segurança radiológica que se evidencia a importância do físico médico nos serviços de medicina nuclear, cujas responsabilidades básicas abrangem justamente a radioproteção, o controle de qualidade e a educação e treinamento da equipe (Dutra, s.d.). Sua atuação integrada nessas três frentes é o que garante, na prática, que os equipamentos funcionem dentro dos padrões esperados e que essa conformidade técnica resulte em menor exposição desnecessária de pacientes, trabalhadores e público à radiação ionizante.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo analisar os processos de controle de qualidade, radioproteção e gerenciamento de rejeitos radioativos em serviços de medicina nuclear, relacionando esses aspectos técnicos e operacionais aos fundamentos teóricos da física das radiações e às normas vigentes. Ao longo dos capítulos, buscou-se construir uma progressão lógica entre teoria e prática, partindo do histórico da especialidade e dos fundamentos físicos do decaimento radioativo até chegar aos processos técnicos que garantem a segurança e a qualidade dos procedimentos realizados nesses serviços.

A revisão do histórico da medicina nuclear evidenciou como a especialidade se consolidou a partir da descoberta da radioatividade e do desenvolvimento progressivo de equipamentos e radiofármacos, tornando-se, ao longo do século XX, uma área essencial tanto para o diagnóstico quanto para o tratamento de diversas doenças. Compreender essa trajetória histórica permite situar a importância atual da especialidade dentro do contexto mais amplo da saúde e da física aplicada à medicina.

Os fundamentos físicos da radiação e do decaimento radioativo, discutidos no Capítulo 2, mostraram-se essenciais para compreender por que diferentes radionuclídeos são escolhidos para diferentes finalidades clínicas. As distintas meias-vidas do tecnécio-99m, do iodo-131, do gálio-68 e do flúor-18 refletem diretamente a lógica que orienta sua aplicação prática, seja em exames diagnósticos de curta duração, seja em tratamentos terapêuticos que demandam radionuclídeos de meia-vida mais longa.

No que diz respeito ao controle de qualidade, discutido nos Capítulos 3 e 4, ficou evidente que a confiabilidade dos exames de medicina nuclear depende diretamente de rotinas rigorosas de verificação, tanto nos equipamentos de imagem PET/CT e Gama Câmara quanto nos instrumentos utilizados na radiofarmácia, como o curiômetro. A diversidade de testes exigidos pela norma CNEN NN 3.05, com periodicidades que variam de diárias a anuais, demonstra a complexidade e a responsabilidade envolvidas na manutenção da qualidade técnica desses serviços.

O gerenciamento de rejeitos radioativos, tratado no Capítulo 5, e os princípios de radioproteção, discutidos no Capítulo 6, reforçaram que a segurança em medicina nuclear não se limita à qualidade da imagem ou à precisão da dose administrada, mas envolve também a

proteção contínua de pacientes, trabalhadores e público ao longo de todo o processo desde a chegada do radiofármaco até o descarte seguro dos rejeitos gerados.

De forma geral, este trabalho evidenciou que o físico médico ocupa uma posição central em todas as etapas discutidas, atuando como o profissional responsável por integrar conhecimento técnico, rigor normativo e compromisso com a segurança radiológica. Espera-se que esta revisão contribua para a compreensão desses processos e sirva como material de referência para estudantes de Física Médica interessados na área de medicina nuclear, reforçando a relevância do controle de qualidade e da radioproteção como pilares fundamentais da prática segura e eficaz dessa especialidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN CANCER SOCIETY. *Radioactive iodine (radioiodine) therapy for thyroid cancer*. Atlanta: American Cancer Society, 2019. Disponível em: <https://www.cancer.org/cancer/types/thyroid-cancer/treating/radioactive-iodine.html>. Acesso em: 24 jul. 2026.
- BAILEY, D. L.; HUMM, J. L.; TODD-POKROPEK, A.; ASWEGEN, A. van (ed.). *Nuclear medicine physics: a handbook for teachers and students*. Viena: IAEA, 2014. Disponível em: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1617web-1294055.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2026.
- BIONUCLEAR. *Cintilografia óssea (MDP-tecnécio 99m)*. [S. l.]: Bionuclear, [s. d.]. Disponível em: <https://www.clinicabionuclear.com.br/servicos/cintilografia-ossea-mdp-tecnecio-99m>. Acesso em: 26 jul. 2026.
- CDI PREMIUM. *PET/CT*. [S. l.]: CDI Premium, [s. d.]. Disponível em: <https://cdipremium.com.br/exame-tipo/petct/>. Acesso em: 26 jul. 2026.
- CINT MEDICINA NUCLEAR. *Definição e história da medicina nuclear*. Santa Maria: CINT, 2015. Disponível em: <http://cintnuclear.com.br/2015/10/02/definicao-e-historia-da-medicina-nuclear/>. Acesso em: 24 jul. 2026.
- CNEN – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *Norma CNEN NN 3.05: requisitos de segurança e proteção radiológica para serviços de medicina nuclear*. Rio de Janeiro: CNEN, 2013. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/grupo-3/grupo3-nrm305.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2026.
- CNEN – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *Norma CNEN NN 6.02: licenciamento de instalações radiativas*. Rio de Janeiro: CNEN, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/grupo-6/NormaCNENNN6.02.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2026.
- CNEN – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *Norma CNEN NN 3.01: diretrizes básicas de proteção radiológica*. Rio de Janeiro: CNEN, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/grupo-3/NormaCNENNN3.01.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2026.

CNEN – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *Norma CNEN NN 8.01*: gerência de rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação. Rio de Janeiro: CNEN, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/grupo-8/NormaCNENNN8.01.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2026.

DUTRA, J. *O físico médico na medicina nuclear*. Rio de Janeiro: Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, [s. d.]. Disponível em: <https://www.if.ufrj.br/~sandra/Topicos/palestras/janaina.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2026.

FERREIRA, F. C. L.; MAGALHÃES, C. M. S.; COSTA, N. V.; LIMA, L. L.; CARDOSO, L. X.; CUNHA, C. J.; SOUZA, S. O. Avaliação de rejeitos radioativos em serviços de medicina nuclear no estado de Sergipe. *Scientia Plena*, v. 5, n. 4, 2011. Disponível em: <https://www.scientiaplena.org.br/sp/article/view/626>. Acesso em: 23 jul. 2026.

GRX SÃO PAULO. Caixa (depósito) de decaimento rejeitos radioativos G001. [S. l.]: Grupo GRX São Paulo, [s. d.]. Disponível em: <https://www.grxsp.com.br/medicina-nuclear/caixa-deposito-decaimento-rejeitos-radioativos-g001.html>. Acesso em: 15 set. 2026.

IAEA – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Quality assurance for PET and PET/CT systems*. Viena: IAEA, 2009. (IAEA Human Health Series, n. 1). Disponível em: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1393_web.pdf. Acesso em: 26 jul. 2026.

IAEA – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Nuclear medicine resources manual*. Viena: IAEA, 2020. (IAEA Human Health Series, n. 37). Disponível em: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1861_web.pdf. Acesso em: 23 jul. 2026.

IAEA – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Equipment – nuclear medicine*. Viena: IAEA, [s. d.]. Disponível em: <https://www.iaea.org/resources/hhc/medical-physics/nuclear-medicine/equipment>. Acesso em: 26 jul. 2026.

INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER (INCA). *Protocolo unificado para o tratamento das neoplasias malignas não hematológicas*. Rio de Janeiro: INCA, 2022. Disponível em: https://www.inca.gov.br/sites/ufu.sti.inca.local/files/media/document/protocolo_unificado_neoplasias_malignas_nao_hematologicas_fevereiro_2022.pdf. Acesso em: 24 jul. 2026.

KUBO, T. T. A.; BIANCARDI, R.; ROCHA, A. M. G.; FERREIRA, D. R.; SILVA, F. A. A.; ASSUNÇÃO, J. B. A.; ALVES, E. H.; ALMEIDA, A. F. B.; ALVES, N. F.; XAVIER, F. H. Z.; GONTIJO, R. M. G.; MAMEDE, M. Avaliação dos serviços de medicina nuclear do estado de Minas Gerais: programa de garantia da qualidade dos equipamentos. *Revista Brasileira de Física*

Médica, v. 11, n. 1, 2017. Disponível em: <https://www.rbfm.org.br/rbfm/article/view/404>. Acesso em: 23 jul. 2026.

MACHADO, M. A. D.; MENEZES, V. O.; QUEIROZ, C. C.; SILVA, D. C.; SAMPAIO, L. J. L.; ALMEIDA, A. Revisão: radioproteção aplicada à medicina nuclear. *Revista Brasileira de Física Médica*, v. 4, n. 3, p. 47-52, 2011. Disponível em: <https://rbfm.org.br/rbfm/article/download/97/v4n3p47>. Acesso em: 23 jul. 2026.

MEDISO. *Nucline*. [S. l.]: Mediso, [s. d.]. Disponível em: <https://www.medicalexpo.com/pt/prod/mediso/product-94149-1042118.html>. Acesso em: 26 jul. 2026.

MESQUITA, S. A.; SANTOS, S. N. dos. Alguns aspectos sobre geradores e radiofármacos de tecnécio-99m e seus controles de qualidade. *Radiologia Brasileira*, v. 44, n. 1, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rb/a/mrGwJg6TmmYtqBNs5GGfWRB/?lang=pt>. Acesso em: 24 jul. 2026.

MITHUN, S. An overview of ^{68}Ga labelled radiopharmaceuticals. In: ANNUAL CONFERENCE OF NUCLEAR MEDICINE PHYSICISTS ASSOCIATION OF INDIA, 5., 2021, Palghar. *Anais [...]*. Palghar: NMPAI, 2021. p. 5-6. Disponível em: <https://inis.iaea.org/records/76m4a-dwc52>. Acesso em: 26 jul. 2026.

MULTIMAGEM. *PET/CT (PET scan)*. [S. l.]: Multimagem, [s. d.]. Disponível em: <https://www.multimagem.med.br/pet-ct-pet-scan.asp>. Acesso em: 26 jul. 2026.