

INSTITUTO DE RADIOPROTEÇÃO E DOSIMETRIA

Fernando de Souza Duarte Junior

A TÉCNICA SPECT/CT

Rio de Janeiro

2016

Fernando de Souza Duarte Junior

A TÉCNICA SPECT/CT

Trabalho de conclusão do curso de Pós
Graduação em Proteção Radiológica e
Segurança de Fontes Radioativas IRD/AIEA
apresentado ao Instituto de Radioproteção e
Dosimetria – IRD

Orientadora: DSc. Lidia Vasconcellos de Sá

Rio de Janeiro

Agosto 2016

Ficha Catalográfica

Duarte Junior, Fernando de Souza

A Técnica SPECT/CT / Fernando de Souza Duarte Junior – Rio de Janeiro:

IRD, 2016.

xiv, XX f. : il. ; 29cm.

Orientador: Lidia Vasconcellos de Sá

Trabalho de Conclusão de Curso (Lato-Sensu) – Instituto de Radioproteção e Dosimetria.

Referências bibliográficas:

1. SPECT/CT. 2. Imagens Híbridas. 3. Medicina Nuclear

Fernando de Souza Duarte Junior

A TÉCNICA SPECT/CT

Rio de Janeiro, 26 de Agosto de 2016.

Prof. DSc. Aucyone Augusto da Silva – IRD/CNEN

Prof^a. DSc. Simone Kodlulovich Renha – IRD/CNEN

Prof^a. DSc. Lidia Vasconcellos de Sá – IRD/CNEN

O presente trabalho foi desenvolvido no Instituto de Radioproteção e Dosimetria da Comissão Nacional de Energia Nuclear, sob orientação da Prof.^a DSc. Lidia Vasconcelos de Sá.

RESUMO

A tomografia computadorizada por emissão de fóton único (SPECT), associada à tomografia computadorizada (CT) se tornou um dos mais importantes equipamentos híbridos para obtenção de imagens clínicas desde que foram produzidos em um único equipamento, no início dos anos 90. Unindo princípios de medicina nuclear e da radiologia, o SPECT/CT é capaz de unir em uma única imagem detalhes fisiológicos e anatômicos que melhoram muito a especificidade e localização exata, planejamento do tratamento e estadiamento de doenças.

O SPECT/CT tem demonstrado ser uma poderosa ferramenta na tomada de decisões em diagnósticos no campo da oncologia, ortopedia, na avaliação de inflamações, na cardiologia, entre outros.

Como qualquer prática que utiliza radiações ionizantes, o uso do SPECT/CT requer cuidados e normatização no seu uso. A Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) constantemente emite recomendações para a aplicação das boas práticas no que se trata da proteção radiológica. No Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) é o órgão responsável pela regulação do uso de fontes radioativas abertas, enquanto a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) regula as práticas de radiodiagnóstico, juntas elas garantem que o uso do SPECT/CT traga mais benefícios do que detrimientos para a saúde humana.

A avaliação das doses recebidas pelos pacientes provenientes de um equipamento híbrido tem sido bem documentada para exames de medicina nuclear em PET/CT (Tomografia por emissão de pósitrons associada à tomografia computadorizada), mas pouco documentada para o SPECT/CT.

Com inúmeras aplicações conhecidas e outras ainda em desenvolvimento, fica claro que o SPECT/CT ainda tem muito que evoluir no campo do diagnóstico já que as pesquisas avançam tanto no desenvolvimento de novos equipamentos, quanto no desenvolvimento de novos radiofármacos.

Este trabalho tem como objetivo revisar as aplicações da técnica SPECT/CT, com suas vantagens e restrições, de forma a fornecer uma visão ampla do seu uso atual.

Palavras chaves: SPECT/CT, Imagens Híbridas, Medicina Nuclear.

ABSTRACT

The single photon emission computed tomography (SPECT) associated with computed tomography (CT) became one of the most important hybrids equipment for obtaining clinical images since they were produced into a single device at the beginning of 90's. Bringing medical principles of the radiology, SPECT / CT is able to unite, into a single image, physiological and anatomical details that greatly enhance the specificity and exact location, treatment planning and staging of diseases.

The SPECT/CT has shown to be a powerful tool in decision making in diagnostics in the field of oncology, orthopedics, inflammation, and cardiology, among others.

Like any practice that uses ionizing radiation, the SPECT / CT requires care and regulation in use. The International Atomic Energy Agency (IAEA) constantly makes recommendations for the application of good practice related to radiation protection. In Brazil, the Brazilian Nuclear Energy Commission (CNEN) is the body responsible for regulating the use of radioactive sources, while the Brazilian National Health Surveillance Agency (ANVISA) regulates diagnostic radiology practices, both together they ensure that the use of SPECT/CT bring more benefits than detriments to human health.

The assessment of the doses received by patients from a hybrid equipment has been well documented for nuclear medicine examinations in PET / CT (Positron emission tomography associated with computed tomography), but few documented for SPECT/CT exams.

With many known applications and others being developed, it is clear that the SPECT/CT technique has still much to expand in diagnostic field because the research advances and the increase developments of new equipment, and new radiopharmaceuticals productions.

This paper aims to will provide a review the applications of SPECT / CT technique with its advantages and restrictions, and of its current use.

With a wide known and other application still in development, it is clear that the SPECT/CT still has a lot to develop in the field of diagnostics since the research advance in both the development of new equipment, and the development of new radiopharmaceuticals.

Keywords: SPECT/CT, Hybrid Images, Nuclear Medicine.

Figuras

1	Foto do Físico George Charles Hevesy.....	4
2	Gama Câmara com um, dois e três detectores (cabeças).....	7
3	Funcionamento da Gama Câmara.....	9
4	Equipamentos SPECT/CT <i>GE Infinia e Hawkeye 4</i>	12
5	Equipamentos SPECT/CT <i>GE Discovery NM/CT 670 e NM/CT 670 Pro</i>	13
6	Equipamentos SPECT/CT <i>GE Optima NM/CT 640</i>	14
7	Equipamentos SPECT/CT <i>GE Discovery NM/CT 670 CZT</i>	15
8	Equipamentos SPECT/CT <i>Philips Precedence e Brightview XCT</i>	16
9	Equipamento SPECT/CT <i>Siemens Symbia T16</i>	17
10	Principais exames de medicina nuclear.....	21
11	Imagem SPECT/CT do carcinoma diferenciado de tireoide.....	29
12	Exame de tireoide realizado após administração de Iodo-131.....	30
13	Imagem de cintilografia planar.....	31
14	Informações adicionais sobre cintilografia planar fornecida por SPECT/CT....	33
15	Imagem fusionadas de uma vértebra lombar em SPECT/CT.....	34
16	Cintilografia esquelética após um trauma recente.....	35
17	Imagem SPECT/CT realizada após a administração de Tório-201.....	36
18	Imagens SPECT/CT transaxiais, coronais e sagitais.....	37
19	Imagens SPECT/CT de adenomas de paratireoides.....	39
20	Imagem SPECT/CT de diferentes formas de osteomielite.....	41
21	Layout de uma sala típica para um sistema SPECT/CT.....	45

Tabelas

1	Radionuclídeos mais utilizados na medicina nuclear e seus processos de produção.....	20
2	Testes de controle de qualidade – Câmara Cintilográfica (CNEN).....	23
3	Testes de controle de qualidade – Câmara Cintilográfica (ANVISA).....	25
4	Testes de controle de qualidade – CT (ANVISA).....	27
5	Doses efetivas observadas para alguns exames típicos de Medicina Nuclear...	48
6	Aumento percentual de dose efetiva para exames típicos de medicina nuclear SPECT/CT devido à porção CT.....	48

Abreviaturas e Siglas

SPECT	Single Photon Emission Computed Tomography
CT	Computed Tomography
IAEA	International Atomic Energy Agency
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
PET	Positron Emission Tomography
2-D	Duas Dimensões
3-D	Três Dimensões
GE	General Electric
CdZnTe	Cádmio, Zinco e Telúrio
mV	Milivolt
mA	MiliAmpère
NM	Nuclear Medicine
PMT	Photomultiplier
KeV	Quilo elétrons-volt
β	Radiação Beta
γ	Radiação Gama
MBq	Megabequerel
GBq	Gigabequerel
MDP	Methylene Diphosphonate
FDG	Fludeoxyglucose
HMPAO	Hexamethylpropylene Amine Oxime
mSv	Milisievert

Abreviaturas e Siglas (continuação)

Lb/ft ³	Pound/Cubic Foot
ICRP	International Commission on Radiological Protection
MIBG	Metaiodobenzylguanidine

Sumário

1	Introdução.....	1
2	Fundamentos Teóricos.....	3
2.1	Breve histórico da Medicina Nuclear.....	3
2.2	A tecnologia SPECT (<i>Single Photon Emission Tomography</i>).....	5
2.3	A tecnologia SPECT/CT.....	9
2.4	Equipamentos.....	10
2.4.1	Fabricante <i>General Electric - GE Health Care</i>	11
2.4.2	Fabricante <i>Philips</i>	16
2.4.3	Fabricante <i>Siemens</i>	17
2.5	Radiofármacos.....	18
2.6	Controle de Qualidade.....	22
3	Aplicações Clínicas.....	28
4	Proteção radiológica relacionada ao SPECT/CT.....	45
5	Dosimetria em SPECT híbrido / CT.....	48
6	Conclusão.....	51
7	Referências bibliográficas.....	52

1 INTRODUÇÃO

A medicina nuclear é o uso de radionuclídeos em medicina para diagnóstico, acompanhamento da doença, terapia e acompanhamento da resposta a uma doença. É também uma poderosa ferramenta de translação nas ciências básicas, tais como a biologia, na descoberta de drogas medicinais e pré-clínicas. Os desenvolvimentos em medicina nuclear são conduzidos pelos avanços desta ciência multidisciplinar que inclui a física, química, computação, matemática, biologia e farmacologia (IAEA, 2008).

Na época em que a tomografia por emissão de pósitrons (*Pósitron Emission Tomography-PET*) parece constituir a aplicação mais avançada da medicina nuclear, ainda assim o procedimento convencional da tomografia computadorizada por emissão de fóton único (*Single Photon Emission Computed Tomography-SPECT*) está longe de ser obsoleto, especialmente se combinado com a tomografia computadorizada (TC). Esta dupla modalidade técnica de imagem (*Single Photon Emission Computed Tomography / Computed Tomography-SPECT/CT*) presta-se a uma ampla variedade de aplicações de diagnóstico úteis cujo impacto clínico é, na maioria dos casos, já bem estabelecido, mas apresenta crescimento acelerado em aplicações mais recentes. O aumento da disponibilidade de novos equipamentos híbridos SPECT/CT com tecnologia avançada tem proporcionado melhorias no diagnóstico. As principais vantagens de SPECT/CT são representadas por uma melhor correção de atenuação, aumento da especificidade e descrição precisa da localização da doença, além do possível envolvimento de tecidos vizinhos na patologia estudada. Tumores endócrinos e neuroendócrinos são precisamente localizados e caracterizados por SPECT/CT, como também os nódulos solitários de pulmão, tumores de cérebro, linfomas, câncer de próstata, lesões ósseas malignas e benignas, e infecções. Além disso, o SPECT/CT é especialmente adequado ao apoio das crescentes aplicações de cirurgia minimamente invasiva, bem como em definir com precisão o perfil diagnóstico e prognóstico de pacientes com doenças cardiovasculares. Finalmente, as aplicações de SPECT/CT para outros distúrbios clínicos ou tumores malignos encontra-se atualmente sob investigação extensa, com bons resultados em termos de precisão do diagnóstico (Mariani *et al*, 2010).

As imagens em SPECT/CT podem ainda ser obtidas e analisadas separadamente, se assim for de interesse médico tornando-se, dessa forma, um equipamento da medicina nuclear ou um tomógrafo utilizado na radiologia convencional. Estima-se que o

SPECT/CT seja 30% mais eficaz que o SPECT dedicado em diagnosticar mais precisamente doenças dentro de seu raio de ação (IAEA, 2008).

Esse trabalho se propõe a apresentar uma revisão geral das aplicações, doses relacionadas, controle de qualidade e proteção radiológica, dos aparelhos SPECT/CT mais modernos apresentados pelos principais fabricantes.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Breve histórico da Medicina Nuclear

A Organização Mundial da Saúde define a Medicina Nuclear como uma especialidade de diagnóstico, tratamento e investigação médica mediante o uso de radioisótopos como fontes radioativas administradas ao paciente. Trata-se de uma especialidade médica que se fundamenta na utilização da energia nuclear para fins médicos de diagnóstico e de terapia mediante o uso de substâncias conhecidas na física como isótopos radioativos (Sá, 2015).

Como recurso diagnóstico, a Medicina Nuclear é um meio seguro e eficiente, em geral indolor e não invasivo, para se obter informações que, de outra maneira, seriam impossíveis de conseguir. Apresenta procedimentos de alta sensibilidade na avaliação de anormalidades na estrutura e na função dos órgãos estudados, podendo identificar precocemente alterações orgânicas e funcionais em relação a outros métodos diagnósticos. A especialidade é atualmente utilizada no diagnóstico e acompanhamento de enfermidades cardíacas, oncológicas, endócrinas, traumatológicas, renais e pulmonares, entre outras (Sá, 2015).

Além de seu uso no diagnóstico, a medicina nuclear permite acompanhar a evolução, a remissão de certas enfermidades. Como recurso usado na terapia, também é um meio seguro, indolor e não invasivo, além de eficiente e de baixo custo para tratar certas afecções benignas e malignas curáveis com irradiação. As pequenas doses utilizadas e o fato de que a irradiação ocorre quase que exclusivamente nas células e tecidos alvo têm a vantagem de irradiar pouco os pacientes e quase não apresentar efeitos colaterais. A irradiação com isótopos tem, também, utilidade como paliativo contra a dor provocada por metástases ósseas, quando outros métodos forem ineficientes para aliviar o sofrimento dos pacientes (Sá, 2015).

As substâncias radioativas utilizadas em Medicina Nuclear são chamadas de traçadores porque sua passagem pelo corpo humano pode ser acompanhada externamente por meio de equipamentos, detectores de radiação, em um sistema capaz de formar imagens dos locais de emissão (Barros e Couto, 2015).

A Medicina Nuclear começou a se esboçar quando Hevesy, Figura 1, em 1923, utilizou pela primeira vez um traçador natural em uma exploração biológica. O passo seguinte, em 1934, foi a aplicação dos isótopos no campo do diagnóstico, quando começaram os primeiros estudos da fisiologia da glândula tireoide, mediante a utilização de isótopos artificiais do iodo. Inicialmente foi utilizado o iodo-128 (^{128}I) e logo a seguir foi usado o iodo-131 (^{131}I). Cinco anos depois, a Medicina Nuclear passou a atuar no campo da terapia, com as primeiras aplicações terapêuticas do iodo-131 (^{131}I) no tratamento das doenças tireoidianas. Pouco tempo depois, o mesmo isótopo do iodo foi usado como método de investigação em hematologia, servindo para medir o volume sanguíneo total, volume plasmático e volume corpuscular e, ainda, para determinar a sobrevivência dos glóbulos vermelhos. Aos poucos, a nova especialidade médica, incorporou outros estudos até chegar ao conjunto complexo de procedimentos que são realizados hoje (Barros e Couto, 2015).



Figura 1: Foto do Físico George Charles de Hevesy (nascido Hevesy György, também conhecido como Georg Karl von Hevesy)

Na história resumida da Medicina Nuclear três cronologias de eventos devem ser examinadas. Uma, referente ao desenvolvimento dos equipamentos, outra, relacionada à geração de radioisótopos utilizáveis em diagnóstico e terapia e, a terceira, que diz respeito às investigações laboratoriais com traçadores (Barros e Couto, 2015).

A partir de 1946, começou o desenvolvimento e fabricação de equipamentos especiais para transformar as informações fornecidas pelos traçadores em imagens, com fins diagnósticos, cujo avanço principal data de 1951, quando foi inventado por Benedict Cassen o *scanner* com cristal de iodeto de sódio, ou cristal de cintilação que originou o

nome *cintilografia* para as imagens utilizadas em Medicina Nuclear. Em 1963, novo avanço tecnológico foi registrado com o aparecimento da câmara de cintilação inventada por Anger, equipamento que, além de dar qualidade às imagens cintilográficas, apresentava métodos de reconstrução formando imagens dos órgãos inteiros. Este foi o ponto de partida para os equipamentos atuais de tomografia cintilográfica conhecidos como SPECT (acrônimo composto das letras iniciais das palavras inglesas *Single Photon Emission Computed Tomography*) e o PET (*Pósitron Emission Tomography*) (Mariani *et al*, 2010).

Simultaneamente à evolução dos equipamentos, desenvolveu-se a radiofarmácia, especialidade farmacêutica que elabora as substâncias utilizadas em Medicina Nuclear, cujo principal marco histórico ocorreu em 1962, quando apareceram os geradores de Tecnécio-99 metaestável (^{99m}Tc), hoje o isótopo de maior uso na Medicina Nuclear (Mariani *et al*, 2010).

A fase laboratorial da Medicina Nuclear tomou impulso a partir do ano de 1956, quando começou a evolução dos processos de análises de fluídos orgânicos mediante a utilização de traçadores, técnica conhecida como radioimunoensaio (Mariani *et al*, 2010).

2.2 A tecnologia SPECT (*Single Photon Emission Tomography*)

O primeiro dispositivo de tomografia computadorizada por emissão foi denominado MARK IV e foi desenvolvido por Edwards e Kuhl. O MARK IV consistia em diversos bancos de detectores de fótons de Iodeto de Sódio (NaI), arrançados de forma retangular em torno da cabeça do paciente. O primeiro dispositivo comercial da tomografia por emissão de fóton único (SPECT) era similar no desenho ao projeto MARK IV, mas tinha 32 detectores de fótons e foi chamado de Tomomatic-32. As primeiras aplicações resultaram em imagens que do ponto de vista do diagnóstico não eram úteis, e a técnica não obteve aceitação de forma generalizada. Apenas quando os métodos evoluíram durante a introdução da tomografia computadorizada por raios X (CT) por Hounsfield e por Cormack na tomografia por emissão da medicina nuclear, esta modalidade passou a ganhar a atenção da comunidade médica. Os algoritmos de reconstrução desenvolvidos para o CT de raios X tiveram que ser reformulados para o SPECT de modo a se levar em conta os efeitos de atenuação dos fótons e de espalhamento no corpo humano. Quando se conseguiu técnicas de reconstrução de imagem tais como o FBP (retroprojeção

filtrada) produziram-se imagens SPECT que, pela primeira vez, permitiram uma análise qualitativa e que foram consideradas quantitativamente válidas para uso clínico (Barros e Couto, 2015).

O SPECT corresponde a Tomografia por Emissão de Fóton Único (*Single Photon Emission Computed Tomography*), sendo uma forma de Tomografia Computadorizada. Como o nome sugere, a emissão de raios gama constitui a fonte de informação, em vez de transmissões de raios X, tal como é utilizado em Tomografia Computadorizada. Ao contrário de outras modalidades tais como a Ressonância Magnética Nuclear e os equipamentos emissores de raios X, o SPECT obtém imagens da função do organismo e não da anatomia no sentido restrito (Barros e Couto, 2015).

O SPECT envolve a detecção de radiação gama emitida somente por elementos radioativos, chamados radionuclídeos, tais como o Tecnécio-99m e Tálcio-201, permitindo a aquisição de informação funcional do órgão de um paciente ou sobre um sistema específico do corpo, pela especificidade do traçador. Este traçador, ou radiofármaco, é injetado, ingerido, ou inalado e são, em sua maioria, proteínas e moléculas orgânicas selecionadas com base em suas propriedades de absorção dentro do corpo humano. Por exemplo, alguns radiofármacos são coletados nos músculos do coração e são utilizados para aquisição de imagem SPECT cardíaca. Outros são direcionados para os pulmões e são usados para exames SPECT de perfusão pulmonar. Muitos são utilizados de maneira a possibilitar a execução de exames SPECT em outras áreas do corpo. Quando o isótopo radioativo decai, tendo por resultado a emissão de raios gama que, após interação com os detectores (um, dois ou três, conforme figura 2A, B e C) e o processamento eletrônico do sinal, formarão uma imagem do que acontece dentro do corpo do paciente. Assim, de modo geral, um órgão saudável irá absorver uma determinada quantidade de radiofármaco, que irá aparecer como uma área brilhante em imagem SPECT. Uma absorção anormal de radiofármaco terá como consequência o surgimento de uma área mais clara ou mais escura do que o brilho padrão na imagem SPECT, levantando a suspeita da presença de um estado de doença (Barros e Couto, 2015).

A gama câmara pode ser usada no processamento planar de modo a adquirir imagens (2-D) bidimensionais, ou em processamento SPECT para adquirir imagens (3-D) tridimensionais. A contagem dos raios gama provenientes do corpo do paciente são digitalizados e guardados no computador na forma de uma matriz de imagem. As matrizes

típicas usadas em aquisição de imagem SPECT são: 256x256, 128x128, 128x64, 64x64 pixels. A terceira dimensão corresponde ao número de camadas transaxiais, frontais ou coronais, usadas para definir o órgão que está sendo pesquisado (Barros e Couto, 2015).

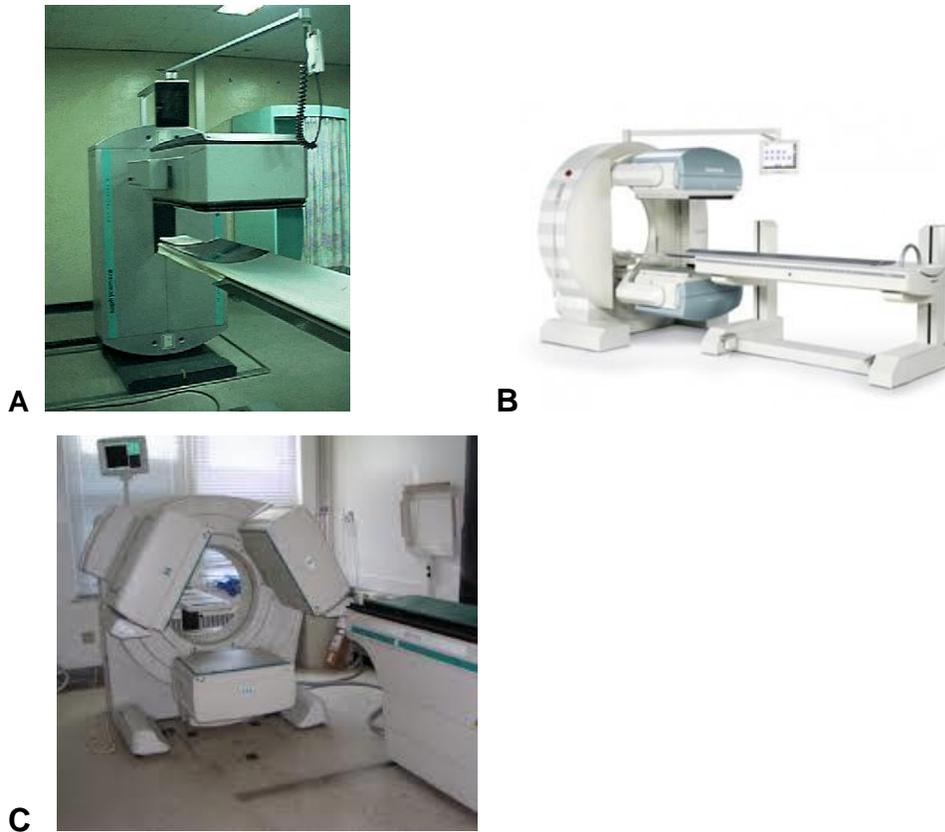


Figura 2: Gama câmaras de um (A), dois (B) e três (C) detectores (cabeças) (Sá, 2015).

A emissão (3-D) tridimensional da tomografia computadorizada fornece um olhar qualitativo e quantitativo da distribuição de um volume de radioisótopo após a sua administração no corpo humano. O SPECT, junto com a imagem planar (2-D) bidimensional, é a técnica de aquisição de imagem principalmente utilizada em departamentos de medicina nuclear. O SPECT tridimensional, um processo que envolve a rotação de até três detectores (câmaras gama) em torno de um paciente, resulta em uma imagem 3-D da distribuição de um radiofármaco injetado com afinidade a um órgão em particular, como por exemplo, o coração. A imagem 3-D assim obtida é o resultado da reconstrução de uma série de projeções 2-D, que "empilham-se" de modo a criar a terceira dimensão (Barros e Couto, 2015).

Quando um exame SPECT for completamente realizado, a informação sem tratamento contida na matriz de imagem é denominada de informação projetada e está pronta para ser reconstruída. O processo de reconstrução coloca a informação na sua forma final digital, pronta a ser transmitida para outro computador ou sistema para posterior visualização e análise física.

O equipamento SPECT pode ser representado por três componentes principais:

- *Gantry* (Portal)
- Maca do paciente
- Computador de processamento e *display* de imagem

No *gantry* encontra-se o sistema de detecção, onde os raios gama que incidem perpendiculares ao colimador, interagem com os detectores produzindo a cintilação. Os fótons são coletados pelas fotomultiplicadoras, gerando um sinal elétrico que será multiplicado em forma de um pulso. Esse passará, então, por um analisador de altura de pulso, onde serão registrados apenas os que se encontram dentro de uma janela de energia determinada para cada radionuclídeo. Dessa forma, o sinal resultante apresentará três componentes: dois relacionados à localização do evento no corpo do paciente, nos eixos X e Y , e o terceiro (Z), relacionado à energia do gama emitido (Sá, 2015).

Finalmente, os três sinais serão processados por softwares específicos de reconstrução de imagem, com as coordenadas X e Y relacionadas a cada pixel da matriz de aquisição estabelecida. A figura 3 representa o esquema geral de detecção de uma gama câmara (Sá, 2015).

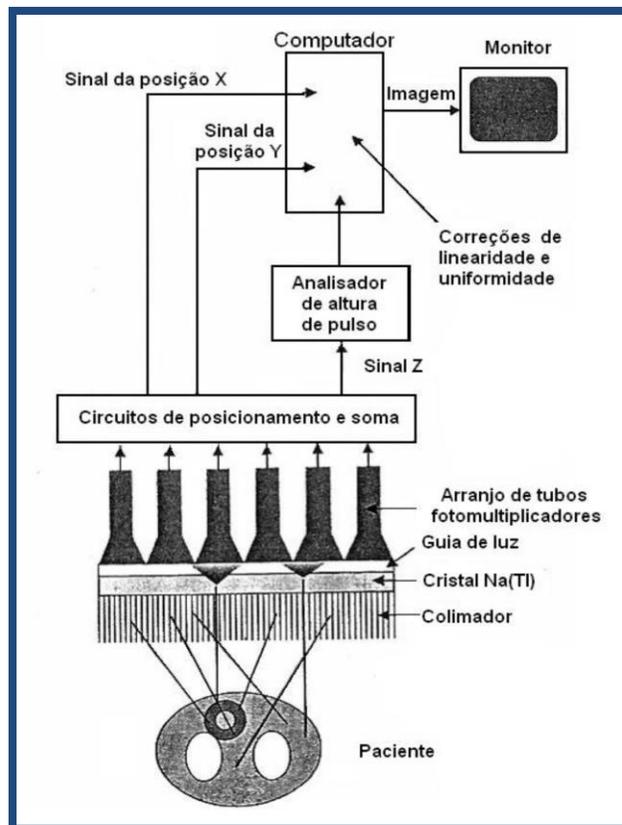


Figura 3 - Princípio de funcionamento de uma câmara gama: os raios gama passam pelo colimador e interagem com o detector (cristal de NaI (TI)), são coletados pelas fotomultiplicadoras que transformam os fótons em sinais elétricos, fornecendo três sinais: X, Y de localização do evento e Z relacionado a altura do pulso (Sá, 2015).

2.3 A tecnologia SPECT/CT

Comercialmente essa tecnologia híbrida foi lançada em 1999, com a função de unir um tubo de raios X de baixa energia a um detector de raios gama, em um mesmo portal (*gantry*) (Mariani *et al*, 2010).

A recente introdução de sistemas híbridos que combinam um SPECT e CT em medicina nuclear melhorou muito a precisão de diagnóstico para indicações clínicas particulares, devido à possibilidade de atenuação e/ou correção de dispersão das imagens funcionais SPECT e a disponibilidade de informações anatômicas úteis. Embora o desempenho de câmeras gama sejam visivelmente comparáveis, os tomógrafos

computadorizados (CT) associados fornecidos por fabricantes distintos são relativamente diferentes uns dos outros. Seja qual for o sistema, é a introdução de CT em medicina nuclear diagnóstica que resulta em um aumento significativo da dose recebida pelo paciente. Este aumento de dose deve ser justificado e otimizado, considerando tanto a questão clínica quanto as configurações disponíveis do CT nesses sistemas. A instalação de um sistema híbrido deve ser acompanhada pela elaboração de um programa de qualidade, documentado e seguro, desenvolvido em conjunto pelos tecnólogos, físicos e médicos, tanto cobrindo a aplicação clínica quanto a dosimetria associada às questões relacionadas ao controle do desempenho individual de cada equipamento (Mariani *et al*, 2010).

Para uma melhor aquisição de informação em um sistema híbrido de forma geral, no *gantry* encontram-se detectores tipo gama câmara de duas cabeças para detectar os fótons provenientes dos radiofármacos (sistema SPECT) alinhados de maneira contrária à fonte de raios X e seu detector (sistema CT) evitando, assim, danos aos detectores SPECT que utilizam baixa taxa de contagem de fótons (Mariani *et al*, 2010).

Na estação de trabalho o sistema é controlado e são visualizadas, na mesma tela, as imagens obtidas separadamente, ou fusionadas. As imagens podem ainda ser visualizadas em três dimensões, a fim de localizar com mais precisão órgãos ou tecidos de interesse, lesões ou tumores (IAEA, 2008).

Sistemas SPECT/CT usando um componente de CT diagnóstico são caracterizados por maior resolução espacial e tempo de digitalização mais rápido (aproximadamente 30s para análise de corpo inteiro), no entanto estão associados a doses mais elevadas de radiação (IAEA, 2008).

2.4 Equipamentos

A utilização conjunta de SPECT e CT para a correção de atenuação das imagens moleculares baseia-se na utilização do mapa de atenuação de fótons X para corrigir imagens de emissão dos fótons gama (SPECT) distribuídos em tecido mole, melhorando assim a relação sinal-ruído em órgãos ou tecidos mais profundos (Hapday *et al*, 2009).

Os primeiros sistemas disponíveis utilizavam fontes radioativas, o que trouxe problemas significativos de proteção radiológica já que alongava substancialmente a

tempo de aquisição de exploração pelo SPECT. Outra abordagem foi fazer uma aquisição SPECT e outra de CT em equipamentos distintos, não inseridos no mesmo *gantry*, apenas realizando a fusão das duas imagens por pontos de marcação anatômica, levando, porém, a problemas de registro devido ao posicionamento e mesmo ao movimento do paciente entre os dois exames. De fato, o rápido desenvolvimento da tecnologia híbrida PET/CT (Tomografia por emissão de pósitrons acoplada à tomografia computadorizada) acelerou o desenvolvimento de novos sistemas híbridos SPECT/CT. Câmeras híbridas SPECT/CT permitem atualmente obter, durante um único exame, as imagens funcionais e anatômica fusionadas, tornando assim disponível aos médicos nucleares corrigir quantitativamente a imagem, baseados nas descrições anatômicas, melhorando a qualidade do diagnóstico (Hapday *et al*, 2009).

Quatro sistemas básicos SPECT/CT estão comercialmente disponíveis atualmente. Os três principais fabricantes que dominam o mercado de equipamentos SPECT/CT são a General Electric (GE), a Philips e a Siemens. Juntas, essas três empresas dominam, quase que em sua totalidade o mercado (Mariani *et al*, 2010).

O custo dos sistemas SPECT/CT é consideravelmente mais elevado do que a de uma gama câmara convencional, especialmente para dispositivos que incluem um CT com capacidade de diagnóstico. Este alto custo tem limitado a difusão da técnica em vários países com recursos financeiros limitados. Sob o ponto de vista tecnológico, novos dispositivos SPECT foram recentemente desenvolvidos, principalmente os que utilizam detectores semicondutores de cádmio/telúrio ou cádmio/zinco/telúrio (CdTe/CdZnTe) em vez do clássico cristal de cintilação de iodeto de sódio dopado com tálio (NaI (TI)). Tais sistemas mais recentes possuem menores dimensões e apresentam sensibilidade e resolução intrínseca maior do que o convencional. Assumindo que esta tecnologia vai em breve chegar a plena maturidade, pode ser especulado que os dispositivos SPECT/CT serão de menores dimensões, mais compactos e também clinicamente mais eficientes (Mariani *et al*, 2010).

2.4.1 Fabricante *General Electric - GE Health Care*

Como pioneira em tecnologia de imagens híbridas SPECT/CT, a *GE Healthcare* foi a primeira a trazer para o mercado o produto, a série *Hawkeye*, em 1999. Com a capacidade de combinar o poder da imagem anatômica (CT) e a imagem funcional/molecular (SPECT), a série *Infinia Hawkeye*[™] (figura 4) ajudou a proporcionar

uma maior confiança no diagnóstico e na localização da doença. Até hoje, esta tecnologia está em operação em mais de 1.300 instituições de saúde em todo o mundo, com a digitalização de mais de 500.000 pacientes por ano (Mariani *et al*, 2010).



Figura 4: Equipamentos SPECT/CT *Infinia™ Hawkeye® 4*, *GE Health Care*.

<http://www3.gehealthcare.com/en/products>

Focado na gestão da dose otimizada e reforçando sua iniciativa, a *GE Health Care* continua a manter o fluxo de inovações para a série *Infinia Hawkeye*, culminando em seu modelo mais recente, o *Infinia Hawkeye™ HD* avançado. Este equipamento oferece a capacidade de fornecer até 50 % menos de dose ao paciente de medicina nuclear para protocolos cardíacos e ósseos, com CT de baixa dose, variando de 0,1 a 1,7 mSv, para fins de localização e de correção de atenuação (GE, 2016).

Além disso, devido às exigências de blindagem, redução de tempo de aquisição e redução de custo, o *Infinia Hawkeye™ HD* permite acesso à tecnologia SPECT/CT a um número maior de pacientes. O equipamento aumenta a confiança do médico e pode mudar a interpretação clínica em uma média de 35 % dos casos com SPECT/CT, quando comparado ao SPECT sozinho (GE, 2016).

A versão fabricada pela *GE Health Care (Infinia™ Hawkeye® 4)* é uma gama câmara de duas cabeças (dois detectores) e um tomógrafo de baixa dose de quatro cortes, montados no mesmo *gantry*. O CT opera a 140 KV-2,5 mA, com tempo de digitalização de 4 min para adquirir um campo de visão axial de 40 cm. A baixa radiação dos raios X requer pouca blindagem da sala em que está inserido, apenas um pouco maior do que é comumente empregue na medicina nuclear, e as dimensões externas do equipamento são semelhantes às de uma câmara gama convencional (Mariani *et al*, 2010).

Porém, devido às limitações de resolução de imagem do modelo original com CT de quatro cortes, outros modelos de SPECT/CT têm sido disponibilizados comercialmente, agora com CT multicortes (GE, 2016).

Lançado em 2014, o *NM/CT 670 Pro*, figura 5, é o mais completo e moderno aparelho da série NM600 da GE, e promete algumas inovações que diminuem as doses no paciente, tanto durante a tomografia quanto durante o exame de medicina nuclear. Apresenta um CT multicortes que fornece uma imagem de CT diagnóstico, além de efetuar a correção de atenuação (GE, 2016).



Figura 5: Equipamentos SPECT/CT *Discovery NM/CT 670™* e *NM/CT 670 Pro™*, GE Health Care (<http://www3.gehealthcare.com/en/products>)

Essa tecnologia utiliza um sistema avançado de detecção, denominado Elite NXT, que inclui fotomultiplicadoras (PMT) ultracurtas e componentes eletrônicos miniaturizados, aumentando o rendimento em resolução espacial do SPECT e apresentando elevada taxa de contagem, melhorando a nitidez da imagem. Um dispositivo de pressão ultrafino e um sistema automatizado de contorno corporal ajudam a aumentar ainda mais a resolução por permitir que o sistema de detecção se aproxime mais do paciente. Algoritmos de reconstrução em SPECT poderosos permitem que menor dose ou menor tempo de aquisição, sem sacrificar a qualidade da imagem. Utiliza um sistema de reconstrução iterativo denominado ASiR™ (*Adaptative Statistical Iterative Reconstruction*) associado a um outro sistema de modulação de dose de CT denominado OptiDose™ (GE, 2016).

Apresenta ainda outro dispositivo bastante importante na otimização das doses para os pacientes observados em sistemas híbridos, sendo que o equipamento faz uma checagem do índice de dose obtido pela escolha dos parâmetros do exame com valores pré-definidos, alertando o operador caso esses valores não confirmem com os níveis de referência. A evolução exclusiva da tecnologia muda a relação entre o tempo, dosagem e qualidade de imagem, permitindo reduzir o tempo ou a dose injetada no paciente em até 50 % na maioria dos procedimentos, mantendo excelente qualidade de imagem (GE, 2016).



Optima NM/CT 640

Figura 6: Equipamento SPECT/CT *Optima NM/CT 640™*, GE Health Care
(<http://www3.gehealthcare.com/en/products>)

Com os sistemas híbridos SPECT/CT anteriores, uma rotação do CT de 12-14 segundos pode, muitas vezes, levar a artefatos de movimento devido à respiração ou outro movimento do paciente. Graças ao *gantry* do CT ser independente do *gantry* do SPECT, o *Optima NM/CT 640* pode completar uma rotação de CT em menos de um segundo, pode capturar muitas imagens de uma série de exposições breves, permitindo a redução dos artefatos de movimento. Isso contribui para uma maior qualidade de imagem e uma menor exposição do paciente (GE, 2016).

O equipamento *Discovery NM/CT 670 CZT*, figura 7, é o primeiro SPECT/CT comercialmente disponível equipado com a tecnologia CZT. Este tipo de detector semicondutor é o componente chave para o futuro da medicina nuclear. Não só é mais leve e mais compacto do que os cristais de NaI (TI) utilizados na tecnologia convencional, mas é pixel a pixel. Alojado em campos de visão menores, 39 cm x 51 cm, e com blocos detectores em duas cabeças SPECT, cada detector individual é como o olho de uma mosca, com milhares de minúsculos detectores de 2,46 mm que trabalham em conjunto para capturar mais eventos, mais precisamente. Também permite a conversão direta, ou seja, cada fóton é diretamente convertido em um sinal elétrico que identifica com precisão sua localização e energia. Isto elimina a perda de sinal e o ruído inerente à tecnologia convencional de detecção de SPECT/CT, e recuperar a resolução espacial e de energia, perdidas. A melhora da resolução espacial é de 3,8 mm no método convencional para 2,5 mm. Na resolução energética, a melhora se dá de 9,5 % nas câmaras convencionais para 6,3 % para o modelo com CZT. Também possui a estação de trabalho *Xeleris TM4.0™*, que introduziu os softwares de CT de baixa dose *ASiRTM™* e de quantificação de dose *Q.Suite™* (GE, 2016).



Discovery NM/CT 670 CZT

Figura 7: Equipamento SPECT/CT *Discovery NM/CT 670 CZT™*, GE Health Care
(<http://www3.gehealthcare.com/en/products>)

2.4.2 Fabricante *Philips*

Como outros fabricantes, os equipamentos híbridos de SPECT/CT do fabricante Philips apresentam baixa dose ao paciente. A figura 8 mostra os dois equipamentos da Philips disponíveis no mercado.



Figura 8: Equipamentos SPECT/CT *Precedence*[™] e *BrightView XCT*[™], *Philips*
(<http://www.usa.philips.com/healthcare>)

O modelo *Precedence*[™] combina uma câmara gama (dois detectores suspensos por cabeças em movimento) com um CT *Brilliance*[™] de alta potência, com 6 ou 16-cortes CT, operando a 80 mA para a correção de atenuação e coregistro de imagem, com espessura mínima de corte axial de 0,65 mm e tempo de varredura para exames de corpo inteiro inferior a 60 s. O SPECT apresenta resolução intrínseca de 3,2 mm e maior que 5 mm de resolução na imagem reconstruída (Philips, 2016).

Como um modelo mais recente, o *BrightView XCT* apresenta uma novidade, denominada CoPlanar FP, integração única do SPECT em um design coplanar com avançada tecnologia de CT de tela plana com feixe cônico (*Cone Beam Computed Tomography-CBCT*). O *BrightView XCT* é um sistema de imagem médica híbrido integrando ângulo variável da câmara gama com um CT de tela plana de feixe cônico (CBCT) que é o componente usado para a localização e a atenuação de correção de dados do SPECT. Oferece resolução do CT superior para baixos níveis de dose de

radiação, com dose típica de correção de atenuação < 1 mGy e de 6 mGy para imagem de uma região. Apresenta localização de alta resolução na localização (voxels de 0,33 mm) e correção de atenuação de alta qualidade, com o potencial de gerar menos artefatos devido a tempos de exame mais curtos. Paradoxalmente, Embora a tecnologia de detector *flat pannel* seja utilizada neste sistema fornecendo uma resolução maior do que até mesmo o modelo mais recente de CT diagnóstico, este equipamento não pode ser utilizado em exames de CT de rotina porque, devido ao processo de aquisição ser relativamente lento, estudos dinâmicos com contraste não são possíveis (Mariani *et al*, 2010).

2.4.3 Fabricante **Siemens**

Symbia T Series

A *Siemens Medical Solutions* disponibiliza comercialmente a série *T*, sendo que o *Symbia TruePoint™* SPECT/CT combina um ângulo variável do SPECT de duas cabeças com o scanner *Emotion™* CT, em quatro configurações diferentes, denominados *Symbia T*, *Symbia T2*, *Symbia T6* e *Symbia T16*, Figura 9. O modelo *Symbia T* executa apenas a correção de atenuação, enquanto a imagem com qualidade diagnóstica é obtida em um CT de múltiplos canais. A espessura do corte axial pode ser tão fino quanto 0,63 mm, com o modelo *Symbia T6* ou *T16* (Mariani *et al*, 2010).



Figura 9: Equipamento SPECT/CT *Symbia T16™*, Siemens

<https://usa.healthcare.siemens.com>

O sistema SPECT do equipamento promete ser o de maior sensibilidade dentre os fabricados, da ordem de 202 Cpm. Também afirma que apenas o *Symbia* com IQ/SPECT permite digitalizar duas vezes mais rápido, com apenas metade da atividade administrada ao paciente, sem comprometer a qualidade da imagem. Dessa forma, uma imagem cardíaca pode ser realizada em 4 minutos, muito mais rápido do que em um estudo SPECT convencional de 16 minutos. Este fato deve-se ao desenvolvimento de um tipo de colimador denominado *SMARTZOOM™* que é capaz de ampliar a imagem cardíaca separadamente do restante do tronco (Siemens, 2016).

Tanto os sistemas SPECT/CT apresentados, sejam da Philips, da Siemens ou da GE, requerem algum tipo adicional de blindagem no que diz respeito a uma câmara gama convencional. Todos os modelos implicam em tempos de aquisição SPECT que não diferem muito dos procedimentos com SPECT dedicado apenas. Além de realizar correção de atenuação com base em dados de densidade de tecido para todos os pacientes individualmente, as estações de trabalho SPECT/CT permitem a reconstrução da imagem nos três planos (transaxial, coronal, sagital) e a exibição tridimensional, utilizando o método de reconstrução iterativo. O SPECT, CT e imagens fusionadas são mostrados na mesma tela, e um ponteiro interligado está disponível para exatamente localizar áreas morfológicas e funcionais de interesse, identificadas no qualquer um dos dois componentes do estudo (Mariani *et al*, 2010).

2.5 Radiofármacos

Para um radionuclídeo ser adequado para o uso em medicina nuclear, este deve ter algumas propriedades físicas importantes, tais como: meia-vida, decaimento, energia da radiação emitida, além de facilidade e custo de produção.

A meia-vida do nuclídeo deve ser suficientemente longa para permitir a produção, transporte e realização do exame, mas não tão longa a ponto de aumentar desnecessariamente as doses de radiação no paciente. A energia deve ser apropriada para a sua detecção nas câmaras SPECT, por exemplo, os raios gama devem ter entre 100 e 250 keV de energia, pois fora desse intervalo a produção de imagens pode ser considerada como “fraca” (Nuclear Medicine Physics, 2014).

Os fótons com energia abaixo de 100 keV, em sua maioria, não têm energia para deixar o corpo para captação pelos detectores do aparelho na formação da imagem, o que aumenta as doses ao paciente desnecessariamente, sem contribuir na formação da imagem para o exame. Fótons com energias acima desse intervalo dificultam a sua detecção e aumentam os cuidados relativos à blindagem necessários para garantir a segurança das pessoas envolvidas em todos os processos do exame, desde a produção do radiofármaco até os cuidados com o paciente no pós-exame (Nuclear Medicine Physics, 2014).

O Tecnécio-99 metaestável, ou ^{99m}Tc , atualmente é o radionuclídeo utilizado em cerca de 80% dos exames realizados em hospitais e clínicas ao redor do mundo, sendo produzido por reator, através da obtenção do radionuclídeo Molibdênio-99 (^{99}Mo). O ^{99m}Tc é produto de decaimento do ^{99}Mo , compondo um sistema gerador onde o Molibdênio é o radionuclídeo “pai”, de meia-vida longa (66h), e o Tecnécio é o radionuclídeo filho, de meia-vida curta (6h). Além de facilitar o transporte para regiões remotas, o uso do gerador $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ no próprio hospital facilita a produção dos radiofármacos marcados com o radionuclídeo, o tecnécio metaestável é monoenergético, com emissão de um gama de 140 keV, energia ideal para o uso diagnóstico (Nuclear Medicine Physics, 2014).

Sendo a produção de radionuclídeos para fins médicos uma área em grande crescimento, um número crescente de outros radioisótopos tem sido desenvolvido e utilizado em diagnóstico e terapia. A tabela 1 mostra as propriedades de alguns dos radionuclídeos mais utilizados em medicina nuclear e respectivos modos de produção (Nuclear Medicine Physics, 2014).

Tabela 1 - Dados sobre os radionuclídeos mais utilizados na medicina nuclear e seus processos de produção (Nuclear Medicine Physics, 2014).

Nuclídeo	T $\frac{1}{2}$	Principais emissões e energias (keV)	Produção
Tecnécio-99m	6,01 h	γ 141	Gerador (^{99}Mo)
Iodo-123	13,2 h	γ 158	Cíclotron (^{124}Te)
Iodo-131	8,04 d	γ 364, β 606	Fissão nuclear
Tálio-201	73,1 h	γ 167, 135; X68-82	$^{203}\text{Tl}(p,3n)^{201}\text{Pb} \rightarrow ^{201}\text{Tl}$
Gálio-67	78,3 h	γ 300, 181, 93	Cíclotron (^{124}Te)
Índio-111	2,81 d	γ 245,171	Cíclotron (^{124}Te)
Xenônio-133	5,25 d	γ 81; β 46; X30-36	Fissão nuclear
Criptônio-81m	13,3 s	γ 190	Gerador (^{81}Rb)

Estes radionuclídeos podem ser utilizados em uma grande quantidade de exames de medicina nuclear, marcando um composto químico específico, fármaco, que é o responsável pela especificidade do exame. A figura 10, a seguir, apresenta os principais tipos de exames em medicina nuclear.

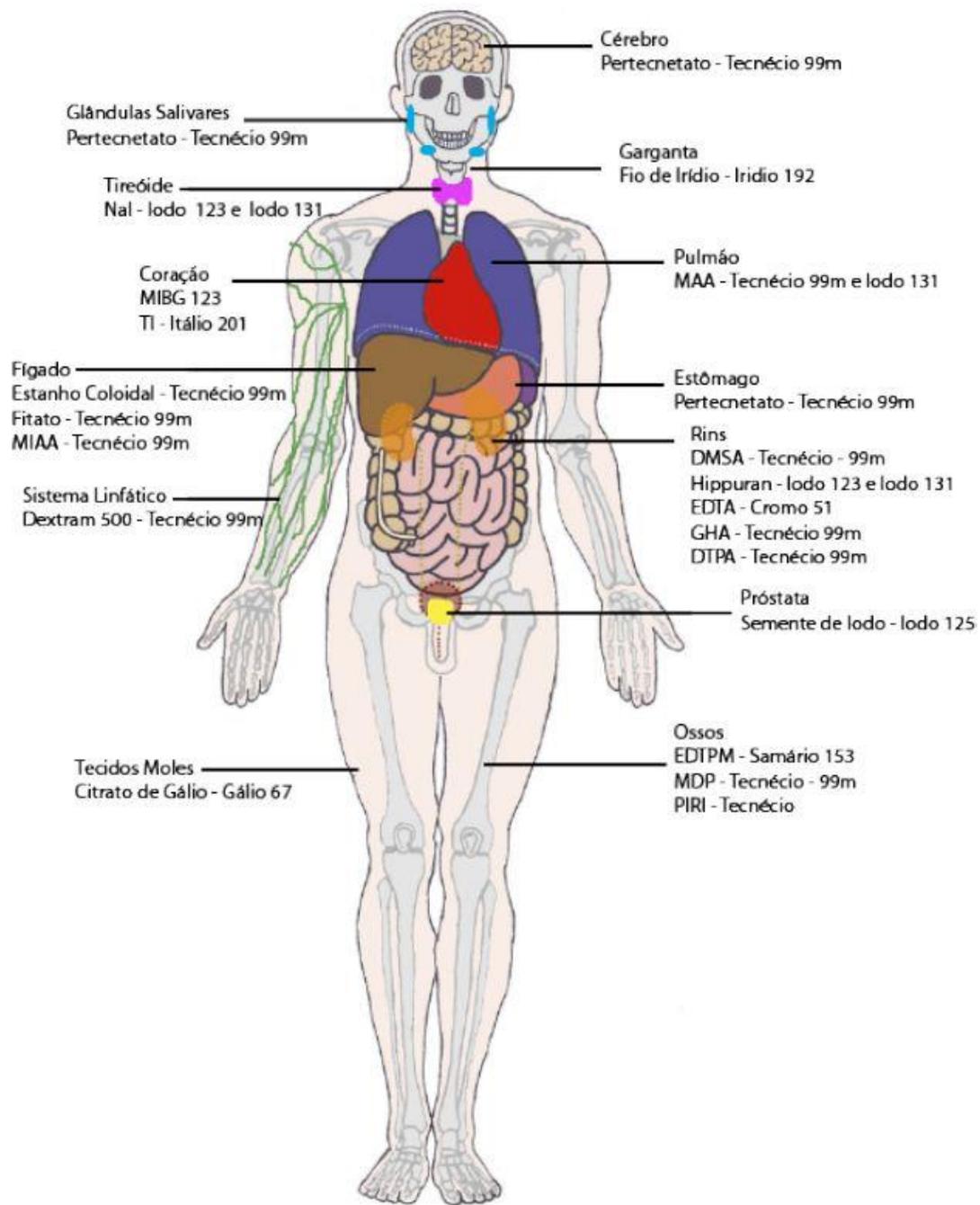


Figura 10: Principais exames de medicina nuclear
http://playmagem.com.br/medicina_nuclear/ebook_med_nuclear

2.6 Controle de qualidade

No uso de raios X para imagem médica, procedimento intervencionista guiado por imagem e medicina nuclear de diagnóstico, um nível de referência é usado para indicar a necessidade de investigação. As avaliações periódicas são executadas para verificar se as doses ou atividades estão dentro dos níveis de referência em uma instalação médica.

Caso as doses ou atividades estiverem demasiadamente altas ou baixas, uma revisão local deve ocorrer para apurar se a proteção e segurança pode ser otimizada e se há necessidade de ação corretiva (IAEA, 2009).

Testes de Controle de Qualidade

As técnicas híbridas foram introduzidas no Brasil em 2000, com a chegada do PET/CT no Instituto do Coração em São Paulo. Em 2016 já temos cerca de 130 equipamentos PET/CT no país, mas ainda cerca de apenas 10 SPECT/CT, mais utilizados no país para a área de cardiologia (Sá, 2015).

Certamente, a introdução de uma técnica que utiliza raios X em conjunto a radiofármacos emissores gama trouxe um período de adaptação para os operadores das máquinas e responsáveis pelo controle dos equipamentos. Isso se observou também em relação aos reguladores, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), cujas normas vigentes não incluíam as técnicas híbridas (Sá, 2015).

Em 2008 e 2013, respectivamente, a ANVISA e a CNEN introduziram os referidos controles de desempenho desses equipamentos em suas normas, publicando revisões nos documentos CNEN NN 3.05 e RDC 38. Os testes previstos na norma CNEN NN 3.05, que regulamenta os requisitos de segurança e proteção radiológica para serviços de medicina nuclear, são apresentados na tabela 2 (CNEN, 2013, ANVISA, 2008).

Tabela 2: Normas CNEN NN 3.05 (www.cnen.gov.br/normas)

Testes de Controle de Qualidade - Câmara Cintilográfica			
Teste	Periodicidade		Objetivo
Inspeção visual da integridade física do sistema	A	D	Analisar visualmente a câmara cintilográfica, estação de aquisição e de processamento, e os dispositivos de armazenamento de dados, procurando por danos ocasionados pelo transporte, falhas de fabricação e de instalação.
Uniformidade intrínseca ou extrínseca, de campo integral e diferencial para baixa densidade de contagem	A	D	Testar a resposta intrínseca ou extrínseca de uma câmara cintilográfica para um fluxo espacialmente uniforme de fótons incidentes sobre o campo de visão, usando uma janela simétrica de energia centralizada sobre o fotopico para baixas densidades de contagens. Na fase de aceitação, os testes da uniformidade extrínseca para todos os colimadores devem ser realizados.
Centralização e largura da janela energética para cada radionuclídeo	A	D	Testar os parâmetros estabelecidos pelo Analisador de Altura de Pulso da câmara para verificar se as janelas energéticas estão adequadamente centradas para todos os radionuclídeos utilizados na rotina clínica.
Radiação de fundo da sala de exame	A	D	Verificar a taxa de contagem de fundo registrada pela câmara cintilográfica sob as condições de trabalho clínico de rotina para cada um dos radionuclídeos usados.
Uniformidade intrínseca de campo integral e diferencial, se o equipamento dispuser dessa função, para alta densidade de contagem	A	M	Testar a resposta intrínseca de uma câmara cintilográfica para um fluxo espacialmente uniforme de fótons incidentes sobre o campo de visão, usando uma janela simétrica de energia centralizada sobre o fotopico do radionuclídeo mais usado, para altas densidades de contagens.
Uniformidade intrínseca para núclídeos diferentes de ^{99m}Tc	A	An	Testar a resposta intrínseca da câmara para um fluxo espacialmente uniforme de fótons incidentes sobre o campo de visão, usando uma janela simétrica de energia centralizada sobre o fotopico de outros radionuclídeos usados no Serviço de Medicina Nuclear, para altas densidades de contagens.
Uniformidade intrínseca com janelas energéticas assimétricas	A	An	Verificar visualmente a ocorrência de focos hidratação.
Resolução e linearidade espacial intrínsecas	A	M	Testar a resolução espacial intrínseca da câmara cintilográfica através da largura à meia-altura (FWHM) e sua linearidade.
Resolução e linearidade espacial planar extrínsecas	A	A	Testar a resolução espacial da câmara de cintilação através da largura à meia-altura (FWHM) e sua linearidade. Este teste deve ser realizado para todos os colimadores

(continuação)

Testes de Controle de Qualidade - Câmara Cintilográfica			
Teste	Periodicidade		Objetivo
Centro de rotação da câmara SPECT	A	M	Testar o desvio do centro de rotação do sistema, o alinhamento da câmara com o eixo Y e a angulação (tilt) do detector em relação ao eixo de rotação (Z).
Resolução energética	A	S	Testar a capacidade da câmara cintilográfica para distinguir dois fótons de energias diferentes e próximas.
Resolução espacial para fontes multienergéticas, quando aplicável	A	S	Testar a resolução espacial da câmara cintilográfica através do FWHM, para isótopos que possuem mais de um pico energético.
Coregistro espacial de imagens para fontes multienergéticas, quando aplicável	A	S	Verificar o registro espacial de imagens adquiridas com fontes multienergéticas ou com fontes de diferentes radionuclídeos.
Sensibilidade Plana ou Tomográfica	A	S	Testar a resposta da taxa de contagem da câmara cintilográfica para uma fonte radioativa com atividade conhecida.
Taxa máxima de contagem	A	S	Testar o desempenho intrínseco de contagens para a câmara de cintilográfica em resposta ao aumento do fluxo incidente de radiação gama.
Verificação de defeitos na angulação dos furos de todos os colimadores	A	S	Testar o alinhamento e a angulação septal para todos os colimadores de septos paralelos.
Velocidade da mesa de exame do equipamento na varredura de corpo total	A	S	Testar a velocidade correta da janela eletrônica e não uniformidades geradas pela velocidade de rastreamento.
Uniformidade de campo integral e diferencial extrínseca do sistema, se o equipamento dispuser dessa função, para todos os colimadores em uso	A	S	Testar a uniformidade extrínseca do sistema utilizando todos os colimadores disponíveis no Serviço de Medicina Nuclear.
Desempenho geral da câmara SPECT	A	S	Testar a linearidade, uniformidade e resolução da imagem tomográfica e estimar o contraste da imagem de objetos de tamanho conhecido.
Teste de tamanho do pixel	A		Verificar quantitativamente o tamanho do pixel da imagem para cada matriz utilizada clinicamente.
Verificação do funcionamento do sistema computacional e dos periféricos	A		Testar a capacidade de operação do sistema de detecção, formação e registro da imagem cintilográfica.
Verificação da marcação do tempo pelo computador em estudos dinâmicos	A		Testar a marcação temporal em estudos dinâmicos com os intervalos de tempo comumente usados na rotina clínica.
Verificação da aquisição sincronizada com sinais fisiológicos	A		Verificar o sincronismo da aquisição de imagens com os instantes de referência de sinais fisiológicos como eletrocardiograma e ciclo respiratório.
Verificação da blindagem do sistema de detecção	A		Testar a qualidade da blindagem do sistema de detecção (cabeça do sistema de imagens) para radiações de fundo ou fontes presentes na sala de exames.
Coregistro SPECT/CT	A	T	Verificação do coregistro de imagens SPECT com imagens CT para sistemas conjugados

A = Aceitação, ou após serviços de manutenção ou correção ou quando os valores estiverem fora do intervalo de tolerância com relação ao valor de referência.

D = Diário ou no dia em que a câmara for utilizada

M = Mensal

S = Semestral

T = Trimestral

OBS: Os testes EXTRÍNSECOS devem ser feitos com periodicidade semestral ou quando ocorrer dano ao colimador.

Os testes de controle de qualidade da câmara de cintilação e tomógrafos SPECT/CT pertinentes devem ser realizados após revisão e/ou reparo.

A RDC 38 da ANVISA também estabelece testes de controle do equipamento SPECT e CT, separadamente, semelhantes aos da CNEN, conforme apresentado na tabela 3 e 4, a seguir (ANVISA, 2008).

Tabela 3 Testes de controle de qualidade RDC 38 ANVISA (<http://www20.anvisa.gov.br>).

Testes câmara cintilográfica	Diário	Semanal	Mensal	Trimestral	Semestral	Aceitação
Inspeção visual da integridade física do sistema	X					X
Uniformidade intrínseca decampo integral e diferencial: baixa densidade de contagem	X					X
Radiação de fundo/contaminação	X					X
Centralização e largura da janela energética para cada radionuclídeo	X					X
Uniformidade intrínseca de campo integral e diferencial: alta densidade de contagem		X				X

(continuação)

Testes câmara cintilográfica	Diário	Semanal	Mensal	Trimestral	Semestral	Aceitação
Resolução e linearidade espaciais planas			X			X
Centro de rotação da câmara SPECT			X			X
Resolução energética				X		X
Resolução espacial para fontes multienergéticas				X		X
Coregistro espacial de imagens para fontes multienergéticas				X		X
Uniformidade campo integral e diferencial do sistema para todos os colimadores em uso				X		X
Tamanho do pixel				X		X
Desempenho geral da câmara SPECT				X		X
Sensibilidade					X	X
Taxa máxima de contagem					X	X
Verificação de defeitos na angulação dos furos de todos os colimadores					X	X
Teste de varredura de corpo total					X	X
Verificação de funcionamento do sistema computacional e dos periféricos						X

Tabela 4 Testes de controle de qualidade RDC 38 ANVISA (<http://www20.anvisa.gov.br>).

Testes Tomógrafo CT	Diário	Mensal	Trimestral	Semestral	Anual	Aceitação
Maca de suporte		X				X
Acurácia de posicionamento de paciente		X				X
Espessura do corte tomográfico		X				X
Uniformidade e ruído		X				X
Acurácia dos números CT		X				X
Resolução espacial			X			X
Função de transferência de modulação (MTF)			X			X
Dose: CTDI				X		X
Desempenho geral com simulador específico				X		X

3 Aplicações Clínicas

Os radiofármacos têm na sua composição um radionuclídeo e um composto químico, e são utilizados em Medicina Nuclear para diagnóstico e terapia de várias doenças. Para diagnóstico em Medicina Nuclear utilizam-se radiofármacos que apresentam na sua constituição radionuclídeos emissores de radiação gama ou emissores de pósitrons (β^+), já que o decaimento destes radionuclídeos dá origem à radiação eletromagnética penetrante, que consegue atravessar os tecidos e pode ser detectada externamente.

Existem dois métodos tomográficos para aquisição de imagens em Medicina Nuclear: o SPECT (Tomografia Computadorizada de Emissão de Fóton Único), que utiliza radionuclídeos emissores γ (^{99m}Tc , ^{123}I , ^{67}Ga , ^{201}Tl) e o PET (Tomografia por Emissão de Pósitrons), que usa radionuclídeos emissores de pósitrons.

Os radiofármacos podem ser classificados em de perfusão (ou 1ª geração) e específicos (ou 2ª geração). Os radiofármacos de perfusão são transportados no sangue e atingem o órgão alvo na proporção do fluxo sanguíneo. Os ditos específicos contêm moléculas biologicamente ativas, que se ligam a receptores celulares e que deve manter a sua bioespecificidade, mesmo após ligação ao radionuclídeo. Assim, a fixação em tecidos ou órgãos é determinada pela capacidade da biomolécula de reconhecer receptores presentes nessas estruturas biológicas. As preparações radiofarmacêuticas são obtidas como prontas para uso, em kits frios. De acordo com o tipo de preparação, existe um processo de controle de qualidade próprio. A maior parte dos radiofármacos em uso clínico correspondem à agentes de perfusão. Atualmente, o esforço de investigação na área da química radiofarmacêutica centra-se no desenvolvimento de radiofármacos específicos que possam fornecer informação, a nível molecular, relativa às alterações bioquímicas associadas às aplicações clínicas (Oliveira et al, 2006).

- **Carcinoma diferenciado de tireoide**

O Iodo-131 é amplamente usado para terapia, diagnóstico e localização do carcinoma diferenciado de tireoide. Exames de diagnóstico são comumente realizados com a administração de Iodeto de sódio-123 (Na^{123}I) e Iodeto de sódio-131 (Na^{131}I) e, após 2 a 3 dias, a cintilografia de corpo inteiro é realizada. A terapia é realizada de 5 a 10 dias pós-cirurgia, ou no tratamento de doença metastática (IAEA, 2008).

As propriedades físicas do Iodo-131 não são favoráveis à obtenção de imagens pela gama câmara por geralmente apresentarem pouca definição anatômica. Essas limitações intrínsecas de cintilografia com ^{131}I limitam a correta identificação e localização de metástases, principalmente se localizadas em áreas que foram alteradas por cirurgia, ou estiverem nas proximidades de sítios fisiológicos de acumulação de radionuclídeo. A imagem de captação do radiofármaco ganhou em qualidade da localização quando realizada com SPECT/CT, figura 11 (Mariani et al, 2010).

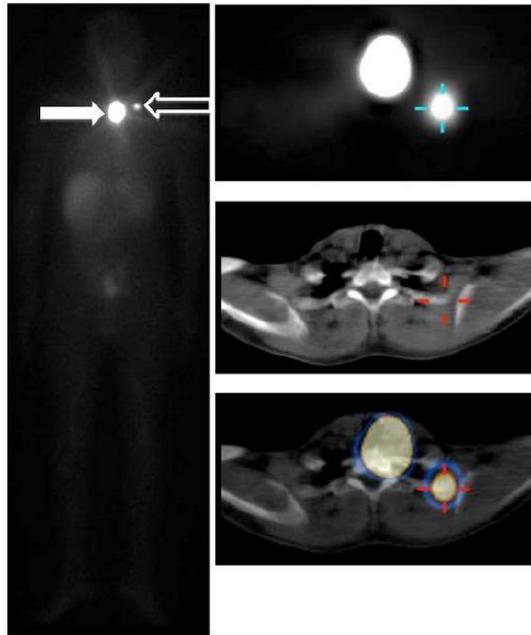


Figura 11: Imagem SPECT/CT do carcinoma diferenciado de tireoide (Mariani et al, 2010).

- **Carcinoma medular de tireoide**

O Carcinoma medular de tireoide diferenciado tem como tratamento padrão a tireoidectomia total e a terapia com iodeto de Na^{131}I . Com essa abordagem combinada as taxas de sobrevivência em cinco anos são superiores a 85%. No entanto, em longo prazo, o prognóstico é pior para pacientes que apresentam tumores localmente avançados, ou metástases distantes no momento do diagnóstico, bem como em caso de neoplasia que diminua a propriedade de interceptação de iodo. Este subgrupo é responsável por cerca de 20% de pacientes com carcinomas diferenciados de tireoide e merecem uma atenção especial de acompanhamento (IAEA, 2008).

O efeito terapêutico do ^{131}I é fornecido pela sua emissão beta. Além disso, este isótopo emite raios gama com energia de 364 keV que podem ser detectados por uma

gama câmara. Portanto, o ^{131}I é também utilizado como agente de diagnóstico, já que a maioria das metástases de carcinoma de tireoide mantém a capacidade de acumular iodo (IAEA, 2008).

A biodistribuição é geralmente bem definida pela cintilografia planar. O SPECT é raramente usado para essa finalidade, pois a qualidade da imagem do ^{131}I por SPECT é dificultada pela alta energia da radiação gama emitida por esse radioisótopo. O ^{131}I concentra-se pobremente na maioria dos tecidos extra tireoidianos. As glândulas salivares, estômago, intestinos e bexiga urinária são as mais notáveis exceções a essa regra. Assim, a imagem da distribuição de ^{131}I no corpo humano é pobre em detalhes anatômicos por não possuir marcos de referência que podem ser reconhecidos. Isso torna a localização da captação deste radionuclídeo difícil, se não impossível, e pode construir um problema naqueles pacientes dos quais a remoção de metástase é indicada (IAEA, 2008).

Metástases ávidas por iodo podem ser pequenas. Além disso, essas podem ocorrer em regiões que exibem uma anatomia distorcida devido à cirurgia anterior. Sua localização usando o CT pode, portanto também não ser possível. O SPECT/CT é certamente um método mais acurado na localização, embora evidências sobre essa aplicação ainda são poucas, conforme mostrado na figura 12 (IAEA, 2008).

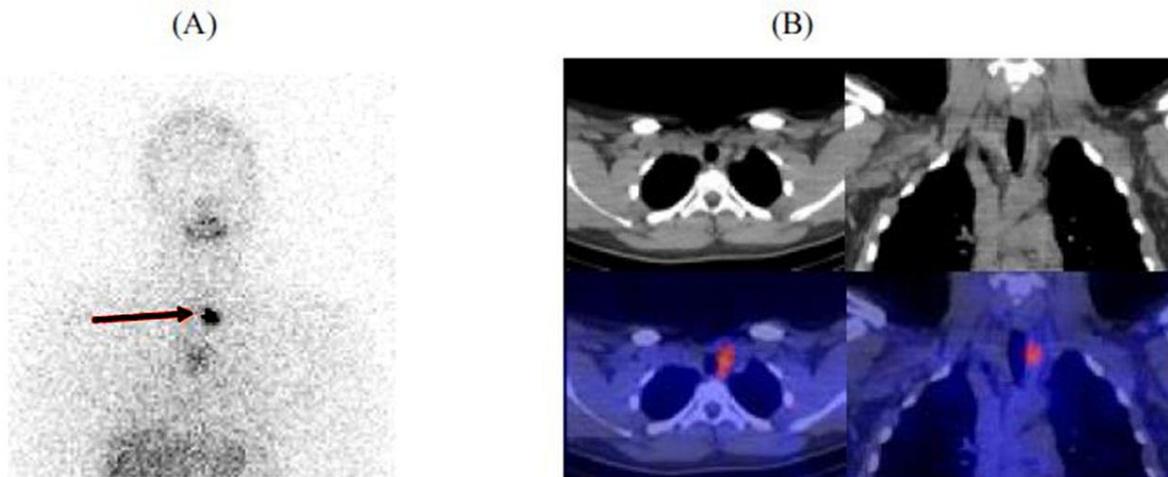


Figura 12: (A) Exame de tireoide com ^{131}I em um paciente de 16 anos de idade com câncer de tireoide, mostrando a captação de iodo (seta). O paciente passou por três procedimentos cirúrgicos (incluindo remoção total da tireoide e recebeu 37 GBq de Na^{131}I para verificação da existência de metástase. Essa informação só pode ser alcançada com SPECT/CT (B) (IAEA, 2008).

- **Avaliação de tumores neuroendócrinos**

A cintilografia com Índio-111 é amplamente empregada para a obtenção de imagem de tumores neuroendócrinos. Durante as últimas décadas, as técnicas de obtenção de imagem tem melhorado devido à otimização. A dose injetada atualmente passou de 222 MBq, usadas em estudos iniciais, para 111 GBq, e é rotineiramente utilizada no diagnóstico dos tumores neuroendócrinos e tumores do trato gastrointestinal. A cirurgia é o tratamento de escolha.

A detecção no paciente de todos os locais que apresentar tumor é muito importante para o planejamento otimizado da cirurgia. A localização das lesões pode ser dificultada devido ao pequeno tamanho dos tumores e pela falta de delimitação anatômica do exame. A sensibilidade das modalidades de obtenção de imagem (CT e ultrassom) varia entre 13% a 85% dependendo do tipo, localização e tamanho do tumor, além do protocolo de obtenção da imagem. (IAEA, 2008).

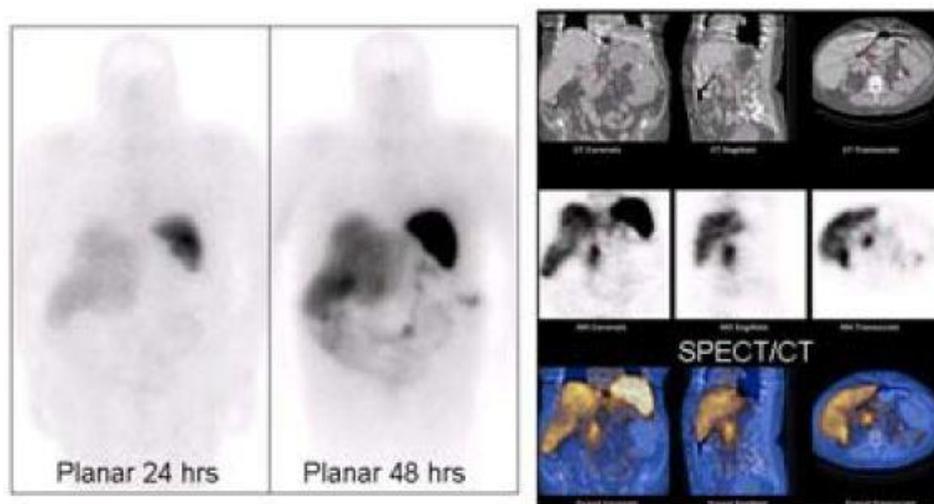


Figura 13: Imagem de cintilografia planar de uma mulher de 56 anos de idade com câncer de duodeno diagnosticado após biópsia, localizado por exame de corpo inteiro realizado 24 h e 48 h após o traçador ter sido injetado; a direita, fusão de imagens do SPECT e do CT (IAEA, 2008).

- **Linfoma**

A cintilografia de linfoma usando Citrato de Gálio-67 há muito tempo tem se mostrado útil na avaliação de pacientes e o SPECT/CT melhorou ainda mais a localização de áreas com captação anormal do traçador. Em particular o SPECT/CT mostrou-se muito útil para distinguir lesões da coluna vertebral e comprometimentos adjacentes. Foi também capaz de esclarecer a captação do traçador na parte baixa da caixa torácica projetada sobre o fígado, costelas e esterno. Além disso, a imagem SPECT/CT tem sido usada para fornecer informações adicionais ou o diagnóstico de anormalidades na tomografia, levando a uma significativa mudança na gestão do paciente (IAEA, 2008).

- **Linfocintilografia**

No estadiamento de pacientes com nódulos linfáticos a precisão é essencial para o tratamento e prognóstico do câncer. O linfoma sentinela é o primeiro nódulo que a drenagem linfática pode indicar como metástase a partir do tumor primário. Procedimentos para detecção e biópsia dos linfonodos sentinelas já foram implantados nas práticas medicinais. A precisa localização destes é fundamental para minimizar uma cirurgia invasiva e evitar a incompleta remoção do linfonodo sentinela, especialmente nas regiões da cabeça e pescoço, no peito e na pélvis (IAEA, 2008).

Uma imagem SPECT/CT pode localizar precisamente o linfonodo sentinela através da imagem tomográfica e fornecer pontos anatômicos críticos, tais como osso hioide, cartilagem crinoide, músculos, artéria epigástrica inferior e junção venosa safeno-femoral (IAEA, 2008). Uma dose padrão de 18,5 MBq de Tecnécio-99m é injetado por via intradérmica em torno do melanoma, ao redor da lesão de câncer de mama, por via subcutânea, e em torno de outros tumores. A imagem SPECT/CT, figura 14, é normalmente obtida após a identificação da drenagem por uma série de imagens planares (IAEA, 2008).

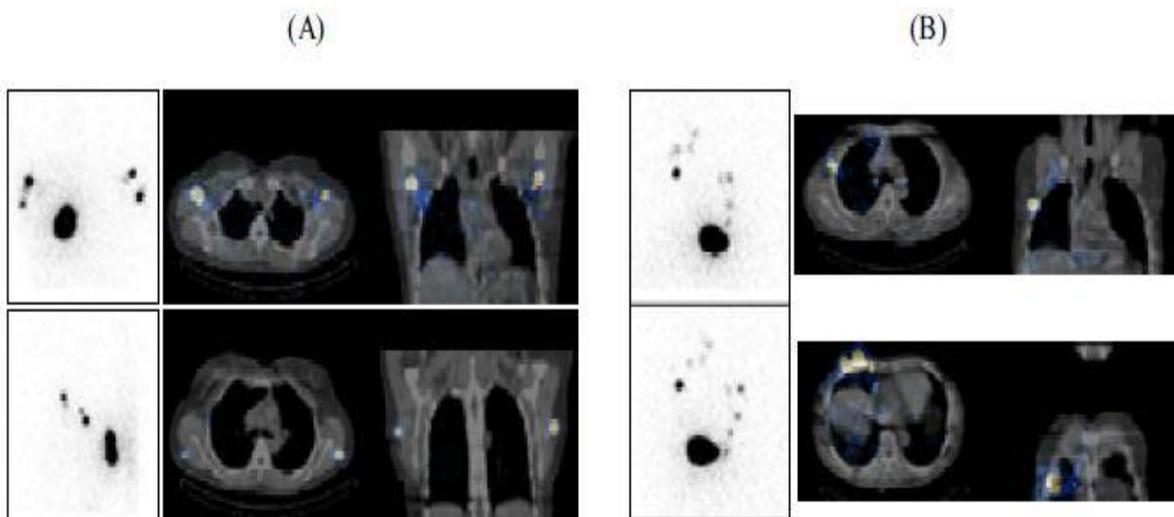


Figura 14: Informações adicionais sobre cintilografia planar fornecida por SPECT/CT em dois pacientes com melanoma maligno cutâneo, submetidos à linfocintilografia com ^{99m}Tc . (A) Melanoma localizado nas costas (B) Seções tomográficas com SPECT/CT em diferentes níveis (IAEA, 2008).

- **Cintilografia óssea para estadiamento de doença maligna**

A imagem cintilográfica do metabolismo ósseo é um meio eficiente para provar ou excluir metástase em pacientes propensos localizadas no esqueleto, na mama, próstata ou pulmão. A cintilografia óssea é incluída na maioria da gestão dessas neoplasias e é um dos procedimentos mais usados em todo o mundo (IAEA, 2008).

Comparando a acurácia diagnóstica da cintilografia óssea com Tecnécio-99m-Fosfonato com o FDG-PET (Flúor-18) em pacientes com carcinoma de tireoide, a sensibilidade do procedimento convencional com ^{99m}Tc não apresenta diferença significativa entre eles, no entanto, a especificidade do exame com ^{18}F se mostrou significativamente pior (IAEA, 2008).

Desde que a maioria das condições benigna é facilmente identificável na tomografia computadorizada, o SPECT/CT melhora a especificidade da cintilografia óssea, sem reduzir sua sensibilidade (IAEA, 2008).

O SPECT/CT atualmente é o padrão ouro de imagens para pesquisa de metástase óssea e tornou a cintilografia tradicional obsoleta. Resolveu problemas que incluem a qualidade da imagem de tomografia integrada no sistema híbrido necessária para essa

finalidade, bem como a acurácia diagnóstica relativa desta abordagem. A figura 15 mostra uma aplicação do SPECT/CT em cintilografia óssea (IAEA, 2008).

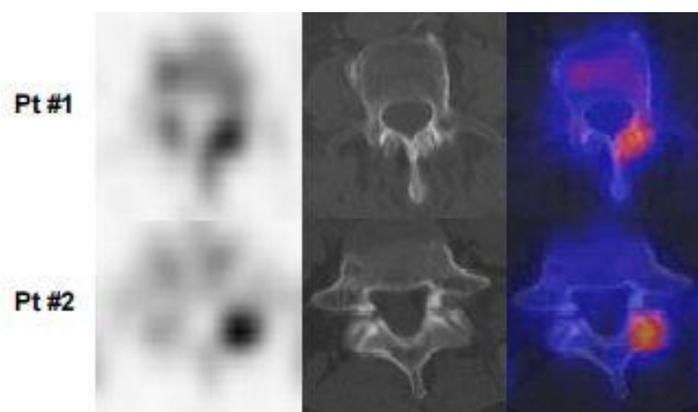


Figura 15: A linha superior mostra imagens fusionadas de uma vértebra lombar em SPECT/CT de um paciente com câncer de mama (Pt #1). Neste paciente, o aumento da absorção de $^{99m}\text{Tc-MDP}$ é devido a artrose articulação. A linha inferior retrata imagens semelhantes em outro paciente de câncer de mama (Pt #2). Embora no SPECT a aparência da lesão seja bastante semelhante ao do Pt #1, a sobreposição do CT é a prova de ser uma pequena osteólise (IAEA, 2008).

- **SPECT/CT Esquelético em ortopedia**

Até aproximadamente 1990, o raios X e a cintilografia óssea foram a escolha para procedimentos de diagnóstico em pacientes com doenças ortopédicas benignas. Embora a imagem da ressonância magnética tenha trazido uma mudança drástica para o procedimento de aquisição de imagem com uso de radionuclídeos, a cintilografia ainda é a melhor escolha para diagnosticar alterações funcionais do osso (IAEA, 2008).

No entanto, dificuldades em localizar precisamente anormalidades no metabolismo ósseo relativas à complexa anatomia do esqueleto têm enfraquecido seu papel clínico, mesmo tendo custos mais baixos que a imagem de ressonância magnética (IAEA, 2008).

Em princípio, o SPECT/CT seria adequado para superar esse problema, mas até agora não há estudos que comprovem que esta seja a melhor opção para esse tipo de diagnóstico (IAEA, 2008).

A figura 16 a seguir representa uma cintilografia óssea como finalidade de pesquisa ortopédica.

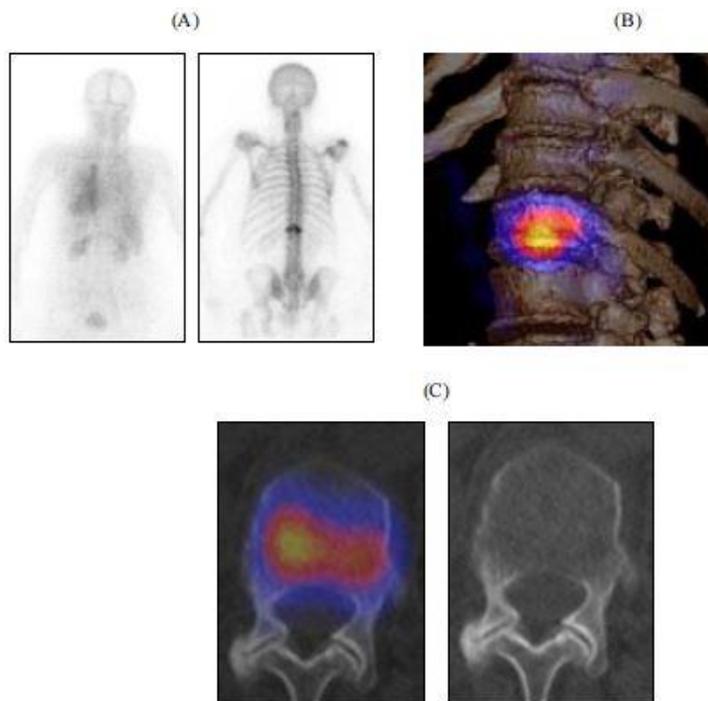


Figura 16: (A) Cintilografia esquelética de um paciente de 74 anos após um trauma recente mostrando forte captação de ^{99m}Tc em uma vértebra da coluna torácica inferior. (B) Reconstrução do volume em 3-D da fusão por SPECT/CT mostra que a lesão está na décima-segunda vértebra. A imagem fusionada (C) prova ser uma fratura (IAEA, 2008).

- **Massas cerebrais**

O diagnóstico de um tumor residual pós-operatório é um problema clínico desafiador, tanto pela falta de um contraste aprimorado para tomografia, como para a imagem de ressonância magnética, o que dificulta o planejamento da radioterapia, que necessita de um diagnóstico preciso (IAEA, 2008).

O Tálcio-201 é produzido em um acelerador tipo ciclotron e é administrado sob a forma de Cloreto de Tálcio. A absorção do radiofármaco após administração intravenosa depende tanto do fluxo sanguíneo, como também da fisiologia celular, que ocorre principalmente através do transporte ativo da bomba de cálcio e potássio (Na^+/K^+) através da membrana de células viáveis. Células tumorais demonstram maior absorção de Tálcio-201 do que o normal (IAEA, 2008).

Em tumores cerebrais primários, células inflamatórias ou tecidos conjuntivos na barreira hematoencefálica desempenham um papel fundamental na acumulação de Tálcio-201. Em indivíduos normais, uma pequena atividade de Tálcio-201 é visto na substância cerebral, pois este não pode passar da barreira hematoencefálica e se difunde no tecido cerebral. Por outro lado, a alta radioatividade é vista nas órbitas da base do crânio, região nasofaríngea, e próxima ao couro cabeludo. Não existem diferenças significantes entre imagens obtidas no início (10 minutos) e imagens de atraso (3 horas) (IAEA, 2008).

Em caso de hematoma cerebral é observado diminuição da absorção de Tálcio-201, vista nas primeiras imagens em comparação com as imagens de atraso. O pós-operatório com uso de Tálcio-201 demonstrou uma precisão significativamente melhor na detecção de tumor residual, mesmo que a ruptura da barreira hematoencefálica muitas vezes leve a incertezas na interpretação da tomografia computadorizada. A figura 17 mostra uma aplicação de SPECT/CT cerebral (IAEA, 2008).

O SPECT com Tálcio-201 também tem sido útil para diferenciar um tumor cerebral de necrose provocada pela radiação após a radioterapia, com informações mais confiáveis que a tomografia computadorizada ou a imagem de ressonância magnética no acompanhamento de tumores cerebrais (IAEA, 2008).

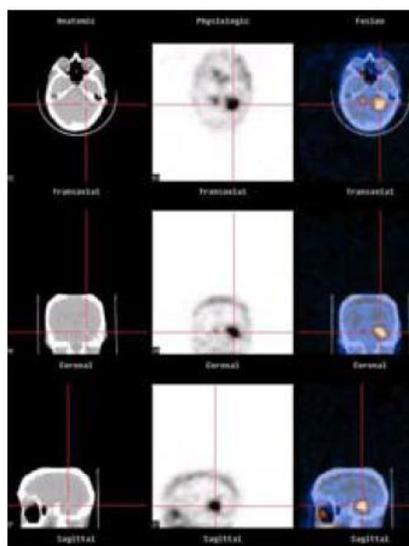


Figura 17: SPECT/CT realizado após administração de ^{201}Tl em um paciente encaminhado para diagnóstico duvidoso entre linfoma primário e toxoplasmose cerebral. A acumulação de ^{201}Tl no cerebelo esquerdo reforça o diagnóstico de linfoma primário (IAEA, 2008).

- **Nódulos pulmonares solitários**

A caracterização dos nódulos pulmonares solitários representa um problema clínico importante porque, embora seja causado por muitas condições benignas, o carcinoma broncogênico tem sido cada vez mais identificado como uma das principais etiologias, especialmente em idosos. A taxa de sobrevivência é menor que 5% para pacientes com a doença em estágio maligno avançado. O Tecnécio-99m associado com Depreotida tem sido usado com sucesso na aquisição de imagem de nódulos pulmonares solitários e se mostrou uma alternativa rentável em comparação ao ^{18}F FDG em PET (IAEA, 2008).

Embora ambos tenham demonstrado especificidade de 86% para pequenos tumores (até 1,5 cm) e sensibilidade igual de 92% para tumores grandes (maior que 1,5 cm), o SPECT/CT pode ajudar na interpretação de imagens melhorando a especificidade no diagnóstico, o estadiamento e, ainda na diferenciação de atividade fisiológica (região do mediastino, captação na medula óssea, na coluna vertebral, costelas e esterno) de absorções malignas no tumor primário ou em linfonodos metastáticos. Além disso, melhora a qualidade de imagem adquirida por raios X, baseada na correção de atenuação de nódulos menores (IAEA, 2008).

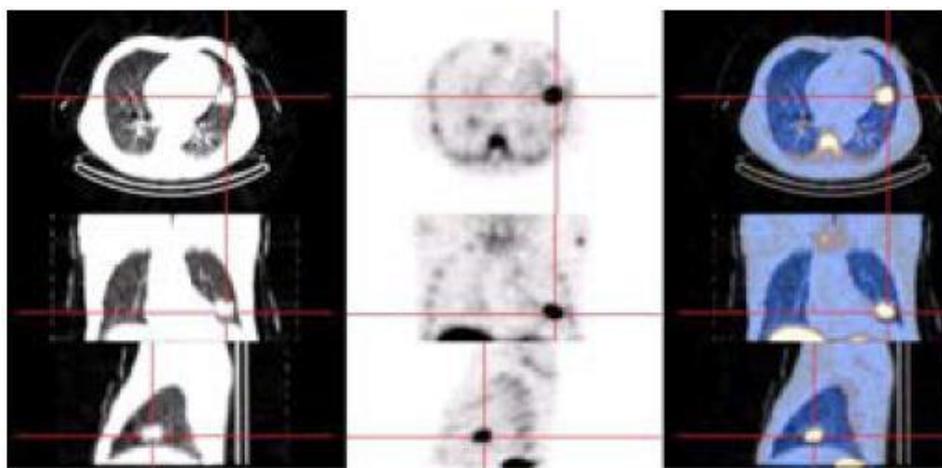


Figura 18: Imagens SPECT/CT transaxiais, coronais e sagitais obtidas após injeção de $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -depreotide em um paciente com uma massa pulmonar solitária ocasionalmente descoberto em um raio X de tórax. A captação intensa do traçador indica malignidade, enquanto as imagens SPECT/CT fusionadas sugerem possível envolvimento do pericárdio (IAEA, 2008).

- **Cintilografia de próstata**

A profunda localização da próstata na pélvis provoca significativo problema na obtenção da imagem funcional, ou de um câncer. Movimentos do paciente mudam o volume da próstata como também provocam alterações na forma de conteúdo da bexiga ou do reto durante a obtenção da imagem, isso pode aumentar o problema de fusão da imagem da próstata (IAEA, 2008).

A precisão do diagnóstico por imagem usando 185 MBq de Índio-111 tem sido usado na maioria dos pacientes por ter aumentado a precisão da varredura na cintilografia de próstata para diagnóstico de câncer, usando a fusão de imagens no SPECT/CT. Além disso, a imagem de cintilografia da próstata pode ser usada como guia na braquiterapia ou teleterapia com intensidade de feixe modulado (IAEA, 2008).

- **Localização pré-operatória de adenomas de paratireoides**

A cintilografia das paratireoides com ^{99m}Tc -sestamibi é fundamental para a localização pré-operatória de adenomas de paratireoides, especialmente em caso de aplicação de cirurgia mininvasiva de paratireoide (IAEA, 2008).

Mesmo antes da utilização do SPECT/CT na rotina clínica, o procedimento SPECT já tinha demonstrado superioridade da cintilografia planar usando ^{99m}Tc -sestamibi na localização e aquisição de imagens de adenomas de paratireoides e, especialmente ao planejar a melhor abordagem cirúrgica para adenomas, localizados principalmente no mediastino (IAEA, 2008).

No entanto, devido à falta de marcos anatômicos em imagens SPECT, alguma outra forma de imagem muitas vezes acabava sendo útil para uma melhor localização de adenomas em relação a outras estruturas anatômicas importantes (IAEA, 2008).

A implementação de equipamentos SPECT/CT melhorou dramaticamente esse cenário, permitindo a aquisição simultânea de imagens funcionais (derivadas da cintilografia com ^{99m}Tc -sestamibi) e de imagens morfológicas (derivadas do CT), figura 19. Em conclusão, a fusão de imagens obtidas pelo SPECT/CT com ^{99m}Tc -sestamibi tem se mostrado de grande valor no planejamento cirúrgico de hipertireoidismo primário e secundário (IAEA, 2008).

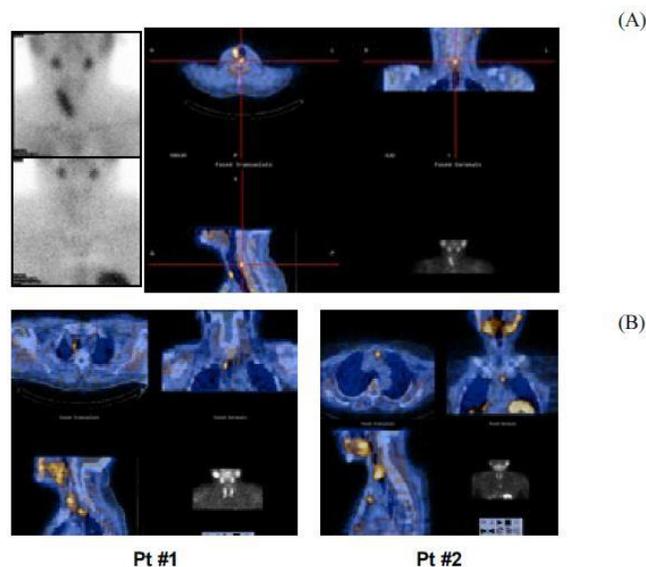


Figura 19: Pacientes com adenomas de paratireoides em que imagens SPECT/CT acabaram sendo cruciais para a exata localização no planejamento pré-operatório e planejamento da abordagem clínica. (A) (superior esquerdo) exame com ^{99m}Tc -sestamibi (inferior esquerdo) em um paciente que tinha sofrido uma cirurgia de paratireoide malsucedida (painel direito) habilitada para identificar a captação anormal de traçador localizada posteriormente à traqueia. (B) dois pacientes em quem a imagem SPECT/CT com ^{99m}Tc -sestamibi para localizar adenomas de paratireoide que levaram ao planejamento e abordagem cirúrgica ideal para sua retirada bem sucedida. No Pt #1 o adenoma foi localizado adjacente à parede direita da traqueia, enquanto que em Pt #2 o adenoma localizava-se no mediastino anterior (IAEA, 2008).

- **Diagnóstico de inflamações e infecções**

O diagnóstico de infecção e inflamação pode representar um desafio para os médicos. A delimitação exata e o diagnóstico dos focos infecciosos podem ser críticas em certos cenários clínicos e gerar ainda mais problemas para o paciente em caso de diagnóstico errado (IAEA, 2008).

Modalidades de imagens morfológicas e funcionais têm sido extensivamente utilizadas para o diagnóstico e monitoramento de infecções. Imagens de tomografia computadorizada e ressonância magnética fornecem alta qualidade de detalhes

anatômicos, no entanto, as anomalias estruturais próximas ao processo infeccioso, em alguns casos, só podem ser vistos na fase tardia da doença (IAEA, 2008).

A medicina nuclear ganhou um papel crucial na avaliação de pacientes com suspeita de infecções, principalmente por causa de sua capacidade de demonstrar mudanças nos processos fisiológicos e mudanças metabólicas que, por muitas vezes, precedem, em vários dias ou semanas, alterações anatômicas (IAEA, 2008).

Embora uma variedade de novos radiofármacos tenha sido explorada quanto a sua capacidade em detectar e localizar processos infecciosos, a cintilografia com Citrato de Gálio-67 e cintilografia com Índio-111 ou Tecnécio-99m-HMPAO marcando glóbulos brancos permanecem como as técnicas de obtenção de imagem funcional preferida para diagnóstico de infecções (IAEA, 2008).

A cintilografia com ^{67}Ga ou $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -HMPAO sofre de pobre resolução espacial e baixa especificidade, devido a ausência de marcos anatômicos. Estas limitações são um problema para a precisa localização de áreas de absorção anormal de traçador, mesmo quando o SPECT é utilizado. Parte dessas dificuldades pode ser superada quando uma imagem CT é utilizada lado a lado para visualização e, melhor ainda, se analisada com base na fusão de imagem (IAEA, 2008).

A introdução do uso do SPECT/CT na rotina clínica para a geração de imagens funcionais e anatômicas ofereceu novas opções para facilitar a localização e caracterização exatas de focos infecciosos. A figura 20 mostra uma aplicação do SPECT/CT na avaliação de infecções (IAEA, 2008).

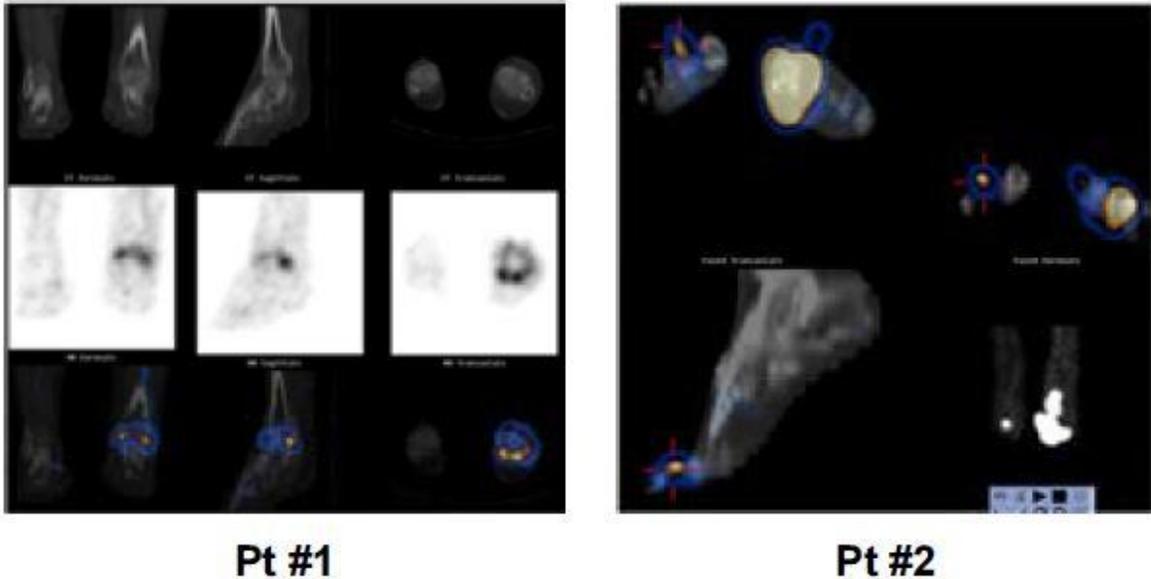


Figura 20: Pacientes com diferentes formas de osteomielite, com definição precisa da extensão da infecção por SPECT/CT. Osteomielite pós-traumática do tornozelo esquerdo no Pt #1 (painel esquerdo), fotografada após injeção de ^{99m}Tc . No Pt #2 (painel direito) o SPECT/CT executado durante cintilografia com ^{99m}Tc demonstra que a infecção de um diabético, onde não envolve só o tecido mole, mas também estruturas de ossos. A localização exata da doença era problemática e só foi possível em SPECT/CT (IAEA, 2008).

- **Procedimentos cardíacos**

Imagem de perfusão do miocárdio

Imagens de perfusão do miocárdio em estresse e repouso usando radiofármacos com ^{201}Tl e ^{99m}Tc por SPECT é, atualmente, a principal modalidade não invasiva para avaliação de doença arterial coronariana. No entanto, sua precisão é limitada por artefatos de imagem que podem causar falso-positivos e reduzir a especificidade do exame (IAEA, 2008).

Dentre os artefatos de imagem mais comuns tem-se o causado pela redução do fluxo de fótons causado pela atenuação em tecidos moles. Isto pode ser reconhecido devido à forma e localização típica do coração. Artefatos de atenuação normalmente ocorrem na parte anterior do miocárdio em mulheres com seios grandes, e na parte inferior em homens obesos. Embora a verdadeira ocorrência de artefatos seja desconhecida, estimativas de sua incidência variam entre 20% e 50% (IAEA, 2008).

A fim de determinar a verdadeira distribuição de radiotraçadores no miocárdio, várias técnicas foram desenvolvidas com o objetivo de gerar mapas de atenuação específicos do paciente (IAEA, 2008)..

Essas limitações são, em parte, superadas pela aquisição de imagem em um único dispositivo SPECT/CT, com o objetivo específico de corrigir a atenuação com um CT ideal (IAEA, 2008).

O SPECT cardíaco normalmente é executado usando uma gama câmara de duas cabeças e colimadores de furos paralelos, com os detectores alinhados a 90° um em relação ao outro, e a aquisição é realizada ao longo de uma órbita de 180° , em um período de 12 a 20 min. É usado o isótopo ^{201}Tl para repouso e $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -sestamibi para estresse, enquanto para uma aquisição simples o mesmo isótopo, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -sestamibi, é usado, para repouso e estresse (IAEA, 2008).

O estudo de CT baseado na correção de atenuação é realizado apenas sobre a área do coração, tal como definida pelo operador. Ao paciente é pedido que não se mexa durante a progressão do estudo, a fim de obter um bom registro entre as emissões e o exame de transmissão (IAEA, 2008).

O SPECT baseado na correção de atenuação do CT tem se mostrado o mais confiável e preciso exame de imagem cardíaca de alta qualidade através de alta resolução, alta taxa de contagem e baixo ruído, resultando em uma localização uniforme e previsível em pacientes com baixa probabilidade significativa de doenças coronárias. O método de correção de atenuação baseado na CT pode ser utilizado com sucesso em todos os protocolos cardíacos SPECT (IAEA, 2008).

Avaliação da significância de lesão da artéria coronária

A imagem de perfusão do miocárdio em repouso/estresse é a modalidade de imagem não invasiva estabelecida para o diagnóstico da extensão da doença arterial coronariana, com alta sensibilidade e especificidade (IAEA, 2008).

A imagem de perfusão do miocárdio determina a importância fisiológica de estenose limítrofe e define a presença de disfunção do miocárdio, mas não pode diagnosticar a arteriosclerose precoce e muitas vezes subestima a extensão da doença arterial coronária. Além disso, a imagem de perfusão do miocárdio não fornece

informações anatômicas precisas antes do procedimento de revascularização coronária (IAEA, 2008).

SPECT/CT cardíaco é uma técnica híbrida que combina informações detalhadas da anatomia dos vasos coronários com informações fisiológicas e função da perfusão miocárdica, através do alinhamento espacial exato de ambos os dados. Essa modalidade em evolução tem o potencial para se tornar o exame preferido para avaliação não invasiva de doença arterial coronariana (IAEA, 2008).

- **Imagem de embolia arterial pulmonar**

A acumulação de cálcio nas artérias coronárias é uma resposta do corpo para conter e estabilizar placas coronárias inflamadas. Avaliação do montante total de placas calcificadas geralmente tem relação com o estágio avançado de desenvolvimento de placa bacteriana e o teor (*score*) de cálcio na artéria coronária serve como o marcador indireto mais proporcional para a carga arteriosclerótica global. O método de CT baseado em quantificar o teor de cálcio na artéria coronária utilizado é o *multicortes* que fornece medições de teor de cálcio na artéria coronária (IAEA, 2008).

A pontuação do teor de cálcio na artéria coronária é dada usando métodos computacionais com base no produto da área da placa calcificada pelo coeficiente da sua densidade. Visualmente, a calcificação coronariana pode ser categorizada em graus de severidade: suave (mínima), moderada e marcada (extensa) (IAEA, 2008).

O acúmulo do teor de cálcio na artéria coronária é comum em adultos e aumenta com a idade. A extensão do acúmulo do teor de cálcio na artéria coronária tem relação com o risco anual de doença coronariana. Pacientes com extenso acúmulo de cálcio na artéria coronariana são susceptíveis a ter placas extensas não calcificadas que podem ser propensas à ruptura. Erosões em placas calcificadas raramente classificadas e associadas com síndromes coronarianas agudas. O SPECT/CT tem grande aplicação neste diagnóstico, já que é capaz de avaliar a perfusão, junto à quantificação do teor de cálcio, melhorando o diagnóstico e predição da doença (IAEA, 2008).

4 Proteção radiológica relacionada ao SPECT/CT

O fundamental objetivo de segurança é proteger as pessoas e o ambiente dos efeitos nocivos da radiação ionizante, sendo que esse objetivo deve ser alcançado sem limitar indevidamente a operação ou a realização de atividades das instalações que utilizam a radiação. O sistema de proteção e segurança tem como objetivo avaliar, gerir e controlar a exposição, e os riscos e efeitos para a saúde e o meio ambiente, reduzindo-os na medida do razoavelmente possível (IAEA, 2014).

A Agência internacional de Energia Atômica (*International Atomic Energy Agency-IAEA*) classifica a exposição à radiação na medicina como “situação de exposição controlada” e tem em seu escopo as praticas de uso de fontes fechadas e abertas, raios X, geração de radiofármacos em cíclotrons e aceleradores de partículas (IAEA, 2014).

O espaço necessário para um SPECT/CT depende do tipo de sistema a ser instalado. A *GE Hawkeye™* ou *GE Hawkeye-4™* requer apenas o mesmo tamanho de sala dos sistemas convencionais SPECT. O tamanho mínimo para esses tipos de unidades normalmente é 4,3 x 4,9 m. Por causa do tubo de raios X uma blindagem de chumbo da sala torna-se necessária. A taxa de exposição destes sistemas é aproximadamente 20 vezes menor do que para um CT multicortes convencional. Portanto, a blindagem de chumbo geralmente é necessária apenas para a parte da parede mais próxima ao tubo de raios X. A Figura 21 mostra um *layout* de uma sala típica para um equipamento *GE Hawkeye™* e as curvas de isodose indicando as regiões que exigem proteção. Além disso, o console do operador deve estar localizado externamente à sala de exames (O'CONNOR et al, 2006).

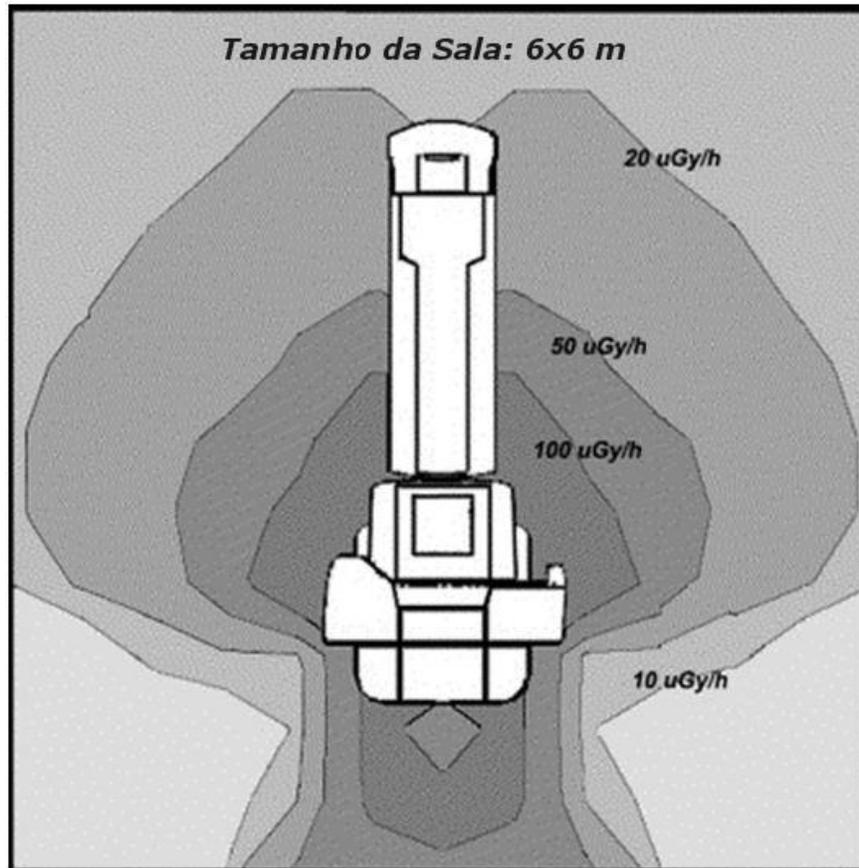


Figura 21: *Layout* de uma sala típica para um sistema SPECT/CT de baixo mAs (GE Hawkeye), onde as curvas de isodose são mostradas. Blindagem (chumbo 1,6 mm) é geralmente necessária para as paredes laterais e traseira do *gantry* (O'CONNOR et al, 2006).

Sistemas SPECT/CT que possuem um CT multicortes necessitam de uma sala maior (mínimo de 4,6 × 7,3 m) juntamente com uma cabine de controle em separado. Normalmente, pelo menos uma espessura de 1,6 mm de chumbo ou equivalente para a blindagem é necessário para as paredes, portas, assoalhos, tetos e barreira do operador. A equivalência em concreto seria cerca de 1,2 a 1,8 m de concreto com densidade padrão (147 lb/ft³). As salas de SPECT/CT com altas cargas de trabalho e com área livre no entorno da sala de exames podem precisar de blindagem mais densa do que espessura de 1,6 mm de chumbo ou 1,2 a 1,8 m de concreto para atender o recomendado em normas nacionais (CNEN-NN-3.01), ou seja, (1 mSv/ano) de proteção para pessoas em áreas livres (O'CONNOR et al, 2006).

Um fator adicional a ser considerado na localização destes instrumentos é a capacidade do peso que o piso suporta, por exemplo, a unidade *GE Hawkeye™* tem um peso de *gantry* de aproximadamente 2.495 Kg. Considerando que as unidades *Symbia™* da Siemens e a unidade *BrightView XCT™* da Philips apresentam pesos do *gantry* de aproximadamente 3.630 Kg e aproximadamente 4.536 Kg, respectivamente. Estes limites de peso devem ser verificados durante a fase de planejamento de novas instalações (O'CONNOR, et al, 2006).

No Brasil a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) são responsáveis pela avaliação dos projetos de blindagem a serem adotados pelos usuários da técnica (Sá, 2015).

5 Dosimetria em SPECT/CT

A tomografia computadorizada por emissão de fóton único associada à tomografia computadorizada de raios X (SPECT/CT) é considerada uma imagem tomográfica de medicina nuclear que melhora a precisão de diagnóstico para indicações clínicas específicas, devido à possível correção de atenuação das imagens funcionais do SPECT e da disponibilidade de informações anatômicas úteis fornecidas pelo CT (Mhiri et al, 2012).

De acordo com dados da literatura, o SPECT/CT em comparação com o SPECT sozinho provoca mais dose de radiação para o paciente, mas esta não é suficiente para causar efeitos determinísticos. A dose efetiva proveniente do SPECT depende da atividade administrada do radiofármaco e da idade do paciente, sendo que a dose efetiva média varia de dezenas a centenas de mSv alguns exames de medicina nuclear. No entanto, a introdução da tomografia computadorizada representa um aumento significativo da dose inferida ao paciente. Em geral, a dose efetiva (E) para exames de CT pode ser maior que a maioria das outras modalidades de diagnóstico por imagem. Alguns autores têm questionado a necessidade de reduzir estas doses, particularmente em crianças. A escolha dos fatores de técnica empregue no CT produz uma variação significativa na dose para o paciente. Além disso, um tecnólogo que opera um equipamento híbrido deve ter o conhecimento bem desenvolvido em duas técnicas diferentes, o que demanda um treinamento específico e, ainda, seria desejável uma certificação para o operador (Mhiri et al, 2012).

A dose efetiva total recebida por cada paciente em exames SPECT/CT representa a soma da dose efetiva induzida pelo radiofármaco administrado mais a dose efetiva recebida pelo CT, de acordo com as recomendações da ICRP 80 (ICRP,1999). A Tabela 4 mostra que o dose efetiva média varia de acordo com o tipo de exame: 1926,9 mSv para varreduras realizadas com ^{131}I -pos terapêutico, 5,4 mSv para varreduras com ^{123}I -MIBG e 4,2 mSv para cintilografia óssea (Mhiri et al, 2012).

Tabela 5: Doses efetivas observadas para alguns exames típicos de Medicina Nuclear (MN) em SPECT/CT (Mhiri et al, 2012).

		Dose efetiva média em exames de MN típicos			Dose efetiva média da porção do CT em exames de MN típicos		Dose efetiva total SPECT/CT
Tipo de estudo	Nº de pacientes	Atividade média (MBq)	Dose efetiva por unidade de atividade (mSv/MBq)	Dose efetiva média (mSv)	Dose efetiva média (mSv)	Variação da Dose efetiva média (mSv)	Dose efetiva total (mSv)
^{99m} Tc-MDP	30	740	0,0057	4,2	3,5±1,2	0,3-6,5	7,7
^{99m} Tc-MIBI	20	925	0,009	8,3	2,3±0,7	1,0-3,5	10,6
¹¹¹ In-octreotide	10	185	0,054	10,0	2,7±1,3	1,9-5,4	12,7
¹³¹ I pos-terapia	30	3700	0,52	1924,0	2,9±1,9	1,2-5,9	1926,9
¹²³ I-MIBG	10	185	0,013	2,4	3,0±1,1	1,4-5,8	5,4

O aumento percentual de dose efetiva pela inclusão do CT é de cerca de 125% para verificações de ¹²³I-MIBG, 83% para cintilografia óssea, e é considerada insignificante em caso de tratamento com ¹³¹I (0,15%). A tabela 5 mostra o aumento percentual da dose efetiva atribuída ao uso do CT na técnica SPECT/CT. De acordo com dados da literatura, os resultados de dose efetiva para a combinação SPECT/CT representa um aumento significativo na dose para o paciente (Mhiri et al, 2012)..

Tabela 6: Aumento percentual de dose efetiva para exames típicos de medicina nuclear SPECT/CT devido à porção CT (Mhiri et al, 2012).

Tipo de estudo	Nº de pacientes	Dose efetiva total (mSv)	Aumento percentual na dose efetiva devido ao CT (%)
^{99m} Tc-MDP	30	7,7	83
^{99m} Tc-MIBI	20	10,6	28
¹¹¹ In-octreotide	10	12,7	27
¹³¹ I pos-terapia	30	1926,9	0,15
¹²³ I-MIBG	10	5,4	125

É verdade que a introdução de CT no processo de diagnóstico em medicina nuclear resulta em um aumento significativo da dose recebida pelo paciente, no entanto, os níveis de radiação estão muito abaixo do limiar para a ocorrência de efeitos determinísticos (Hapdey et al, 2009).

Sabendo que o principal risco para os pacientes é a ocorrência de câncer radioinduzidos, e que este risco aumenta em torno de 4% para cada Sv de dose efetiva total recebida por um paciente, em nossa série, este aumento do risco induzido pela exposição adicional relativa à dose de CT é considerado baixo, e não excede 0,02%. Tendo em conta a contribuição do diagnóstico SPECT/CT em comparação ao exame SPECT sozinho, este aumento de dose seria justificado devido ao benefício proporcionado ao paciente. No entanto, esta radiação "adicional" deve ser otimizada, de acordo com o objetivo desejado (anatômica e/ou atenuação correção) e com os parâmetros de CT disponíveis na máquina. A maneira mais eficaz para reduzir as doses recebidas é adaptar os protocolos de irradiação e parâmetros de aquisição para a morfologia individual do paciente (Mhiri et al, 2012).

Dessa forma, os procedimentos de aquisição terão que ser um processo de otimização e gerenciamento de documentos, como parte de um programa de garantia de qualidade envolvendo diferentes atores: operador, físico médico e médico. Estes profissionais vão participar plenamente na elaboração de procedimentos de boas práticas, recomendações envolvendo otimização das aquisições, pós-processamento de dados (por exemplo, escolha do algoritmo de reconstrução SPECT, seus parâmetros, correções, entre outros) (Hadpay et al, 2009).

6 Conclusão

Com a vantagem de ver o metabolismo e a fisiologia de várias partes do corpo, o papel do SPECT/CT vem crescendo, especialmente em aplicações cardíacas e oncológicas. Junto com ao CT o uso da técnica resulta em maior especificidade e maior sensibilidade na cintilografia e reduz o número de diagnósticos indeterminados.

A superioridade do SPECT/CT sobre a cintilografia planar ou SPECT foi demonstrado para imagens de doenças benignas e malignas do esqueleto, tireoide, sistema neuroendócrino, adenoma de paratireoide, doenças cardíacas, entre outras, já que a fusão das imagens do TC podem ser fusionadas com as imagens da câmara cintilográfica ou vistas separadamente.

Porém, apesar de justificado em função do benefício ao paciente, o uso da técnica deve ser otimizada e controlada para cada paciente, individualmente.

Com o avanço tecnológico dos radiofármacos, o SPECT/CT deve se tornar cada vez mais relevante na aquisição de imagem em um futuro próximo.

7 Referências bibliográficas

IAEA-International Atomic Energy Agency, 2008, *IAEA-TECDOC-1597 Clinical Applications of SPECT/CT: New Hybrid Nuclear Medicine Imaging System*, Vienne.

Mariani G., et al, *A review on the clinical uses of SPECT/CT*, J.N. Medicine, Review article, January 2010

IAEA-International Atomic Energy Agency, 2008, *Clinical Applications of SPECT/CT: New Hybrid Nuclear Medicine Imaging System*, Vienne

Sá, L.V., 2015, *Exposições médicas no Brasil, notas de aula, Física Médica em Medicina Nuclear*, Universidade Federal do Rio de Janeiro/UFRJ

Barros, S., Couto, N., 2015, *Alinhamento de Imagens Médicas*, Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, disponível em <https://web.fe.up.pt/>

Hapdey, S., Gardin, I., Salles, A., Rousselière, F., Sanson, A.E., 2009, *Imagerie hybride: principe, dosimétrie et contrôle de qualité*, J.Médecine Nucléaire, 33, 286-289

General Electric, GE Health Care, 2016, *Nuclear Medicine/Products*, disponível em <http://www3.gehealthcare.com/en/products>

Philips, 2016, *Nuclear Medicine/Products*, disponível em <http://www.usa.philips.com/healthcare>

Siemens, 2016, *Nuclear Medicine/Products*, disponível em <https://usa.healthcare.siemens.com>

IAEA-International Atomic Energy Agency, 2014, *Nuclear Medicine Physics: A Handbook for Teachers and Students*, Vienne

IAEA-International Atomic Energy Agency, 2009, HUMAN HEALTH SERIES No. 6, *QUALITY ASSURANCE FOR SPECT SYSTEMS*, Vienne

CNEN-Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2013, *Norma CNEN 3.05 Requisitos de Radioproteção e Segurança em Serviços de Medicina Nuclear*, Rio de Janeiro, disponível em www.cnen.gov.br

ANVISA-Agência Nacional de Vigilância Sanitária, 2008, *RDC 38 Regulamento técnico para instalação e funcionamento de serviços de medicina nuclear “in vivo”*, disponível em www.anvisa.gov.br

Oliveira, R. Santos, D., Ferreira, D., Coelho, P., Veiga, F., 2006, *Preparações radiofarmacêuticas e suas aplicações*, Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas

CNEN-Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2014, *Norma CNEN NN 3.01 Requisitos Básicos de Radioproteção*, Rio de Janeiro, disponível em www.cnen.gov.br

O’CONNOR, M.K., KEMP, B.J., 2006, *Single-photon emission computed tomography/computed tomography: basic instrumentation and innovations*, Semin Nucl Med 36, 258–266

Mhiri, A., Slim, I., Ghezaiel, M., Slimène, M.F.B., 2012, *Estimation of Radiation Dosimetry for some Common SPECT-CT Exams*, International Journal of Biotechnology for Wellness Industries, 2012, 1, 266-269

ICRP-International Commission on Radiological Protection, 1999, *Publication 80 Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals*, disponível em <http://www.icrp.org>