

**MEDI**

**CINA**



**NUCLEAR**



**COLÉGIO LÚMEN**

## Introdução

Já no final do século XIX, a primeira aplicação interna das radiações em seres humanos, consistiu em administrar Rádio-226 para determinar a velocidade da circulação sanguínea entre os dois braços de um ser humano. O conceito de “marcador radioativo” evoluiu muito com a chamada “Medicina Nuclear”, ramo da ciência responsável pela realização de **diagnósticos e tratamentos** utilizando radionuclídeos e radiofármacos, sendo uma especialidade médica e física.

*Obs: Os radionuclídeos são átomos com núcleos instáveis;*

*Os radiofármacos são preparações farmacêuticas em suas fórmulas químicas;*

No diagnóstico, as imagens obtidas são “retratos internos” de como e onde ocorrem (nos órgãos examinados) as concentrações de radiofármacos em um indivíduo examinado. **A imagem é adquirida de dentro para fora.** Tais imagens são chamadas de **cintilografias**, cintigrafias, ou ainda, “brilhografias”, e são formadas em telas de computadores após a detecção da radiação emitida pelo paciente em equipamentos chamados de “**Gama-Câmaras**” que podem possuir uma, duas ou mais “cabeçotes de detecção”, posicionados ao redor do paciente, com a intenção de detectar a radiação eletromagnética que este paciente emite. As técnicas **SPECT e PET** (que serão apresentadas mais adiante) também fazem parte da área de diagnóstico em medicina nuclear.

Já na terapia com radiofármacos, o objetivo é concentrar estes produtos ao redor de um tecido ao qual se deseja concentrar doses, isto é, depositar as energias que as radiações emitem. Nestes casos, são usados radioisótopos que geralmente emitem partícula beta preferencialmente.

Tanto no diagnóstico quanto na terapia com radiofármacos, não existe encapsulamento das fontes, de forma que **o paciente permanece contaminado com material radioativo** após o procedimento realizado por mais algum tempo.

Para que o órgão-alvo (sítio alvo) seja estudado na Medicina Nuclear, é necessário que o radiofármaco seja absorvido pelo tecido em questão. Essa absorção é condicionada pelo funcionamento do órgão alvo. Neste sentido a medicina nuclear se diferencia das demais especialidades médicas por imagem por se tratar de uma **modalidade totalmente fisiológica**, ou seja, a distribuição do radiofármaco e a formação da imagem ocorrem por intermédio do metabolismo do paciente.

Nesta disciplina, alguns aspectos da física das radiações e também de proteção radiológica, aplicados à medicina nuclear, serão importantes para compreensão do preparo e aplicação dos radiofármacos. Características das fontes produzidas e utilizadas, assim como dos aparelhos de detecção também serão abordados, em conjunto com os aspectos clínicos resultantes dos procedimentos realizados em uma clínica de medicina nuclear.



Como os isóbaros acima não pertencem a elementos químicos iguais, suas propriedades químicas se diferenciam.

**Isótonos:** átomos com número de nêutrons (n) iguais que se diferem pelo número atômico (Z) e de massa (A). Magnésio (Mg) e Silício (Si) são exemplos de Isótonos.



$$P = 12 \quad n = 14 \quad P = 14 \quad n = 14$$

Estes isótonos pertencem a diferentes elementos químicos, o que nos leva a concluir que possuem diferentes propriedades químicas e físicas.

**Isótopos:** átomos pertencentes a um mesmo elemento químico, portanto possuem números atômicos iguais. Os isótopos se diferenciam com relação ao número de massa, acompanhe os exemplos:

O elemento químico Magnésio (Mg) possui os seguintes isótopos:

${}_{12}\text{Mg}^{24}$  (presente na natureza com a porcentagem de 78,9%)

${}_{12}\text{Mg}^{25}$  (presente na natureza com a porcentagem de 10,0%)

${}_{12}\text{Mg}^{26}$  (presente na natureza com a porcentagem de 11,1%)

Os isótopos de hidrogênio recebem nomenclatura própria, veja:

${}_{1}\text{H}^1$  – Hidrogênio comum, prótio, hidrogênio leve;

${}_{1}\text{H}^2$  – Deutério;

${}_{1}\text{H}^3$  – Trítio, tritério, tricério.

**Isômeros:** átomos pertencentes a um mesmo elemento químico. Além da semelhança do número atômico também existe semelhança entre os números de massa. Esses átomos apenas se diferem pelo seu estado de energia. É o caso do Elemento Tecnécio. A letra “m” colocada logo após a massa indica a metaestabilidade do núcleo.



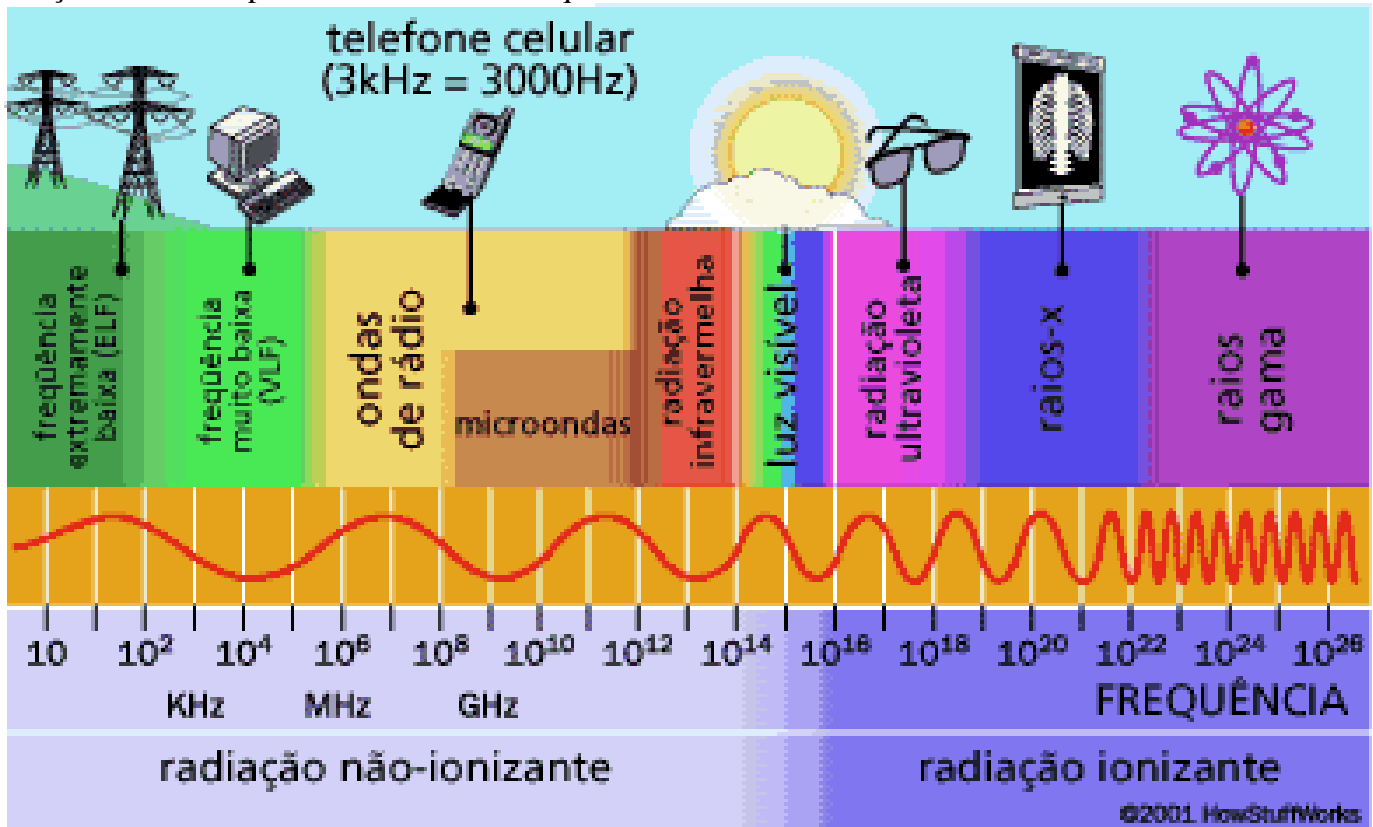
### As radiações nucleares podem ser de dois tipos:

- Corpuscular ou particulada (Alfa, Pósitron, Negatron): possui massa e carga elétrica. Sua energia depende de sua velocidade;
- ondas eletromagnéticas (Gama, X, Luz Visível etc.): não possuem massa e se propagam com a velocidade da luz de 300.000 km/s, para qualquer valor de energia.

A identificação desses tipos de radiação foi feita, utilizando-se uma porção de material radioativo, com o feixe de radiações passando por entre duas placas, polarizadas com um forte campo elétrico.

## O espectro eletromagnético

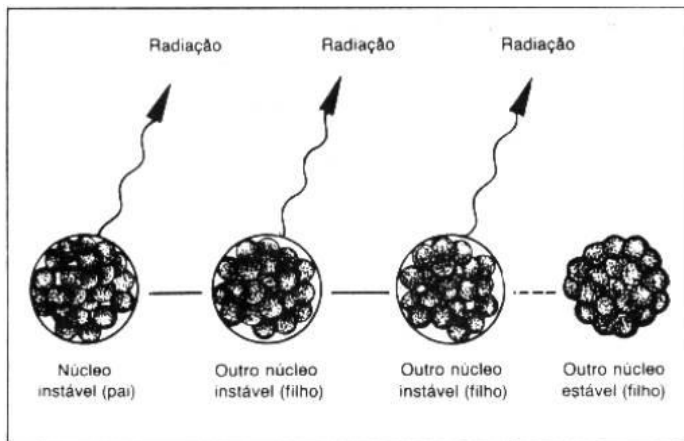
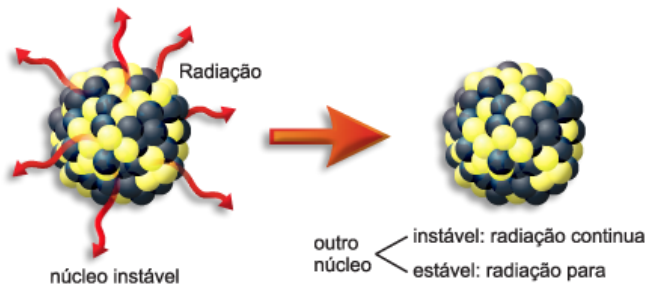
O espectro eletromagnético é a distribuição da intensidade da radiação eletromagnética com relação ao seu comprimento de onda ou frequência.



Ao observar a figura acima, pode-se notar uma divisão das radiações ionizantes das radiações não ionizantes. Ondas de rádio, microondas e luz visível são exemplos de radiações com energia insuficiente para ionizar significativamente a matéria. A partir da radiação ultravioleta, a energia é suficientemente alta para ionizar os átomos, isto é, retirar elétrons de suas eletrosferas. Quanto menor o comprimento de onda, maior é sua frequência e maior é a energia. Da esquerda para a direita temos um aumento gradual de energia dos diferentes tipos de ondas eletromagnéticas. As radiações X e Gama possuem tanta energia, que podem penetrar a matéria tão melhor quanto menor for seu comprimento de onda. Na medicina nuclear a radiação gama tem importante papel, pois é a partir dela que as imagens cintilográficas podem ser adquiridas.

## Decaimento Radioativo

A radioatividade é um fenômeno nuclear, isto é, tem origem no núcleo do átomo. Ela não é afetada por nenhum fator externo, como pressão, temperatura etc.. É regida por três Constantes Físicas: Tipo de Radiação, Energia e Meia-Vida. O decaimento consiste em um fenômeno natural em que o átomo libera



energia ao emitir partículas e ondas eletromagnéticas. Ele pode emitir radiação diversas vezes até que encontre o equilíbrio, isto é, a estabilidade. Os elementos radioativos naturais emitem três tipos de radiações principais: *alfa* ( $\alpha$ ), *beta* ( $\beta^+$  ou  $\beta^-$ ), *gama* ( $\gamma$ ). Um núcleo radioativo natural emite radiação  $\alpha$  ou radiação  $\beta$ , nunca as duas simultaneamente. Para diminuir a energia, o núcleo emite radiação  $\gamma$  junto com a radiação  $\alpha$  ou  $\beta$ . A natureza dessa radiação (se é Alfa ou Beta) é condicionada pelo número de prótons e nêutrons que o átomo possui. Sempre que o núcleo de um átomo emite uma partícula ele é transformado em outro tipo de átomo. A exemplo disso, o Iodo-131 ao liberar a partícula beta negativa se transforma no Xenônio-131; o Rádio-226 ao liberar uma partícula Alfa se transforma em Radônio-222. Durante o processo de decaimento radioativo, o elemento PAI libera energia e o elemento resultante é denominado FILHO.

## Energia de ligação Nuclear

Os elementos nucleares (Prótons + Nêutrons) se mantêm unidos no núcleo graças a energia de ligação nuclear. É um tipo de energia invisível que evita que essas pequenas partículas sejam expulsas do núcleo. Porém, com o aumento considerável do número de prótons e nêutrons, a energia de ligação nuclear passa a ser insuficiente, e o núcleo do átomo fica instável, necessitando liberar energia para entrar em equilíbrio. Neste caso, elementos com alto número atômico emitem partículas Alfa.

Entretanto, elementos de baixo número atômico também podem emitir radiação. Isto é possível, pois a quantidade de prótons (carga positiva) e nêutrons (carga neutra) mantém uma relação numérica bem definida em núcleos estáveis. Se essa relação for desfeita, mesmo núcleos pequenos podem emitir radiação. Este

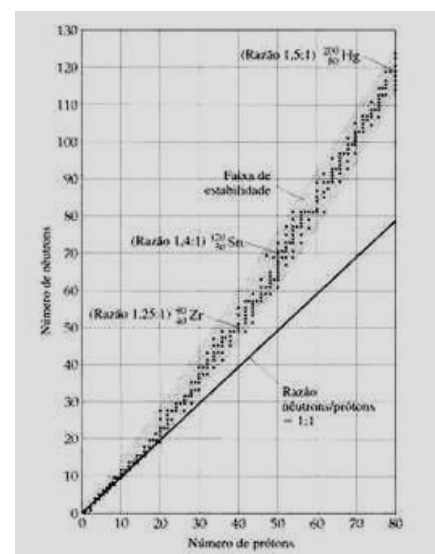


gráfico relaciona o número de prótons ao número de nêutrons e prevê a estabilidade ou instabilidade de um átomo qualquer. Elementos que estão à esquerda da Linha de Estabilidade (LE) apresentam um decaimento por Beta Negativa, e os que estão à direita, por Beta Positiva. Os elementos que estão sobre a LE encontram-se estáveis, isto é, não necessitam emitir radiação, pois a ralação do número de prótons e nêutrons encontra-se em equilíbrio.

Esse conhecimento possui importante aplicação dentro da medicina nuclear, visto que cada tipo de radiação Beta possui uma aplicação bem definida. O quadro abaixo lista as três constantes físicas de decaimento radioativo dos elementos mais utilizados nessa modalidade.

Radionuclídeo	Decaimento Principal	T1/2	Energia do Fotopico (KeV)
Molibdênio-99	Beta Negativo	66 Horas	740
Tecnécio-99m	Radiação Gama	6 Horas	140
Iodo-131	Beta Negativo	8 Dias	364
Flúor-18	Beta Positivo	2 Horas	Dois fótons com 511

## Radiação Alfa “ $\alpha$ ”

Primeira Lei da Radioatividade: quando um núcleo emite uma partícula Alfa, há um decréscimo de 2 no Número Atômico (Z) e 4 na Massa Atômica (A).



### Características:

- Núcleos de Hélio (He) ejetados do Átomo (2 prótons e 2 nêutrons);
- Possuem carga positiva;
- Esse tipo de decaimento é comum para elementos de alto nº atômico (Z) da tabela periódica;
- Poder de penetração: pequeno. São detidos pela pele, folha de papel ou 7 cm de ar.
- Conduz o núcleo filho a um Número Atômico (Z) menor;
- Essa radiação não é utilizada em aplicações diagnósticas ou terapêuticas (altas doses radioativas no paciente);
- São exemplos desse decaimento o Urânio e o Rádio.

## Radiação Beta Negativa “β<sup>-</sup>” (Negatron)

Segunda Lei da Radioatividade: quando um núcleo emite uma partícula Beta negativa, seu número atômico aumenta em uma unidade e seu número de massa não se altera;



Características:

- Trata-se de um elétron negativo ejetado do núcleo;
- Sua massa é desprezível;
- Condiciona a **Transição isobárica**;
- Poder de penetração (um pouco maior que Alfa)
- Esse tipo de decaimento é comum para elementos ricos em nêutrons;
- Há a conversão de um nêutron em um próton e a produção de um elétron negativo;
- A relação N/P diminui como resultado desse decaimento;
- São exemplos de desse decaimento o <sup>99</sup>Mo e o <sup>131</sup>I;

## Radiação Beta Positiva “β<sup>+</sup>” (Pósitron)

Quando um núcleo emite uma partícula Beta Positiva, seu número atômico diminui em uma unidade e seu número de massa não se altera;



Características:

- Partícula com carga positiva (elétron positivo);
- Ocorre em radionuclídeos pobres em nêutrons;
- Sua massa é desprezível;
- Condiciona a **Transição isobárica**;
- Há a conversão de um próton em um nêutron e a produção de um elétron positivo.
- O principal exemplo desse decaimento é o <sup>18</sup>F - Flúor

## Transição Isomérica

Nenhum radionuclídeo sofre decaimento radioativo por emissão de radiação Gama apenas. Contudo, alguns elementos radioativos se mantêm num estado metaestável após a emissão de uma partícula (estado excitado dura mais que  $10^{-9}$  segundos, e a letra “m” é colocada logo após o número de massa para indicar o fenômeno). Após isso, o átomo libera apenas energia eletromagnética (radiação Gama). Esse fenômeno é grande interesse em aplicações diagnósticas. A transição (isobárica) do Mo-99 para o Tc-99m é marcada pela liberação de uma partícula Beta Negativa e um fóton de Radiação Gama. Porém o tecnécio formado permanece no estado metaestável, isto é, com excesso de energia, que posteriormente é liberado em forma de Radiação (transição isomérica). Sua aplicação na medicina é desejável, pois desta forma pode-se esperar que o Mo-99 se transforme em Tc-99m para só então administrá-lo em pacientes, poupando-o da dose radioativa liberada na transição isobárica. Observação: A transição isomérica não transforma o elemento químico em outro elemento.

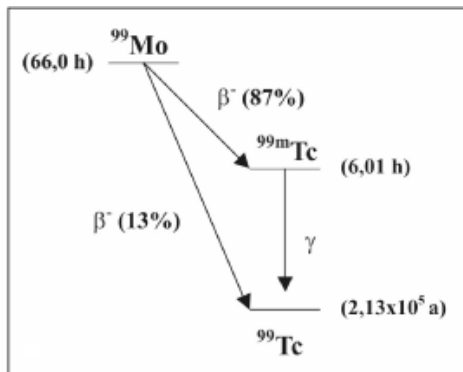
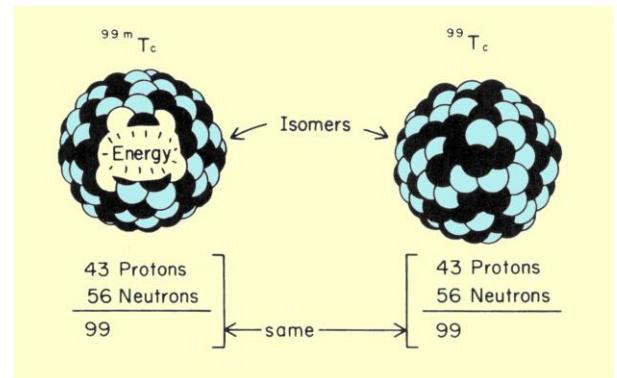


Figura 2. Diagrama do decaimento do  $^{99}\text{Mo}$  a  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ .



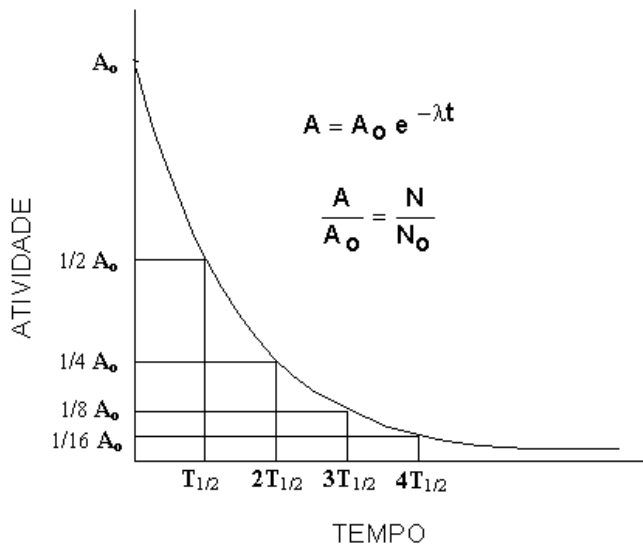
## Outras Considerações do Decaimento Radioativo

### Meia-Vida

Fenômeno físico aleatório, pois não é possível prever quando um átomo de uma amostra irá decair (emitir  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , etc.), mas de tal sorte que é possível prever quantos átomos de uma amostra ainda estarão ativos (radioativos) após certo intervalo de tempo. Em outras palavras: “é o tempo necessário para a desintegração da metade dos átomos radioativos presentes em uma amostra qualquer”

Obs: “Decair” significa “Perder” energia.

ÁTOMO INSTÁVEL ► EMISSÃO DE PARTÍCULAS e/ou de RADIAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS



## Função Exponencial

Trata-se de um ESTUDO ESTATÍSTICO, isto é, analisa-se o comportamento de uma amostra radiativa, e não de um único átomo, sendo:

$$A(t) = \text{atividade de uma amostra} \quad T_{1/2} f = \frac{0,693}{\lambda}$$

$A_0 = \text{atividade inicial}$   
 $\lambda = \text{constante de decaimento radiativo}$   
 $t = \text{tempo de decaimento}$   
 $T_{1/2} = \text{tempo de meia-vida}$

Chama-se de Meia-vida física ( $T_{1/2}f$ ) ao tempo necessário para que o número de átomos instáveis na amostra decaia para a metade do inicial.

A atividade é utilizada para se medir o processo de decaimento de uma amostra radioativa. Esta grandeza mede o número de transformações que um núcleo radioativo está realizando por unidade de tempo, ou seja, conta-se o número de fótons e partículas que o átomo está emitindo num determinado período de tempo. A unidade da grandeza Atividade é o Bq = Becquerel, e 1 Bq correspondem a uma transformação por segundo ou  $s^{-1}$ . Matematicamente calcula-se atividade pela seguinte equação:

**OBS:** Antigamente a unidade da atividade era o Curie (Ci), que correspondia à atividade de uma amostra de 1 grama de rádio ( $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ ).

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

### UNIDADE CONVENCIONAL

1 curie (Ci) =  $3,7 \times 10^{10}$  desintegrações por segundo (dps)

### UNIDADE DO SISTEMA INTERNACIONAL

1 becquerel (Bq) = 1 dps

### CURIES → BECQUERELS

1 Ci =  $3,7 \times 10^{10}$  dps = 37 GBq

1 mCi =  $3,7 \times 10^7$  dps = 37 MBq

1  $\mu$ Ci =  $3,7 \times 10^4$  dps = 37 KBq

### BECQUERELS → CURIES

1 Bq = 1 dps =  $2,7 \times 10^{-11}$  Ci = 27 pCi

1 MBq =  $10^6$  dps =  $2,7 \times 10^{-5}$  Ci = 0,027 mCi

1 GBq =  $10^9$  dps = 27 mCi

**Meia-Vida Biológica** ( $T_{1/2}b$ ): Quando um elemento químico, radioativo ou não, é introduzido no organismo, sofre metabolização e é eliminado pelas vias normais. Chamamos de meia vida biológica ao tempo necessário para que metade deste elemento metabolizado pelo organismo seja eliminada. Descreve o clareamento biológico de um dado

radionuclídeo num tecido em particular ou num órgão.

**Meia-Vida Efetiva** ( $T_{1/2}ef$ ): a meia-vida real de um radiofármaco num sistema biológico é dependente da meia-vida física e da meia-vida biológica. Como o decaimento físico e o decaimento (clareamento) biológico ocorrem simultaneamente em paralelo e a relação entre eles é dada por:

$$T_{1/2}ef = \frac{T_{1/2}b \times T_{1/2}f}{T_{1/2}b + T_{1/2}f}$$

O conceito de meia-vida biológica não é tão preciso quanto o de meia vida física. Este pode variar entre os indivíduos e não segue necessariamente um processo exponencial regular. Por exemplo: a meia-vida do xenônio  $^{133}\text{Xe}$  no estudo da ventilação pulmonar é determinado pela frequência e profundidade da respiração, além da presença ou não de doença pulmonar; entretanto, o termo meia-vida biológica, é útil quando se pensa na real taxa de exposição do paciente à radiação, durante os procedimentos de imagem.

**Vida-média ( $\tau$ ):** Embora a desintegração seja um processo probabilístico, e não seja possível prever o momento em que o átomo vai sofrer a desintegração, podemos matematicamente calcular a duração média de um núcleo instável ou a vida média dos seus átomos. A vida média de um elemento radioativo é avaliada como sendo a soma das idades de todos os átomos, dividida pelo número total de átomos.  $\tau = 1 / \lambda$  (obs: meia-vida é diferente de vida-média)

### Tabela de decaimento radioativo

Tabelas de radionuclídeos de meia-vida física curta, como a do tecnécio-99m abaixo simplificam cálculos da atividade de uma amostra radioativa ao longo do tempo que só seriam possíveis com o uso da equação exponencial do tópico. A tabela apresentada ao lado foi construída com base na física de decaimento do Tecnécio-99m. Todo elemento químico radioativo possui uma tabela semelhante a esta

Fator de Decaimento de $^{99m}\text{Tc}$			
$T_{1/2}(^{99m}\text{Tc}) = 6,02\text{h}$			
	6h		0,50
15 min	0,97	6h30min	0,47
30 min	0,94	7h	0,44
1h	0,89	7h30min	0,42
1h30min	0,84	8h	0,40
2h	0,79	8h30 min	0,37
2h30min	0,75	9h	0,35
3h	0,71	9h30 min	0,33
3h30min	0,67	10h	0,31
4h	0,63	10h30 min	0,30
4h30min	0,59	11h	0,28
5h	0,56	11h30 min	0,26
5h30min	0,53	12h	0,25

## Bases Tecnológicas Aplicadas à Medicina Nuclear

### **Radiofarmácia:**

Radiofarmácia é um ramo da ciência que estuda os aspectos químicos, farmacológicos, bioquímicos, fisiológicos e disciplinas similares que se relacionam com o desenvolvimento de substância marcada com radioisótopo.

Atualmente todos os radioisótopos de uso clínico são produzidos em reator nuclear e ciclotron. Os radioisótopos naturais, como, por exemplo o urânio, possuem meia vida longa, emissões inadequada para detecção, são pesadas e tóxicas, por isso não têm função clínica ou diagnóstico em medicina nuclear.

O reator nuclear promove bombardeio de núcleos de peso atômico médio, originando radioisótopos ricos em nêutrons que sofrem decaimento beta negativo. Esta reação denomina-se ativação por nêutrons. Uma vez que o produto filho é o mesmo elemento, os átomos radioativos e os estáveis não podem ser separados, resultando num produto de baixa atividade específica e quantidade significativa de carreador de material alvo original. A ativação por nêutrons de  $^{98}\text{Mo}$  foi o primeiro método usado para obter o molibdênio-99 para o sistema de gerador de  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ . Atualmente a fissão do Urânio tem sido o método empregado como a forma mais eficiente dessa produção.

### **Radiofármacos**

Os radiofármacos são compostos sem ação farmacológica, que tem na sua composição um radionuclídeo, e são utilizados em Medicina Nuclear para diagnóstico e terapia de várias doenças. É uma substância que, por sua forma farmacêutica, quantidade e qualidade de radiação, pode ser utilizado no diagnóstico e tratamento de doenças qualquer que seja a via de administração utilizada. Pode-se dizer que radiofármacos são moléculas ligadas a elementos radioativos que são utilizados em uma especialidade médica denominada medicina nuclear. Sua finalidade é, após ser administrada no paciente, ser absorvido pelo tecido de interesse e, do seu interior, emitir radiação para os detectores da Gama-Câmara, a qual é transformada em sinal digital (imagem).

Os radiofármacos são compostos de duas partes:

- **Traçador** (fármaco): tem a capacidade de se ligar a um órgão-alvo específico e ligar-se a um radionuclídeo;
- **Radionuclídeo**: elemento radioativo que, ao ser carregado pelo fármaco, terá a capacidade de evidenciar o órgão-alvo de acordo com sua assimilação pelo mesmo e ser identificado pela gama-câmara.

As características físico-químicas do radiofármaco determinam a sua farmacocinética, isto é, a sua fixação no órgão-alvo, metabolização e eliminação do organismo, enquanto que as características físicas do radionuclídeo determinam a aplicação do composto em diagnóstico ou terapia.

Quando a finalidade é diagnosticar patologias, utiliza-se na composição dos radiofármacos, radionuclídeos emissores de radiação gama. Quando a finalidade é terapêutica, o efeito deletério da radiação é utilizado para destruir células tumorais. Nesse caso, os radiofármacos são compostos por radionuclídeos emissores de radiação particulada  $\beta^-$  que possuem pequeno poder de penetração, mas são altamente energéticas, ionizando o meio que atravessam e causando uma série de efeitos que resultam na morte das células tumorais.

Radiofármacos de tecnécio metaestável  $^{99m}\text{Tc}$  são os mais utilizados para a obtenção de imagens em medicina nuclear.

## Gerador de $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$

### Histórico

O campo da medicina nuclear teve grande impacto com o desenvolvimento do gerador  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ . O gerador original foi desenvolvido no Brookhaven National Laboratory (BNL) em 1957, por Walter Tucker e Margaret Greene. O primeiro pesquisador a utilizar  $^{99m}\text{Tc}$  foi Dr. Claire Shellabarger no BNL em 1960. Somente em 1961, quando o Argonne Cancer Research Hospital adquiriu seu primeiro gerador de  $^{99m}\text{Tc}$ , várias outras instituições iniciaram a utilização deste radionuclídeo, que se tornou rotineira a partir do final dos anos 60, experimentando desde então um crescimento exponencial. A partir de 1966, os geradores de  $^{99m}\text{Tc}$  passaram a ser produzidos e distribuídos, e nesta época foi desenvolvido um gerador encapsulado e esterilizado por E. R. Squibb e Sons. Desde então, o uso de  $^{99m}\text{Tc}$  tornou-se comum e uma variedade de 7 compostos marcados, foram desenvolvidos para aplicação na medicina nuclear. Até 1981 o  $^{99m}\text{Tc}$  utilizado no Brasil era obtido de geradores importados. A partir deste ano o IPEN vem produzindo geradores cromatográficos em coluna de alumina, utilizando o molibdênio obtido por fissão do  $^{235}\text{U}$  importado do Canadá. Atualmente, 7 tipos de geradores são oferecidos à classe médica, com atividades de  $^{99m}\text{Tc}$  de 9,25 até 74 GBq ( 250 mCi até 2000 mCi ). Durante o período de 1956 a 2006, o monopólio de produção de radioisótopo pertenceu, por lei, à Comissão Nacional de Energia Nuclear. A partir do ano de 2006 foi flexibilizado o monopólio para a produção de radionuclídeos de meia vida curta, o que inclui aqueles utilizados em Medicina Nuclear como, por exemplo, o  $^{18}\text{F}$  e o  $^{99m}\text{Tc}$ . O IPEN produz e comercializa geradores de  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$  e os distribui a todos os serviços de medicina nuclear do Brasil. A embalagem do gerador contém 13 frascos com vácuo, 13 frascos de solução salina isotônica.

### Composição

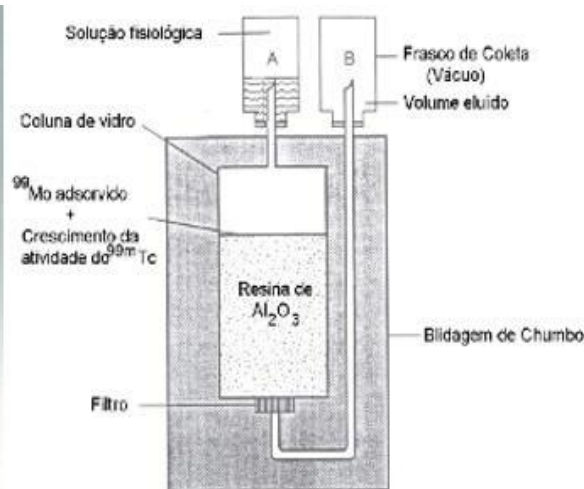
O tradicional sistema gerador cromatográfico que utiliza  $^{99}\text{Mo}$  oriundo da reação nuclear  $^{235}\text{U}$ , adsorvido em óxido de alumínio, constitui o principal método atualmente empregado para obtenção de  $^{99m}\text{Tc}$ . Esta técnica envolve a eluição do pertecnetato ( $^{99m}\text{TcO}_4^-$ ) com solução salina. O  $^{99}\text{Mo}$  (elemento pai) é retido numa substância inerte, como alumina, decaindo para o  $^{99m}\text{Tc}$  (elemento filho), sendo então, separado com cloreto de sódio, sob a forma de pertecnetato de sódio ( $\text{Na}^{99m}\text{TcO}_4^-$ ). Nesse método o  $^{99m}\text{Tc}$  é separado com elevada eficiência (> 90%), com excelente perfil de eluição, é de fácil operação e manuseio, além de requerer pouca massa de alumina para a adsorção, devido à alta atividade específica do  $^{99}\text{Mo}$ , constituindo assim a técnica mais adequada de separação do  $^{99m}\text{Tc}$  pelo  $^{99}\text{Mo}$ , quando este é obtido

como um dos produtos da fissão do  $^{235}\text{U}$ . O tecnécio- $^{99\text{m}}$  é produzido na forma de pertecnetato  $^{99\text{m}}\text{TcO}_4$ , que não se liga à coluna de alumina, e assim pode ser eluído facilmente com uma solução salina (solução de  $\text{NaCl}$ ). Após uma eluição uma nova retirada com atividade máxima só poderá ser realizada aproximadamente 24 horas.

Antes dos geradores serem comercializados eles devem passar por um controle de qualidade, certificando que este atende aos requisitos necessários para a aplicação médica. Além do controle antes da comercialização, cada instituição deve realizar testes de controle de qualidade, alguns deles são o de pureza radionuclídica, que analisa a quantidade de outros radionuclídeos no eluato. No caso do gerador de  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ , o contaminante mais comum é o próprio molibdênio-99.



## Funcionamento

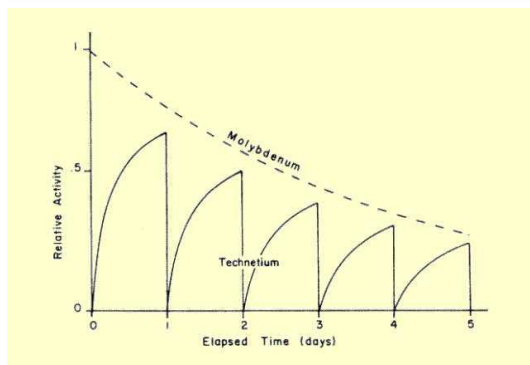
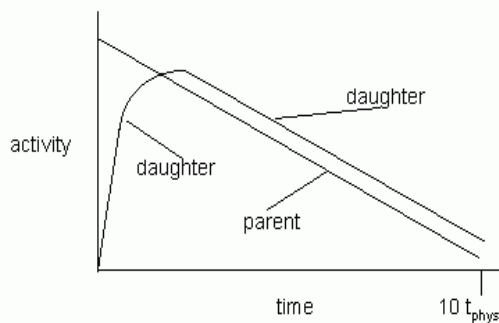


Vários sistemas de geradores foram explorados no decorrer dos anos. O gerador mais importante e utilizado na medicina nuclear é o gerador de  $^{99}\text{Mo} / ^{99\text{m}}\text{Tc}$ . Após a produção de  $^{99}\text{Mo}$  ele é quimicamente purificado e passa por uma coluna de troca aniônica composta de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). A coluna carregada é colocada num invólucro de chumbo, com tubos inseridos nas extremidades da coluna para permitir sua eluição. O gerador de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  trata-se de um invólucro blindado que contém  $^{99}\text{Mo}$  radioativo dentro de um frasco selado. Este  $^{99}\text{Mo}$  é utilizado, pois a partir do seu decaimento pode ser gerado o  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ . O gerador deveria ser trocado semanalmente, para que o serviço de medicina nuclear não trabalhe com geradores de alta atividade inicial. Porém isto depende da demanda de cada serviço, pois existem

geradores com atividade de 250 mCi até de 2000 mCi, que são utilizados conforme sua necessidade. O gerador consiste de um pequeno frasco contendo  $^{99}\text{Mo}$  radioativo diluído em alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Como o  $^{99}\text{Mo}$  ao decair gera  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , logo o frasco contém molibdênio misturado com tecnécio. Para retirar o  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  do gerador, utiliza-se um frasco com solução salina para que se misture ao frasco gerador e consiga remover o  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ . O frasco com solução salina é colocado na entrada do gerador onde há uma agulha curta e fina, que serve para a retirada da solução salina, e outra agulha mais longa para que o ar entre no frasco. Na saída do gerador é colocado outro frasco com vácuo. A solução então irá circular devido a diferença de pressão, por uma tubulação muito fina até a coluna de molibdênio e agregar o  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  e assim, chegar pela tubulação de saída até o frasco com vácuo. Como o frasco contém  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , após a eluição, ele deve ser blindado para proteção do trabalhador. Após um período de crescimento ideal (aproximadamente 24 horas), o gerador pode ser novamente eluído com rendimento teórico máximo de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ .

A cada dia, uma atividade menor de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  é eluída devido ao próprio decaimento do elemento pai. Geradores que demoram a chegar ou que não foram eluídos por muito tempo, podem apresentar uma quantidade significativa de Tc-99 no eluato. O que pode prejudicar na marcação dos fármacos já que não se comporta quimicamente da mesma forma que o  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ . Os radiofármacos que se destinam ao diagnóstico clínico efetuado em câmara cintilográfica (gama-câmara) têm na sua composição um radionuclídeo emissor de radiação gama. Nesse caso, é preferível que o radionuclídeo incorporado no radiofármaco não emita radiação beta, uma vez que esse tipo de radiação apenas serviria para aumentar a dose de radiação absorvida pelo paciente; além de provocar degradação de imagem devido à energia das partículas beta.

## Rentabilidade do Gerador



As figuras ao lado demonstram a relação entre o decaimento do Molibdênio-99 e o máximo de Tecnécio-99m, atingido 23 horas após a eluição. Isto é muito conveniente se a atividade do  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  disponível é adequada ao consumo diário; caso não seja, o gerador pode ser eluído ou “ordenhado” mais de uma vez por dia. A segunda eluição do dia, se realizada 7 horas depois da primeira, terá uma rentabilidade de aproximadamente 50 % e 75 % após 14 horas. Apesar de se dar muita atenção à taxa de crescimento (recuperação) do  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , é bom lembrar que ele está sempre decaindo ao mesmo tempo que cresce dentro do gerador. Geradores recebidos após envio comercial ou que não foram eluídos por longo tempo têm uma quantidade significativa do carreador  $^{99}\text{Tc}$  no eluato (pertenetato). Como o carreador  $^{99}\text{Tc}$  se comporta quimicamente da mesma forma que o  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , ele pode prejudicar a marcação dos fármacos, isto é, o tecnécio radioativo ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ) competiria com o tecnécio não radioativo ( $^{99}\text{Tc}$ ) pelos sítios de ligação com o fármaco, resultando em marcação deficiente e contaminantes radioquímicos indesejados na preparação final.

### Cálculo de Rendimento da Eluição do Gerador $^{99}\text{Mo}$ - $^{99\text{m}}\text{Tc}$

$$\text{Rendimento} = \text{Atividade inicial do gerador} \times \text{Fator de Decaimento do } ^{99}\text{Mo} \times \text{Fator de Recuperação do } ^{99\text{m}}\text{Tc}$$

OBS.: Este cálculo deve ser utilizado para calcular o rendimento de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  de um gerador que já foi eluído anteriormente.

OBS. 2: A atividade inicial do gerador deve ser considerada como a atividade de calibração do gerador. Ex.: 500 mCi, 1000 mCi, 1500 mCi, 2000 mCi.

### Cálculo de Rentabilidade

Deve ser observado o intervalo de tempo entre o primeiro e o último horário

	Horário de Calibração	Horário da Última eluição	Horário de Previsão
Fator de <b>Decaimento</b> do Molibdênio - $^{99}$	X	_____	X
Fator de <b>Recuperação</b> do Tecnécio - $^{99\text{m}}$	_____	X	X

$^{99}$   
Fator de decaimento do Mo

Hora	0	2	4	6	8
0	1,000	0,979	0,959	0,939	0,919
10	0,900	0,872	0,863	0,845	0,828
20	0,811	0,794	0,777	0,761	0,745
30	0,730	0,715	0,700	0,685	0,671
40	0,657	0,643	0,630	0,617	0,604
50	0,591	0,579	0,567	0,555	0,544
60	0,533	0,521	0,511	0,500	0,489
70	0,479	0,469	0,460	0,450	0,441
80	0,432	0,423	0,414	0,365	0,397
80	0,427	0,381	0,373	0,328	0,357
100	0,350	0,343	0,335	0,296	0,322
110	0,315	0,308	0,302	0,266	0,290
120	0,284	0,278	0,272	0,240	0,261
130	0,255	0,250	0,245	0,216	0,235
140	0,230	0,225	0,220	0,194	0,211
150	0,207	0,203	0,198	0,175	0,190
160	0,186	0,182	0,179	0,157	0,171
170	0,168	0,164	0,161	0,142	0,154
180	0,151	0,148	0,145	0,128	0,139
190	0,136	0,133	0,130	0,115	0,125
200	0,122	0,120	0,117	0,103	0,113

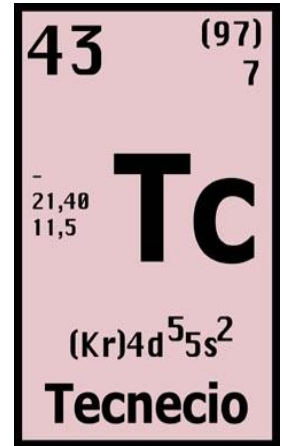
Fator de Recuperação de $^{99\text{m}}\text{Tc}$			
$T_{1/2} (^{99\text{m}}\text{Tc}) = 6,02\text{h}$	8h30 min	0,59	
30 min	0,05	9h	0,61
1h	0,10	10h	0,65
1h30min	0,14	11h	0,68
2h	0,19	12h	0,72
2h30min	0,23	13h	0,74
3h	0,27	14h	0,77
3h30min	0,31	15h	0,79
4h	0,34	16h	0,81
4h30min	0,37	17h	0,83
5h	0,41	18h	0,85
5h30min	0,44	19h	0,86
6h	0,47	20h	0,88
6h30min	0,49	21h	0,89
7h	0,52	22h	0,9
7h30min	0,54	23h	0,91
8h	0,59	24h	0,92

Como produto da eluição, o que se espera é apenas o pertecnetato, isto é, o  $^{99m}\text{TcO}_4^-$  e o Cloreto de Sódio 0,9 %. Qualquer outro elemento que apareça nesse composto é considerado um tipo de impureza. Abaixo estão listadas algumas das principais impurezas que podem estar presentes no pertecnetato:

**Tipos de impureza:**

- Radionuclídica: Presença de Molibdênio ( $^{99}\text{Mo}$ ).
- Radioquímica: Presença de  $^{99m}\text{Tc}$  no estado químico indesejado, isto é, que não seja o estado de oxidação + 7 ( $\neq ^{99m}\text{TcO}_4^-$ ).
- Química: Presença do íon  $\text{Al}^{3+}$
- Biológica: Presença de microrganismos ou pirogênios.

O tecnécio é o elemento químico mais utilizado na preparação de radiofármacos de imagens, dentre suas contribuições à saúde da população brasileira, destaca-se o seu papel na oncologia e cardiologia. Atualmente, a medicina nuclear brasileira realiza mais de 8.000 procedimentos diários utilizando geradores de tecnécio-99m, isso por que esse elemento emite radiação gama cujo valor energético é igual a 140 keV e apresenta um tempo de meia vida igual a 6 horas o que é suficiente para seu preparo e administração. Abaixo estão listados alguns dos motivos que fazem do Tecnécio-99m o radionuclídeo mais utilizado em Medicina Nuclear:



Características ideais dos radionuclídeos utilizados em diagnóstico:

- Fóton gama com energia adequada para sua detecção (são ideais entre 100 a 200 KeV); (Tecnécio = 140 keV)
- Meia-vida relativamente curta (Tecnécio = 6 horas);
- Não emitir partículas, somente radiação Gama (O Tecnécio possui transição isomérica, isto é, radiação gama pura);
- Biodistribuição adequada;
- Ausência de toxicidade ou efeitos secundários;
- O radioativo e o fármaco não devem sofrer dissociação nem *in vitro* nem *in vivo*;
- Marcar um grande número de fármacos;
- Facilmente disponível (em forma de gerador)

Características ideais dos radionuclídeos utilizados em Tratamentos:

- Ter capacidade de se concentrar o mais especificamente possível no tecido alvo para que suas células sofram o maior impacto (dano) possível da ação da radiação;
- Transferir ao tecido alvo alta taxa de dose de radiação para destruir o tecido;
- Não prejudicar os tecidos sadios adjacentes;
- Emissores beta negativo, de energia elevada, preferencialmente acima de 1000 KeV;
- A meia vida dependerá de vários fatores dentre eles a cinética de concentração no tecido alvo;

- Deve haver uma compatibilidade entre o tempo necessário para o radiofármaco se concentrar no tecido alvo (tumor) e a meia vida efetiva do radiofármaco (tempo de absorção e eliminação);
- Exemplos: Iodo-131 (ablação da tireóide ou tratamento de hipertireoidismo); Samário-153 e Estrôncio-89 (terapia da dor óssea). Estrôncio-89 (Beta Terapia – Evita aparecimento de Quelóides).

### **Marcação do Radiofármaco (Complexação)**

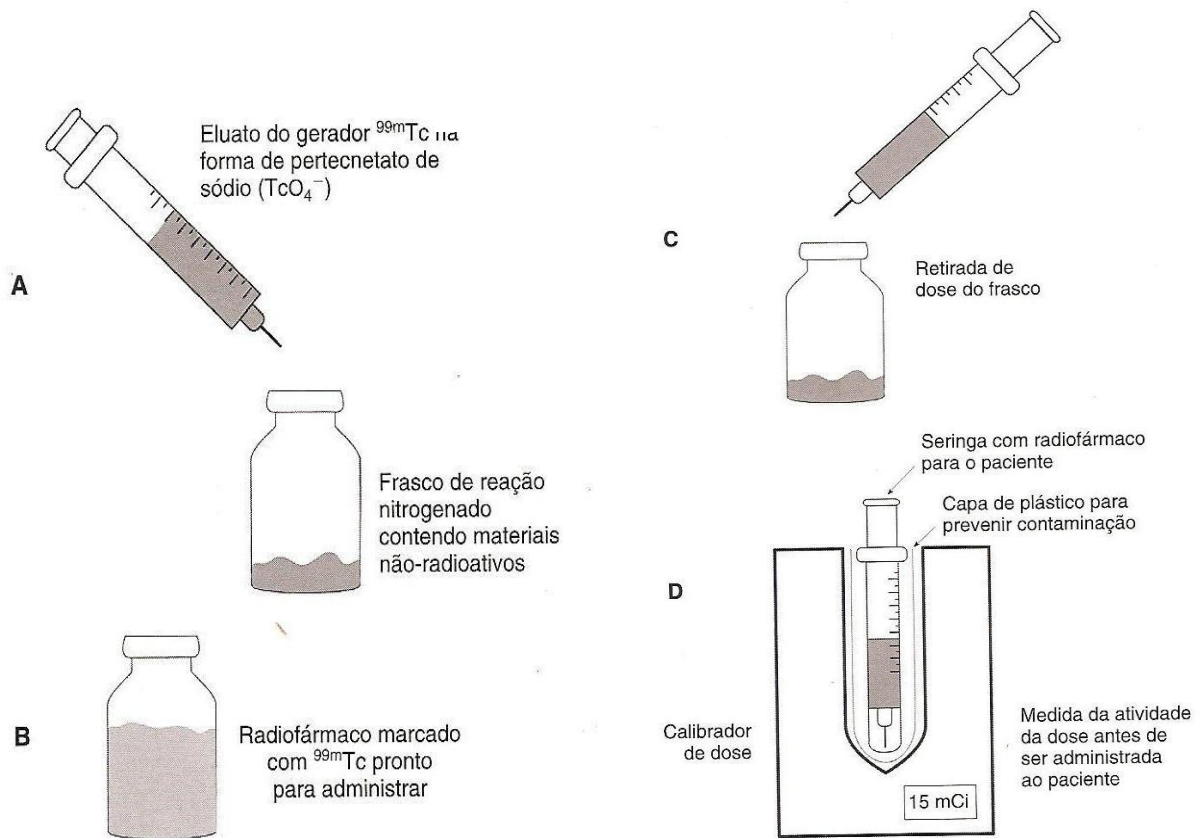
A marcação do radiofármaco deve ser realizada cuidadosamente, obedecendo a uma série de normas pré-estabelecidas para cada tipo de fármaco. Lembre-se que o Radiofármaco é formado por dois componentes: O Material radioativo (responsável por produzir o sinal radioativo do interior do paciente) e o Fármaco (biomolécula sinteticamente produzida para participar de um processo fisiológico, sendo absorvido pelo seu tecido-alvo).

Após a eluição, o Pertecnetato de Sódio é aspirado numa seringa e, após o ajuste da dose, é colocado no frasco que contem o fármaco desejado. A união entre o material radioativo e o fármaco é chamada de Marcação. A dose deve levar em conta o número de pacientes, o decaimento entre os momentos de marcação e administração da dose, além da duração da estabilidade *in vitro* do produto marcado. O Radiofármaco marcado é colocado num recipiente de chumbo apropriado. As doses são tiradas individualmente do frasco e ajustadas para cada paciente.

O material radioativo mais utilizado, como já foi comentado, é o  $^{99m}\text{Tc}$ . O fármaco a ser utilizado depende de qual o órgão que se quer estudar. Existem numerosos fármacos, cada qual com sua especificidade por algum tipo de tecido. Para estudar o tecido cerebral, por exemplo, devemos proceder a Marcação de  $^{99m}\text{Tc}$  + ECD, ou seja, do Radionuclídeo mais o fármaco apropriado para este exame. Abaixo estão relacionados os principais fármacos que são marcados com  $^{99m}\text{Tc}$ :

- SESTAMIBI: Perfusão do Miocárdio
- ECD: SPECT Cerebral ou perfusão Cerebral
- MDP: Cintilografia óssea
- DTPA: Exame renal dinâmico (Função Glomerular)
- DMSA: Exame renal estático (Função Tubular)
- DISIDA: Estudo das Vias biliares
- FITATO: Cintilografia de fígado e baço e Nódulo Sentinela
- DTPA: Cintilografia Pulmonar (Inalação)
- MAA: Cintilografia Pulmonar (Perfusão) e ROLL (Localização Radioguiada de Lesão Oculta)
- DEXTRAN: Linfocintilografia
- ESTANHO COLOIDAL: Esvaziamento gástrico; RGE (refluxo gastroesofágico)
- PIRO: Hemácias Marcadas (Ventriculografia, pesquisa de sangramento digestivo)

**Observação: O pertecnetato, quando injetado sozinho, se biodistribui pelas glândulas salivares, tireóide e estômago.**



- Para o ajuste da dose de marcação utiliza-se um calibrador especial, chamado Curiômetro;
- A dose de pertecnetato deve ser ajustada conforme indicação do fabricante do fármaco utilizado e, por meio de seringa/agulha, o eluato deve ser adicionado ao frasco de forma estéril;
- Adicionar de 3 a 5 ml de pertecnetato e agitar o frasco suavemente;
- Cada radiofármaco necessita de tempo determinado (geralmente 15 minutos) à temperatura ambiente para completar a reação de marcação;
- Assim que as doses forem retiradas do frasco, a seringa deve ser imediatamente identificada com o nome do seu respectivo radiofármaco e colocada dentro da blindagem apropriada;

## Procedimentos Normais de Preparo e Administração de Radiofármacos

- Radiofármacos somente podem ser administrados mediante pedido médico;
- O Médico Nuclear e a radiofarmácia devem conferir o pedido médico para assegurar o radiofármaco e a dose corretos;

- Os testes de Controle de Qualidade (tanto do pertecnetato quanto do Radiofármaco) devem ser feitos antes da administração nos pacientes;
- Inspeccionar cada dose antes da administração para pesquisar partículas ou outros materiais estranhos, como fragmentos de borracha da tampas dos frascos etc..
- O valor das doses podem variar somente 10 % da dose prescrita.

## Gravidez e Lactação

- Indagar às pacientes em idade fértil a possibilidade de Gravidez;
- Em situações terapêuticas, o radiofármaco somente pode ser administrado mediante resultado de exame Beta HCG.
- Alguns exames podem ser realizados em mulheres grávidas, porém o médico deve ser informado sobre a situação para avaliar os riscos da administração do radiofármaco.
- Radioiodetos possuem a capacidade de atravessar a placenta e podem ser nocivos ao feto, o qual desenvolve a tireóide na 10 semana de gestação.
- Se lactante, suspender a amamentação por três semanas após a administração do  $^{131}\text{I}$ ,  $^{125}\text{I}$ ,  $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{201}\text{Tl}$ . Se o radioisótopo for  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  a suspensão da amamentação deve ser feita por duas meias vidas, no mínimo.

## Pacientes Pediátricos

- A dose administrada em crianças não deve seguir a mesma proporção da dose dos adultos;
- Cálculos para doses pediátricas:

$$\text{Dose pediátrica} = \frac{\text{Peso do paciente (kg)}}{70 \text{ kg}} \times \text{Dose do adulto}$$

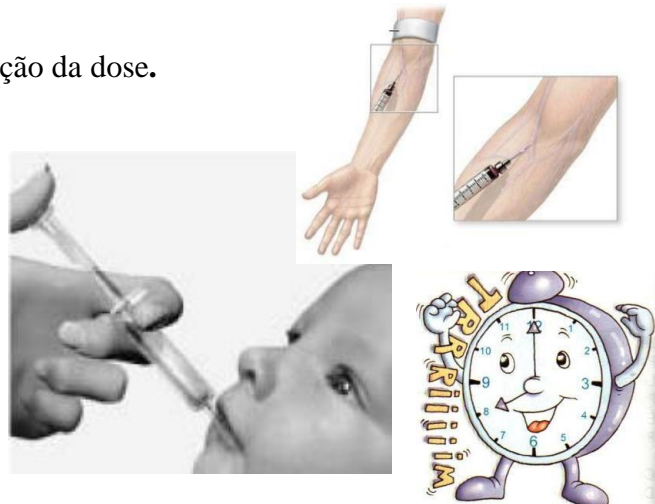
Outra fórmula alternativa é a regra de Webster:

$$\text{Dose pediátrica} = \frac{\text{Idade} + 1}{\text{Idade} + 7} \times \text{Dose do adulto}$$

- O médico deve ser consultado para aprovação da dose.

## Cuidados a serem tomados. Conferir:

- Paciente certo
- Dose certa
- Radiofármaco certo
- Via de administração certa
- Hora certa



## Contaminação Radioativa e Procedimentos de Descontaminação

A contaminação radioativa pode ser definida como a presença de material radioativo indesejável em qualquer meio ou superfície podendo oferecer riscos à saúde das pessoas envolvidas que podem ser irradiadas externamente ou incorporar os radionuclídeos contaminantes. Além disso, ela pode interferir nos dados de trabalhos radiométricos, ou comprometer a qualidade de um produto.

A contaminação é considerada de superfície quando o contaminante radioativo estiver localizado na superfície dos objetos, das áreas de trabalho ou na pele das pessoas. É considerada “fixa” quando não for transferível de uma superfície contaminada para a outra não contaminada.

Os riscos apresentados por uma contaminação radioativa dependem do tipo e da quantidade dos radionuclídeos contaminantes e da facilidade com que eles podem ser transferidos para outros locais.

A transferência pode se dar pelo contato com a superfície contaminada ou pela suspensão dos contaminantes no ar.

As atividades que envolvem a utilização de materiais radioativos devem ser planejadas e executadas para se evitar ou reduzir a contaminação radioativa, quer seja dos trabalhadores, das áreas de trabalho ou do meio ambiente.

A descontaminação de superfície é o processo que tem como objetivo remover o material radioativo indesejável das superfícies contaminadas, tais como objetos, roupas, equipamentos, ferramentas, pisos, paredes e a pele das pessoas.

Num processo de descontaminação, o material radioativo não é destruído, porém apenas removido do local contaminado para outro. Por exemplo, ao descontaminar um objeto com uma solução aquosa, o material radioativo é removido do objeto para a solução, a qual pode exigir cuidados adicionais. Portanto, a descontaminação de superfície não é simplesmente um processo de limpeza, pois deve ser realizada com procedimentos próprios que não coloquem em risco a saúde dos trabalhadores nem disseminem a contaminação para outros locais ou ao meio ambiente.

Todos os trabalhadores que manuseiam os materiais radioativos devem manter o cuidado constante para que a contaminação radioativa seja evitada e conhecer os procedimentos básicos para se lidar com a contaminação, caso ela venha a ocorrer.

Os materiais radioativos devem ser manuseados ou tratados em instalações apropriadas, procurando-se evitar a contaminação radioativa das pessoas ou do meio ambiente.

As medidas preventivas podem envolver o planejamento prévio do local de trabalho, o confinamento das áreas sujeita à contaminação e o controle de acesso a essas áreas, bem como um programa efetivo de monitoração da contaminação.

Dependendo do material radioativo e do tipo de trabalho a ser realizado, podem ser necessárias instalações como capelas de laboratório, caixa de luvas (glove boxes) ou células blindadas.

O nível de contaminação das áreas de trabalho deve ser periodicamente verificado pela monitoração. Um aumento significativo da contaminação pode indicar uma possível falha no sistema de confinamento e a necessidade de reparo, ou a necessidade de se efetuar uma descontaminação da área.

A monitoração da contaminação de superfície é importante para se estabelecer se os objetos tais como ferramentas, peças, materiais de laboratório e roupas necessitam de descontaminação.

A contaminação de superfície é avaliada em termos da atividade do contaminante por unidade de área contaminada. A unidade normalmente empregada é “becquerel por centímetro quadrado” (Bq/cm<sup>2</sup>). Há dois métodos comumente utilizados para se avaliar a contaminação de superfície: o direto e o indireto.

A monitoração pelo método direto é feita com instrumentos que detectam as radiações emitidas pelos radionuclídeos, diretamente na superfície contaminada. Esses instrumentos geralmente são portáteis e são levados aos locais onde se deseja realizar a monitoração.

O método indireto consiste em se examinar a contaminação coletando-se amostras da superfície contaminada (teste de esfregação).

O teste de esfregação não detecta a contaminação fixa. Por sua vez, a monitoração direta não distingue a contaminação transferível da fixa. Portanto, para se avaliar a contaminação de superfície, normalmente são usados os dois métodos de monitoração.

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) tem estabelecido os limites derivados para a contaminação de superfície. Esses valores são importantes para a interpretação dos resultados obtidos na monitoração da contaminação de superfície.

### Acidentes com Radioisótopos (contaminação)

- São divididos em duas categorias: Menor e maior importância, dependendo do radionuclídeo e da quantidade derramada;
- Valores até 1,0 mCi de  $^{131}\text{I}$  são considerados menores, enquanto valores acima disso são considerados maiores;
- Para  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{67}\text{Ga}$  e  $^{201}\text{Tl}$  o valor limítrofe é de 100 mCi;

#### ❖ Acidentes em MN - Quando ocorrer uma contaminação de superfície:

- 1º passo: possuir controle sobre a situação, mantendo os membros da equipe informados;
- 2º passo: dar atenção ao membro da equipe ou paciente contaminado;
- 3º passo: descontaminar o local de trabalho;
- 4º passo: verificar se a contaminação foi removida;
- 5º passo: registrar o ocorrido, seus motivos e, posteriormente, as providências tomadas.

### Processo de descontaminação: Regras Básicas

- ✓ Procurar os métodos que gerem menor volume possível de rejeitos radioativos, para evitar os problemas de tratamento posterior;
- ✓ Um papel-toalha absorvente é indicado para iniciar a descontaminação de pequenos volumes;
- ✓ Os métodos suaves devem ser usados antes daqueles mais rigorosos que podem prejudicar as superfícies envolvidas;
- ✓ O processo de descontaminação não deve permitir o espalhamento da contaminação.
- ✓ Se possível, a superfície contaminada por radionuclídeos de meia-vida curta deve ser isolada, para permitir a seu decaimento natural.
- ✓ A descontaminação deve ser realizada tão logo seja viável. A contaminação pode se espalhar ou se fixar ainda mais na superfície, com o passar do tempo.



## Bases Tecnológicas Aplicadas à Medicina Nuclear

### Instrumentação:

A detecção da radiação é fundamental para a prática da Medicina Nuclear. A quantidade e o tipo de radioatividade administrada aos pacientes deve ser medida e documentada, as áreas onde este trabalho é exercido devem ser monitoradas para manter a segurança tanto da equipe de trabalho quanto dos pacientes. A radioatividade emitida pelo paciente deve ser detectada para permitir uma localização temporal e espacial, necessária para a criação de imagens. O denominador comum de todos os dispositivos usados na prática da Medicina Nuclear contemporânea, para calibração das doses administradas, monitoração de área e obtenção de imagem é a conversão da radiação ionizante em energia elétrica. Nos equipamentos modernos de imagem esses sinais eletrônicos são frequentemente gravados e processados por computadores dedicados à Medicina Nuclear. Dispositivos de imagem nuclear, incluindo câmara de cintilação, podem ser vistos como detectores especializados de radiação, altamente modificados e adaptados para gravar a localização temporal e espacial da radioatividade no paciente.

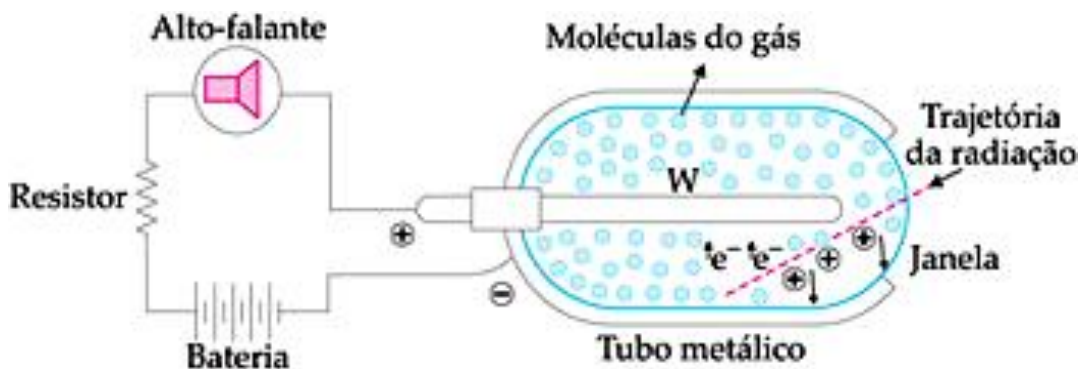
### Detectores de Radiação

Existem dois tipos básicos de detectores de radiação que são utilizados em Medicina Nuclear: Os Gasosos e os Sólidos.

#### ❖ Detectores Gasosos:

Uma das formas de detecção de radiação é o uso de câmaras de ionização, cujo conceito genérico é uma câmara cheia de gás com dois eletrodos, positivo e negativo, dispostos em sítios opostos dentro da câmara, ou numa geometria cilíndrica concêntrica. Uma Diferença de Potencial (DDP ou Voltagem) é criada de tal forma que haja fluxo de corrente entre os eletrodos quando houver exposição da Câmara à radiação. A interação da radiação ionizante com o gás da câmara cria íons positivos mais elétrons livres. Os elétrons se movem para os eletrodos positivos produzindo uma corrente elétrica. Existem três tipos de detectores gasosos: Câmara de Ionização Básica, Contadores Proporcionais e Contadores Geiger Müller. Esses detectores se diferem pela sensibilidade e habilidade que cada um possui em detectar a radiação, desta forma possuindo aplicações bem específicas.

### Funcionamento genérico de um detector Gasoso



No interior do tubo existe um gás, normalmente argônio, a baixa pressão, e um eletrodo positivo de tungstênio (W). A radiação penetra pela janela e colide com os átomos de argônio no interior da sonda, ionizando-os e causando uma descarga elétrica entre o fio central, para onde migram os elétrons, e as paredes do tubo, para onde migram os íons positivos. Tal descarga elétrica aciona, então, um alto-falante. O grau de radiação existente é contado eletronicamente em pulsos elétricos por segundo.

O contador Geiger-Müller é um tipo de detector gasoso e tem sido muito empregado na procura de minerais radioativos. Na Medicina Nuclear, aplica-se em mensuração de Taxa de Exposição e rastreamento de contaminação (quando associado ao Pancake). Seu uso é diário. Recomenda-se duas medidas ao dia, uma pela manhã, antes de iniciar o trabalho, e outra no meio do dia, em pontos predeterminados e de provável contaminação. Ao final da jornada de trabalho ele deve ser utilizado para monitorar os trabalhadores que manipularam direta ou indiretamente os radionuclídeos. Esse procedimento evita exposição desnecessária à radiação.



Sonda  
Pancake

Contador Geiger Müller

Outro tipo de detector gasoso muito utilizado na Medicina Nuclear é o curiômetro ou calibrador de dose. O curiômetro é um detector de radiação do tipo Câmara de Ionização Básica capaz de medir a atividade de vários radioisótopos utilizados nas rotinas de exames. Possui um “contador de poço”, onde é introduzido o material radioativo, e o monitor ou display, onde se faz os ajustes e se observa a quantificação da radiação. A medida da atividade é muito importante para que se saiba exatamente a dose administrada no paciente. Por isso, o procedimento correto é fazer a leitura da atividade diretamente na seringa pouco antes da administração.



Curiômetro

### ❖ Detector Sólido ou de Cintilação:

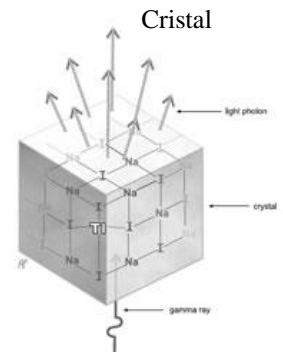
Câmaras de ionização gasosa dos tipos descritos na seção anterior não são muito sensíveis para detectar raios-X ou radiação Gama, devido à baixa probabilidade de interação dessa radiação ionizante com o gás. Na prática, o que se usa correntemente é o Cristal de Iodeto de sódio Ativado com Tálcio (NaI [TI]), que é um detector sólido, mais eficiente para sistemas de imagem com fóton único. Este cristal é ópticamente transparente e tem a capacidade “parar a radiação”, suficiente para ser sensível à detecção das radiações gama.

Já foi visto previamente um importante denominador comum aos vários tipos de detectores, que é a conversão de energia ionizante em energia elétrica. Sistemas de detectores de cintilação tem um processo interessante de conversão.

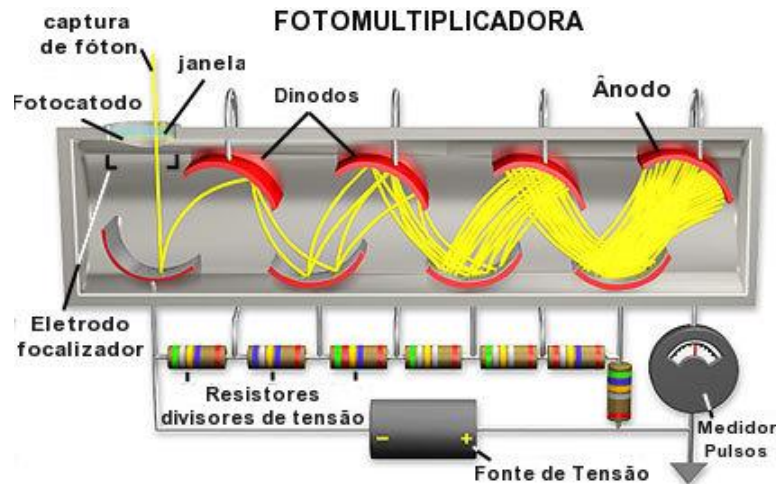
Os Raios Gama incidem no cristal de iodeto de sódio e cedem energia aos elétrons de valência, durante a interação fotoelétrica e Compton. A energia cedida eleva os elétrons para a Banda de condução da rede cristalina. A diferença de energia entre a Banda de valência e a Banda de condução é da ordem de alguns elétrons-volt. O elétron libera energia ao retornar ao estado de origem, isto é, ao retornar da banda de condução para a banda de valência, e são liberados fótons de luz. Esses fótons tem um espectro com o pico do comprimento de onda de 4150 angstroms, ou aproximadamente 3 eV. A eficiência de conversão de energia do cristal de iodeto de sódio é de 13%. A energia remanescente é dissipada dentro do cristal na forma de movimentação ou calor. O tempo de decaimento da cintilação ou a duração do tempo para que ocorra o evento da cintilação é de aproximadamente  $1 \mu\text{s}$  ( $10^{-6}$  segundo).

O Cristal de Iodeto de Sódio Ativado com Tálcio tornou-se o detector de radiação preferido em Medicina Nuclear por uma série de razões. Os cristais são relativamente baratos e permitem uma grande flexibilidade em tamanho e forma. O “poder de parar” a radiação é muito bom para a faixa de energia usada nas aplicações clínicas dos emissores de fóton único, isto é, de 70 a 365 keV. As impurezas de tálcio funcionam como centros de ativação ou centros de luminescência que favorecem o caminho de volta da banda de condução para a banda de valência dos átomos do cristal que requerem elétrons para manter sua neutralidade elétrica. Basta uma pequena porção de impurezas de tálcio (0,1 a 0,4 mol%) na rede cristalina para tornar o efeito facilitador do processo de cintilação desejado mais eficiente. A eficiência de conversão de 13% é relativamente alta, e os cristais são internamente transparentes à luz dos fótons produzidos, de tal forma que eles atingem os fotocátodos das fotomultiplicadoras. A desvantagem do cristal do Iodeto de Sódio é a sua fragilidade e a sua natureza altamente higroscópica, daí a necessidade de ser hermeticamente selado. Na maioria das aplicações o cristal é selado por um invólucro de alumínio, exceto na face de contato com as fotomultiplicadoras, onde é recoberto por uma janela de quartzo para permitir que os fótons escapem e atinjam as fotomultiplicadoras.

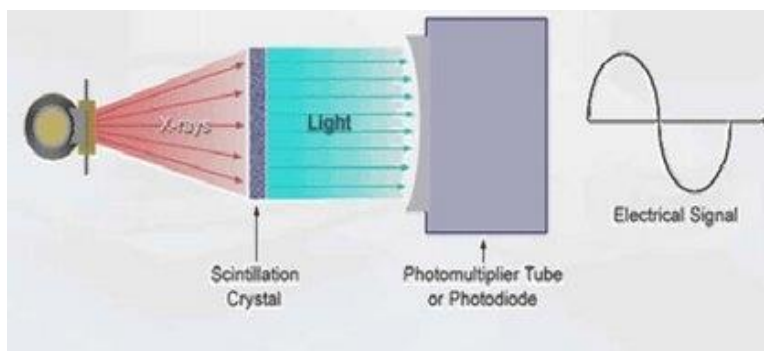
O próximo passo no processo é a interação dos fótons luminosos que chegam ao cristal com o fotocátodo da válvula fotomultiplicadora. Num sistema de detecção típico, com cristal de iodeto de sódio, o cristal é ópticamente acoplado ao fotocátodos por um guia de luz ou um tubo luminoso para assegurar a eficiência da coleta de luz. Os fótons luminosos deslocam os elétrons dos fotocátodos e estes são acelerados por series de eletrodos (Dinodos) no tubo da fotomultiplicadora. Com o aumento da aceleração o número de elétrons é aumentado, e estes são coletados no anodo ou coletor do tubo fotomultiplicador. O fator de multiplicação é da ordem de 3 a 6 por cada estágio de dinodo, ou de milhões de vezes após passar por todos os dinodos. O pulso resultante da válvula fotomultiplicadora é processado posteriormente. Este processo pode tomar a forma de amplificação seguida de uma análise de pulso para determinar a energia



incidente no cristal (análise de altura de pulso) ou para a localização espacial do evento (análise de posição), no caso da câmara de cintilação.



O ponto chave para entender o processo de detecção da cintilação é que a proporcionalidade é mantida em cada etapa, isto é, o número de fótons liberados pelo cristal é proporcional à energia liberada no cristal, proveniente da radiação incidente. O número de elétrons deslocados nos fotocátodos é proporcional ao número de fótons luminosos do cristal e à corrente elétrica gerada pela válvula fotomultiplicadora. Assim a altura do pulso elétrico proveniente da fotomultiplicadora é proporcional à energia da radiação absorvida pelo cristal. Isto permite que energias diferentes provenientes de radionuclídeos diferentes possam ser distinguidas entre si pela análise da altura de pulso. Isto também permite diferenciar os fótons primários dos fótons que foram espalhados pelo efeito Compton antes de serem detectados. Os fótons que sofreram difusão Compton tem menor energia que os fótons primários, conseqüentemente tem altura de pulso menor. O reconhecimento desses fótons é crucial nas aplicações clínicas da detecção da cintilação, pois só os fótons primários tem interesse na construção da imagem.



Funcionamento da Gama-Câmara

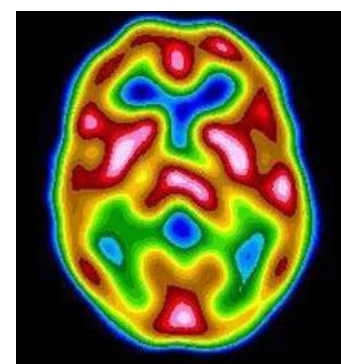
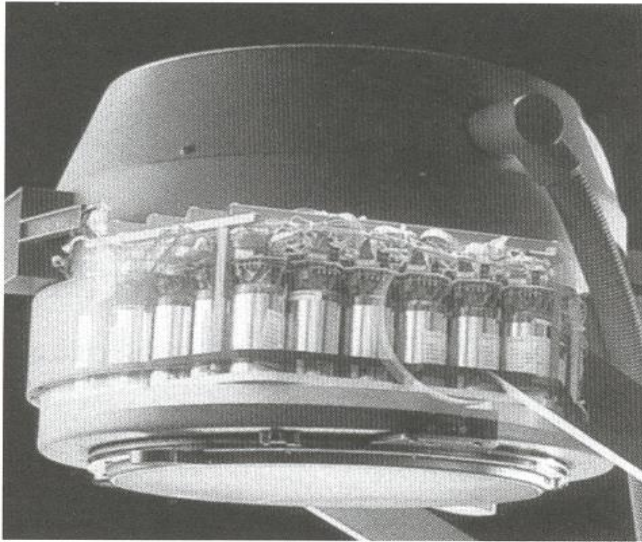


Imagem Digital



### Vista interna de uma câmara de cintilação

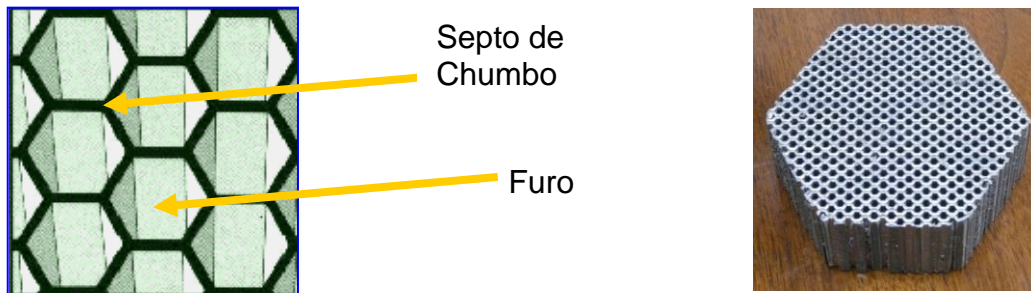
Radionuclídeos diversos são usados para obter imagem em Medicina Nuclear, pois emitem, de forma contínua, um sinal – raios gama, que é detectado por aparelhos especiais, denominados Gama - Câmaras que, por sua vez, têm associados sistemas de computadores que transformam a radiação gama emitida pelo doente numa imagem, a **cintilografia**. Esta, depois de trabalhada no computador e fotografada, é interpretada pelo médico com a especialidade de Medicina Nuclear, que elabora um relatório sobre o exame efetuado. Este relatório é dirigido ao seu médico assistente, para ser usado para o seu diagnóstico e escolha de terapêutica adequada.

### Outras Gama-Câmaras



## Colimadores

O colimador é a primeira parte da gama-câmara potencialmente encontrável pelo fóton ao sair do paciente. O objetivo do colimador é definir o campo de visão geométrico do cristal e a direção específica de entrada dos fótons para incidir no cristal. O colimador discrimina os fótons indesejados com base apenas na direção. O colimador não distingue fótons primários de difundidos ou mesmo de energias diferentes. O analisador de altura da pulso é que discrimina os fótons que chegam, isto é, os primários, os Compton-difundidos ou outros não desejáveis. O colimador é uma peça constituída de septos de chumbo e furos que permitem a passagem da radiação de um lado a outro de sua estrutura.



➤ **Colimadores de Furos Paralelos:** É o mais utilizado na prática clínica diária. Consiste tipicamente em uma folha de chumbo com milhares de canais ou furos paralelos distribuídos uniformemente. Sua característica é manter o tamanho real do objeto projetado no cristal.

Quanto à energia eles podem ser:

- *Baixa Energia* (energias de 140 keV -  $^{99m}\text{Tc}$ )
- *Média Energia* (energias até 400 keV -  $^{67}\text{Ga}$ )
- *Alta Energia* (energias até 600 keV -  $^{131}\text{I}$ )

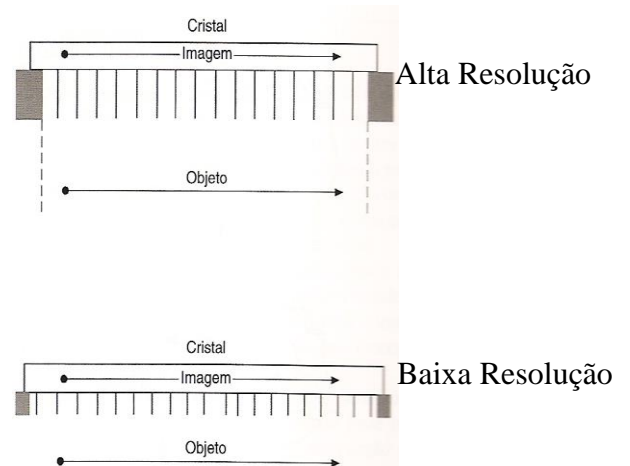


O que determina a energia suportada pelos colimadores é a espessura de seus septos. Quanto maior a espessura do septo maior a capacidade que ele tem de barrar os fótons gama. Por isso, não se pode utilizar o Colimador de Baixa Energia empregando-se o Radionuclídeo  $^{131}\text{I}$ , pois seus fótons teriam energia suficiente para atravessar estes septos.

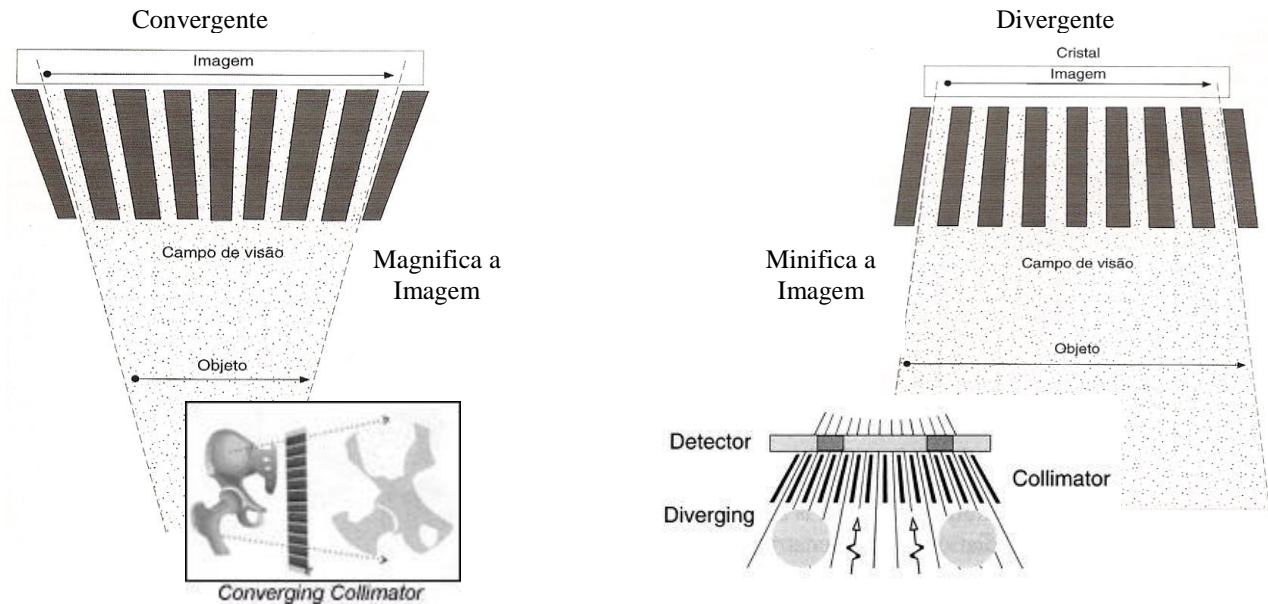
Quanto à resolução eles podem ser:

- *Baixa Resolução*
- *Alta Resolução*

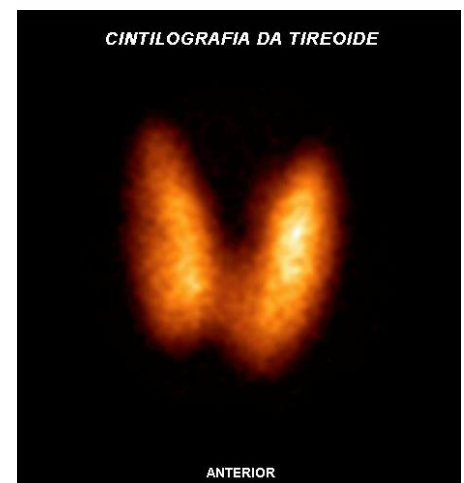
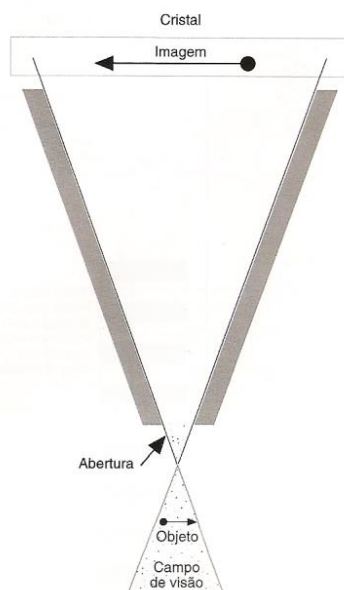
O que determina sua resolução é a profundidade dos furos. Quanto mais profundo é o furo mais Resolução Espacial ele confere à imagem. O ideal é que todos os exames sejam feitos em colimadores de alta resolução. Em alguns são indispensáveis; em outros, nem tanto.



➤ **Colimadores de Furos Convergentes e Divergentes:** São colimadores que modificam o tamanho da projeção do objeto no cristal detector. O Colimador de Furos Convergentes magnifica a imagem do objeto estudado, enquanto que o Colimador de Furos Divergentes minifica a imagem.



➤ **Colimadore de Furo Único – PINHOLE:** Este colimador tem sido utilizado para examinar pequenas estruturas anatômicas, como na cintilografia da tireóide, paratireóide, necrose de cabeça de fêmur ou ainda das vias lacrimais. Sua característica é a magnificação da imagem se a distância da abertura ao objeto for menor que a distância do detector à abertura.



## Aquisição das Imagens Cintilográficas

As imagens cintilográficas podem ser:

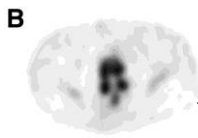
- ❖ Planares ou SPECT
- ❖ Estáticas ou Dinâmicas
- ❖ Spot (localizada) ou Whole Body (Corpo Inteiro)
- ❖ Sincronizadas

### Imagens Planares

São imagens reconstruídas em um único plano, possuindo apenas duas dimensões, altura e largura. É o tipo mais comum de imagem diagnóstica. Um bom exemplo de imagem planar é a radiografia. Assim como na Radiologia Convencional, a Medicina Nuclear também produz imagens planares. Para isso, a gama-câmara adquire a imagem em apenas um plano ou angulação única.



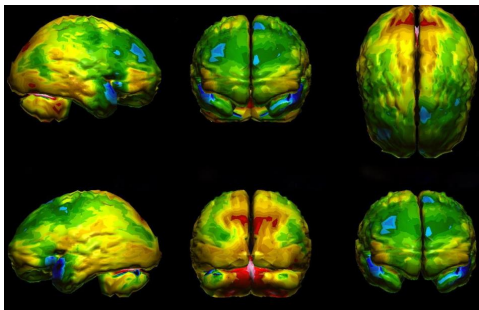
### Imagens SPECT



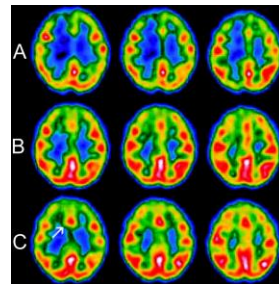
SPECT significa “Tomografia Computadorizada por Emissão de Fótons Simples. Como se trata de uma tomografia, o aparelho, Durante a aquisição das imagens, colheu imagens em diferentes ângulos. Essas imagens possuem grande quantidade de informações, pois são adquiridas em vários planos diferentes. Como resultado, tem-se a soma de todas essas aquisições em uma única imagem em três dimensões. Em outras palavras, é uma técnica que gera imagens em planos dentro de um volume radioativo a partir de projeções desses volumes obtidas em diferentes ângulos. Quando a imagem 3D é formada, podem-se traçar os três cortes tomográficos: Transversal, Sagital e Coronal.

Exame Ósseo

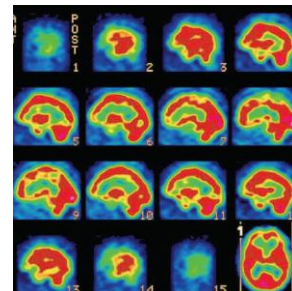
(A) Sagital e (B) Axial



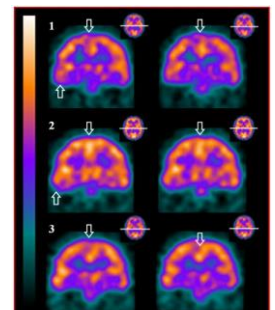
3D



Transversal



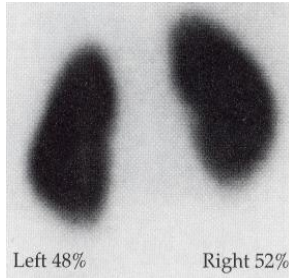
Sagital



Coronal

## Exame Cerebral

### Imagens Estáticas

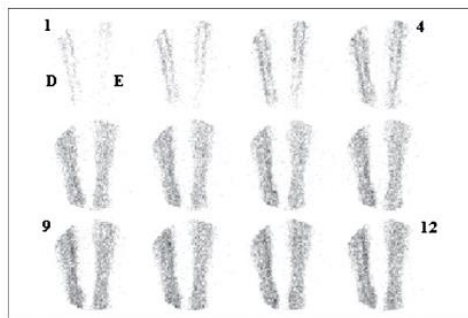


As contagens são acumuladas em uma única imagem planar até que seja atingido um determinado intervalo de tempo ou nível de contagens. Cada contagem deve ser entendida como um fóton de radiação gama que emergiu do paciente chegou até a gama câmara e foi transformado em sinal digital.



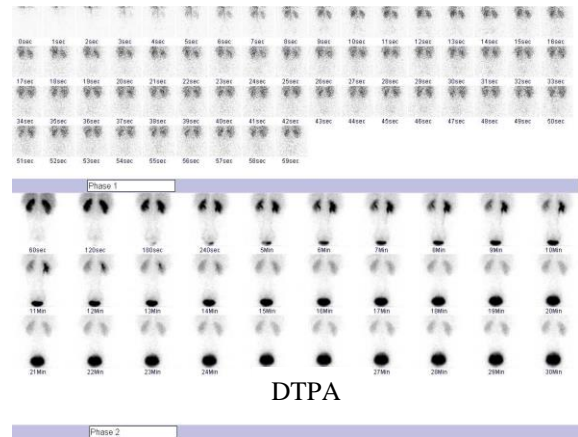
### Imagens Dinâmicas

Essa técnica é empregada quando o fenômeno a ser estudado é variável no tempo. Nela várias imagens sequenciais são adquiridas, das quais cada imagem é composta de contagens acumuladas em um período pré-fixado de tempo.



**Fig. 1** – Fluxo sanguíneo dos membros inferiores (distal). Observa-se assimetria, com aporte vascular aumentado para o MID.

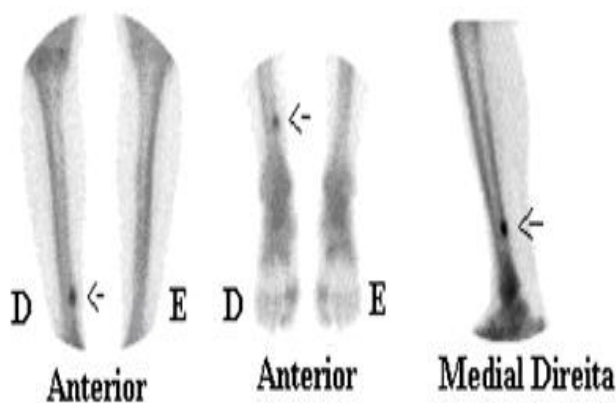
A limitação desta técnica é a baixa estatística de contagens por imagem. Quando todas as imagens



são adquiridas, pode-se produzir um vídeo. Normalmente se utiliza essa técnica em exames renais dinâmicos (DTPA), Refluxo Gastroesofágico (RGE), Fluxo Sanguíneo Ósseo, dentre outros.

### Imagens SPOT (Localizadas)

São imagens adquiridas de um único segmento anatômico.



## I Imagens Whole Body

Esta técnica permite a varredura de corpo todo. Atua como imagem piloto para vários exames.

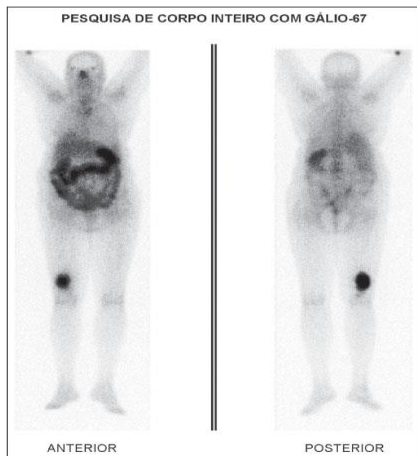
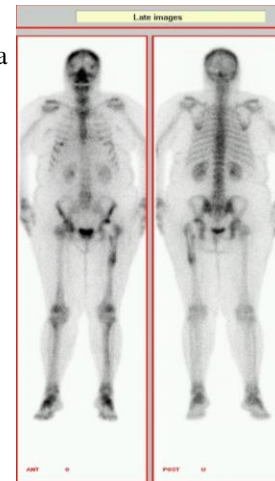


Figura 4. Cintilografia com gálio-67 do caso 2 demonstra captação anômala na coxa direita.

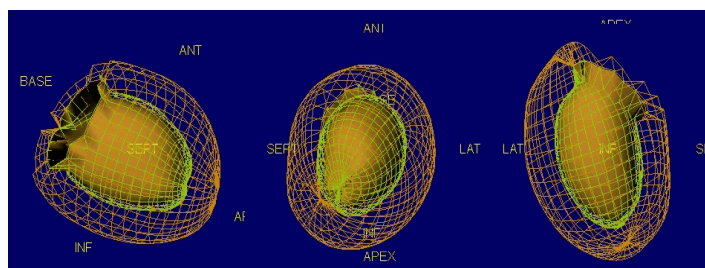
Gálio

Cintilografia Óssea



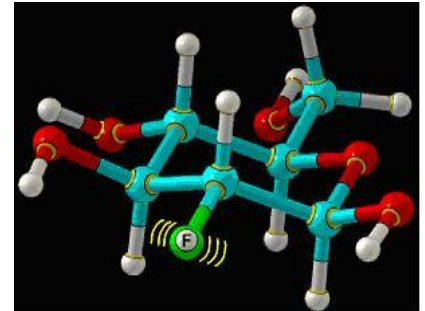
## Sincronizada (Gated)

É a aquisição de dados de imagem sincronizada com algum sinal fisiológico, como, por exemplo, o eletrocardiograma. Permite que a imagem seja reconstruída com os movimentos fisiológicos do paciente.

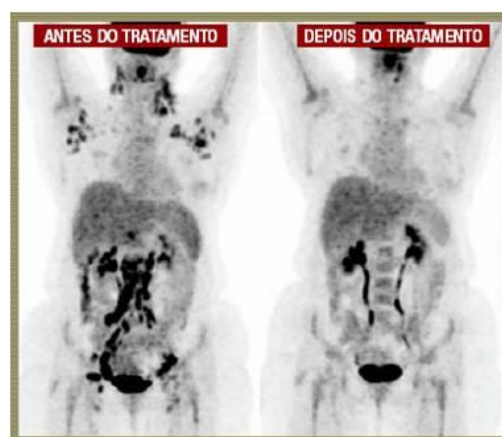


## PET – Tomografia por Emissão de Pósitrons

A Tomografia por Emissão de Pósitrons (PET) assemelha-se à Tomografia Computadorizada por Emissão de Fótons Simples (SPECT) no que diz respeito aos procedimentos de preparo do paciente, administração do radiofármaco e pelo fato de utilizar fontes radioativas. Porém existem grandes diferenças no tipo de radiação, no mecanismo de detecção e no processamento. Na PET, em primeiro lugar, deve-se injetar um radionuclídeo que seja emissor de Pósitron. O  $^{18}\text{F}$  (meia-vida de 110 minutos) hoje é o radionuclídeo mais utilizado na prática clínica. Esse material é produzido em um ciclotron e, pelo fato de ter meia-vida curta, deve ser levado rapidamente ao hospital ou clínica onde será realizado o exame PET.

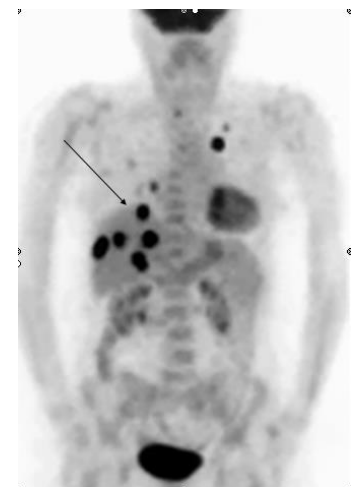


O flúor-18 é produzido a partir do bombardeio do oxigênio-18 com prótons. A incorporação do flúor-18 à molécula de desoxiglicose dá origem ao radiofármaco Fluordesoxiglicose- $^{18}\text{F}$  (FDG). Essa molécula tem sido amplamente empregada dentro da oncologia, entre outras aplicações, no rastreamento de tumores pelo corpo. As células necessitam de açúcar para gerar energia imediata. Porém algumas células geram mais energia que outras e, para isto, consomem maior quantidade de açúcar. Exemplos disso são as células cardíacas, as células cerebrais e as células tumorais. O FDG é utilizado como análogo da glicose,



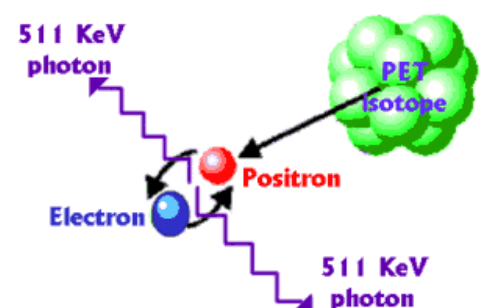
isto é, ele imita esse açúcar dentro do organismo. Pois o tumor obtém energia do metabolismo da glicose, e então a captação de Fluordesoxiglicose torna-se um marcador do metabolismo e da viabilidade do tumor. A distribuição do FDG indica a presença ou ausência, conforme o caso, de tumores, malignos ou benignos, no corpo do paciente. Isso se deve ao acúmulo do radiofármaco em regiões de alto consumo de glicose, decorrente

do alto índice metabólico daquele tecido.



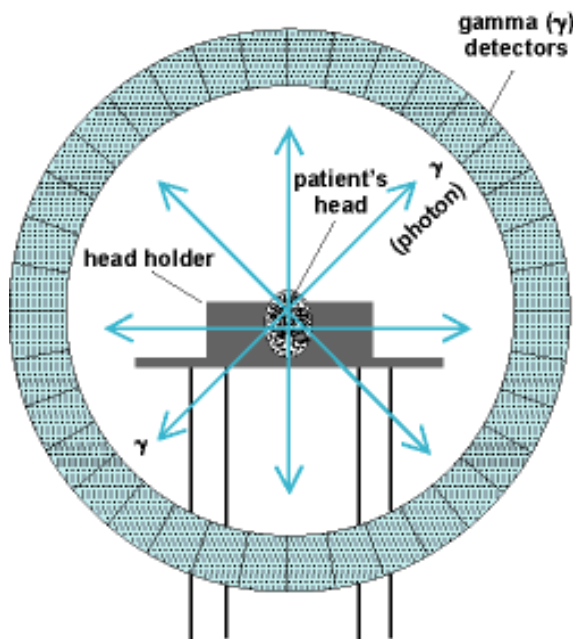
Essa modalidade diagnóstica é indicada para: Planejamento do tratamento (Cirurgia, Radioterapia Quimioterapia); revelação das melhores regiões para biópsias; Investigação do tamanho, posição e distribuição de tumores; Diferenciação de tumor Maligno do Benigno; Controle de tratamentos.

PET é um tipo de tomografia possível apenas por que ocorre a aniquilação dos pósitrons com subsequente emissão de radiação gama. Quando pósitrons se aniquilam por combinação com elétrons negativos, dão origem a dois fótons de 511 keV na mesma direção, porém com sentidos opostos ( $180^\circ$ ). Em contraste com a imagem SPECT, que detecta eventos individualizados, a imagem PET requer dois detectores dispostos



em lados opostos do objeto para poder detectar os pares de fótons produzidos na aniquilação.

A detecção da radiação é feita pelo sistema DETECTOR DE COINCIDÊNCIA. Basicamente é composto por um anel com múltiplos detectores colocados em arco de 360° para circundar o campo de visão do objeto ou órgão estudado. Esse circuito especial na tomografia PET permite a detecção dos dois fótons provenientes de uma única aniquilação. A janela de coincidência é da ordem de 10 nanossegundos ( $10^{-9}$ ). Quando eventos são registrados em pares de detectores num intervalo de 10 nanossegundos, eles são aceitos como eventos verdadeiros. Quando um evento não é pareado dentro do tempo estipulado ele é descartado. Isto provê uma colimação eletrônica para definir planos tomográficos de imagem. Por não terem elementos de colimação física, as tomografias PET tem maior sensibilidade.



Os cristais aqui utilizados, feitos de Germanato de Bismuto, são duas vezes mais densos que os cristais de Iodeto de Sódio Ativados com Tálcio. Esse material permite ao cristal detector barrar a passagem dos raios gama de 511 keV produzidos na aniquilação do pósitron, pois só assim podem ser transformados em imagem.

Atualmente os aparelhos PET podem ser associados aos equipamentos de Tomografia Computadorizada (CT) ou aos de Ressonância Magnética (RM). Isso permite que as imagens da Medicina Nuclear, que são fisiológicas, sejam fundidas às imagens anatômicas de CT e RM.

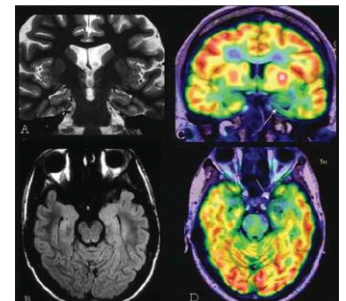


Figura 6. Paciente R.C.D., 22 anos de idade, com epilepsia refratária. Imagens de RM nas sequências SP1 (A) e T2WI (B) não evidenciam alterações. Como controle (C) e após PET (D) localiza-se uma área hipometabólica no hipocampo à esquerda (setas). O paciente foi operado e encontra-se livre de crises.

## Comparações entre PET e SPECT

As vantagens de PET são sensibilidade e resolução superiores. A desvantagem é o custo consideravelmente maior que o sistema SPECT, além de requerer a presença de um Cíclotron para poder realizar todas as aplicações.

A SPECT tem vantagens significativas em relação aos custos, ao tamanho menor e à facilidade de instalação em hospitais. Tem a vantagem singular de ser aplicável na grande maioria dos procedimentos realizados em Medicina Nuclear, incluindo as imagens de perfusão miocárdica, com emprego de Tálcio-201 ou de Tecnécio-99m, e imagens oncológicas usando citrato de gálio-67. As imagens SPECT ainda abrangem radionuclídeos como o Iodo-131 e Índio-111.



## Profissionais e Procedimentos em Medicina Nuclear

### Estudos Clínicos

**In vivo:** Obtenção de dados realizada diretamente do paciente.

Exemplo: Mapeamento hepático com colóide de enxofre marcado com  $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ .

**In vitro:** Composto é administrado ao paciente, e amostra de sangue ou da excreção são coletados para análise posterior.

Exemplo: Estudos da absorção da vitamina B<sub>12</sub>

**Equipe e suas atribuições:** Médico especialista (médico nuclear), Radiofarmacêutico, Físico-Médico, Enfermeiro, Técnico em medicina nuclear e Técnico em enfermagem.

### Técnico em medicina nuclear

Atribuições:

1. Preparar o paciente no aparelho, posicionando-o nas incidências desejadas,
2. Realizar os exames, sob orientação do médico especialista,
3. Proceder a operação, manutenção e limpeza de todos os equipamentos utilizados no exame,
4. Calibrar os aparelhos antes da realização do primeiro exame do dia.

### Enfermeiro e Técnico em enfermagem

Atribuições:

1. Encaminhar o paciente a sala de exames,
2. Administrar a dose recomendada e orientar o paciente quanto aos procedimentos do exame,
3. Controlar a liberação dos pacientes internados e ambulatoriais,
4. Marcar os exames preliminares de medicina nuclear, coletar o sangue para dosagem hormonal, controlar a medicação prescrita, a internação e a alta,
5. Atender, de imediato, as eventuais intercorrências clínicas.

### Radiofarmacêutico

Atribuições:

1. Receber, registrar e armazenar, em local apropriado, o material adquirido para o serviço,
2. Eluir os geradores de tecnécio, marcar os kits de radiofármacos e fracionar as respectivas doses,
3. Controlar as qualidades dos kits e dos radionuclídeos,
4. Controlar os rejeitos radioativos gerados no serviço.

### Físico-Médico

Atribuições

1. Fazer o levantamento radiométrico de todos os setores de serviço,
2. Fazer o controle diário da qualidade de imagem,
3. Gerenciar os rejeitos radioativos,
4. Acompanhar mensalmente as doses individuais recebidas pelos trabalhadores,
5. Treinar e reciclar periodicamente, em proteção radiológica, todo o pessoal do serviço,
6. Implantar novas técnicas e testes regulares dos aparelhos.

## **Médico Especialista em Medicina Nuclear**

### Atribuições

1. Prestar atendimento clínico ao paciente,
2. Decidir pelo exame, elucidação do diagnóstico e eficácia do tratamento,
3. Prescrever o radiofármaco e determinar a rotina,
4. Avaliar a imagem obtida,
5. Acompanhamento na realização do exame.
6. Operacionalidade de um Serviço de Medicina Nuclear

## Cintilografia Clínica

### ○ Cintilografia de Perfusão Miocárdica:

A cintilografia de perfusão miocárdica repouso/estresse tornou-se um dos procedimentos mais realizados nas clínicas de Medicina Nuclear. Este exame permite a identificação de áreas isquêmicas, infartos, visualização da motilidade das paredes e medição da fração de ejeção do ventrículo esquerdo, tendo como suas principais indicações a investigação, acompanhamento e avaliação de resposta terapêutica em doença isquêmica do coração, principalmente naqueles casos em que o teste ergométrico foi inconclusivo ou inefetivo. Com a cintilografia é possível avaliar a reserva coronariana mesmo naqueles pacientes incapazes de realizar esforço físico, onde o stress físico é substituído pelo stress farmacológico sem que exista prejuízo em termos diagnósticos.

Permite avaliar:

- Presença e gravidade da lesão isquêmica
- Localização (território coronariano)
- Extensão (número de territórios vasculares comprometidos)

O exame é realizado em duas fases: Repouso e Estresse, geralmente em dias diferentes. Pode-se iniciar o exame por qualquer uma das fases. A dose radioativa deve ser equiparável entre as fases.

**Preparo:** Confirmar tipo de stress:

- a) físico (ergométrico)
- b) farmacológico (dipiridamol ou dobutamina);

Retirar qualquer o objeto que possa ser um artefato do tórax do paciente.

*Stress e Repouso:* jejum de 2 horas, após pequena refeição (pão, bolacha, leite ou suco).



**Administração:** Endovenosa

**Radiofármaco e dose usual (adulto):**  $^{99m}\text{Tc} + \text{MIBI}$  = de 20 a 30 mCi para cada fase do exame (Stress/repouso) em Protocolo de 2 dias.

- REPOUSO: o paciente recebe a injeção do radiofármaco e deve, então, aguardar para entrar na sala de exames e realizar as imagens.
- ESTRESSE FÍSICO: o paciente caminha na esteira ou recebe uma medicação, conforme orientação médica, e após recebe a injeção do radiofármaco; é necessário aguardar alguns minutos antes de entrar na sala de exames e realizar as imagens para que o radiofármaco chegue ao coração.

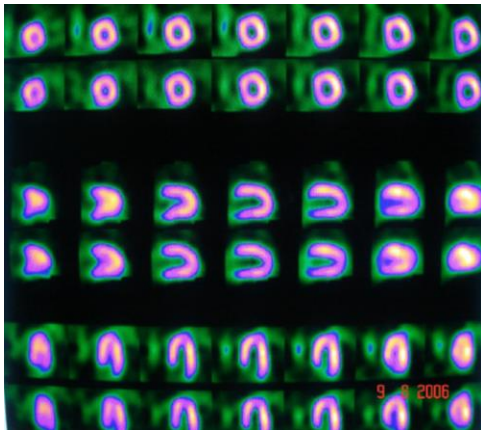
### ❖ **Técnica de Aquisição**

- Colimador: LEHR
- Gama-Câmara de detector duplo em formato L
- Início: Repouso - 45 min a 1 h após injeção do traçador e Estresse - 30 a 45 min após injeção do traçador.
- Para estudos sincronizados com Gated, colocar 3 derivações do ECG.
- Posicionamento: decúbito dorsal horizontal, braços elevados.

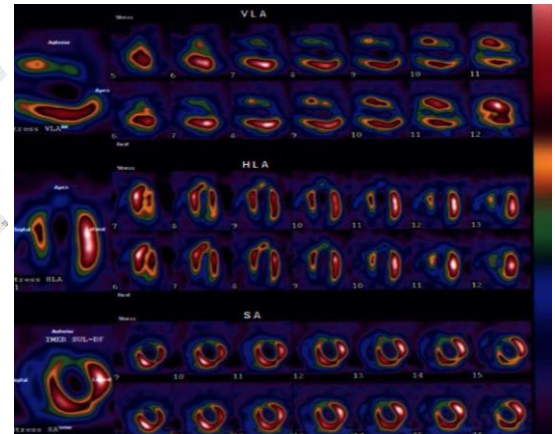
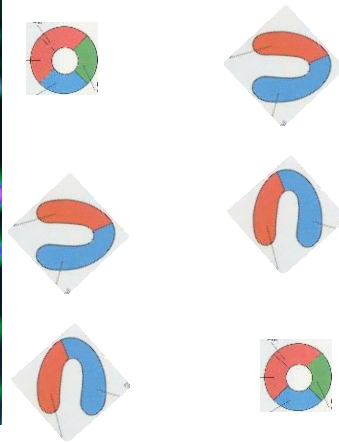
- Projeções: SPECT (Equipamento de 1 detector) : inicia em OAD 45° e roda 180° até OPE 45°.
- Aquisição: SPECT: 64 steps de 20 segundos.

#### Eventos sequenciais do exame:

- O radiotraçador deve chegar até o miocárdio;
- Deve haver células miocárdicas metabolicamente ativas, viáveis, para permitir a entrada do radiotraçador (radiofármaco).



Exame Normal



Infarto do Miocárdio

#### ○ Cintilografia Óssea

A cintilografia óssea identifica precocemente pequenas alterações no metabolismo ósseo, e está indicada na pesquisa de metástases e de tumores ósseos primários, na avaliação de próteses de quadril e joelho, nas necroses assépticas, nas lesões em atletas (fraturas de estresse), fraturas de difícil visualização aos raios-x como as de costela, de pequenos ossos das mãos, na distrofia simpático-reflexa, nas osteomielites/celulites, doenças mono e poliarticulares, nas doenças ósseas metabólicas, na investigação de dor, na avaliação de enxertos ósseos, na avaliação de pseudoartroses e de artrodeses. Em alguns casos, realiza-se, após a injeção na veia, imagens em 3 fases: fluxo, equilíbrio e tardia, conforme a indicação do exame. Pode ser realizada de corpo inteiro ou de uma região específica.

**Preparo:** Beber 4-6 copos de água após a injeção; retirar artefatos, como relógio, moedas, calçados, carteira, cinto ou qualquer outro objeto de considerável densidade.

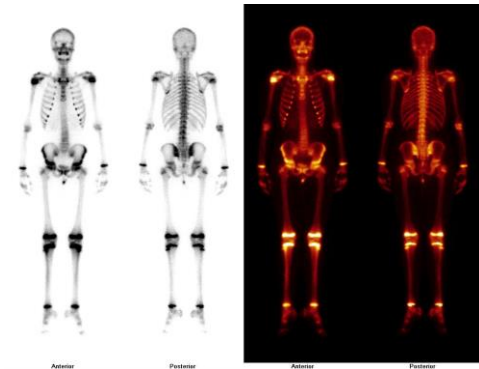
**Administração:** Endovenosa

**Radiofármaco e dose usual (adulto):** 15 a 30 mCi (740 a 1.110 MBq) de  $^{99m}\text{Tc}$  + MDP ou HDP

#### ❖ Técnica de Aquisição

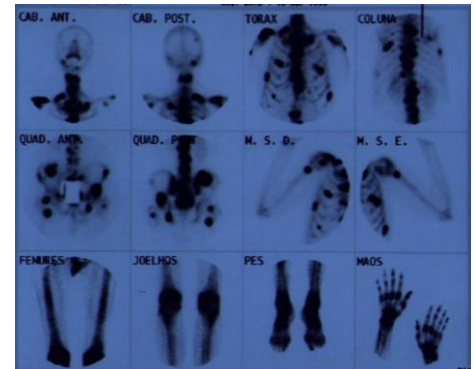
- Colimador: LEHR
- Início: 2 a 3 horas após administração por via endovenosa.
- Posicionamento: decúbito dorsal horizontal.
- Projeções: Anterior e posterior de corpo inteiro ou SPOT (localizada);
- SPECT - se necessário: 360 graus (ou 180° posterior no caso de coluna),

- Aquisição: Esvaziar bexiga imediatamente antes do estudo.



Paciente jovem: Estudo Ósseo Normal  
Hiperaptações fisiológicas das regiões epifisárias

Uma particularidade deste exame o torna muito importante para a oncologia, pois permite avaliar o esqueleto inteiro à procura de alterações do metabolismo ósseo. É o principal estudo para investigação de metástases ósseas, sendo suas alterações detectadas com precocidade de até seis meses, quando comparados aos exames radiológicos.



Metástases Ósseas – CA de Mama:  
Estágio avançado de disseminação de metástases no arcabouço ósseo.  
Presença de lesões características

### Fluxo Sanguíneo Ósseo

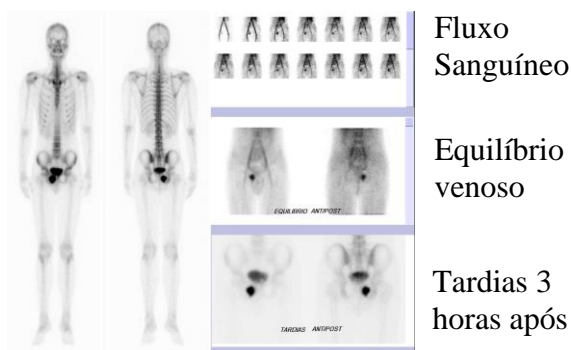
Além da vantagem de rastrear todo o esqueleto, a fase de fluxo e "pool" sanguíneos avaliam hiperemia e auxiliam no diagnóstico e acompanhamento de patologias inflamatórias e traumáticas. O fluxo sanguíneo permite a diferenciação entre um processo inflamatório/infeccioso agudo do crônico.

Indicação: Dor localizada, fratura por estresse, osteomielite, inchaço...

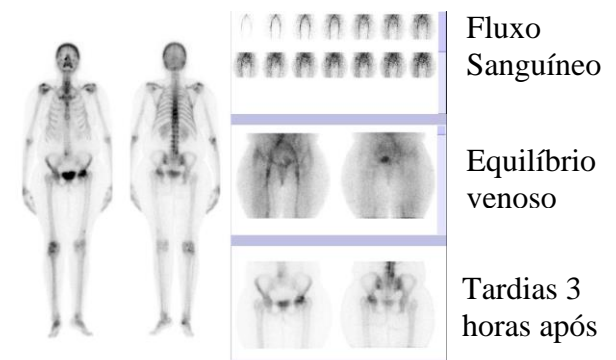
O exame é composto de: Fluxo sanguíneo, equilíbrio venoso (pool sanguíneo) e tardia.

#### ❖ Técnica de Aquisição

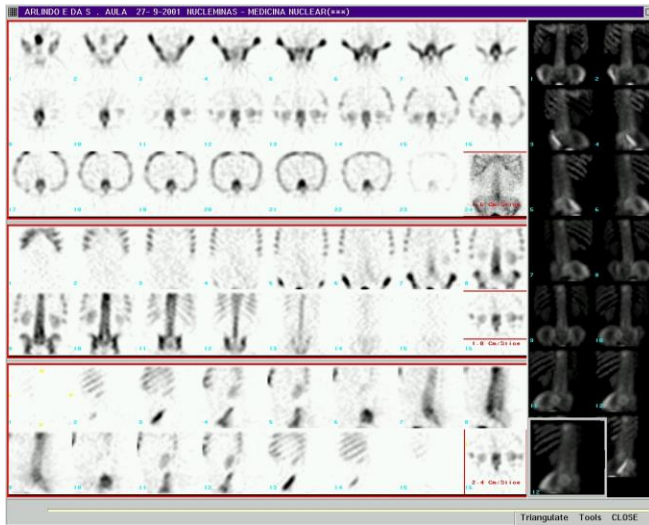
- Colimador: LEHR ou LEAP
- Início: imediato após administração por via endovenosa em bolo.
- Posicionamento: decúbito dorsal horizontal, posicionar área de interesse.
- Projeções: Médico deverá definir
- Aquisição: (Fluxo) 1 imagem a cada 1 seg durante 1 minuto e imagem de equilíbrio (Pool) com 180 segundos adquirida após 3 minutos.



Processo Inflamatório agudo



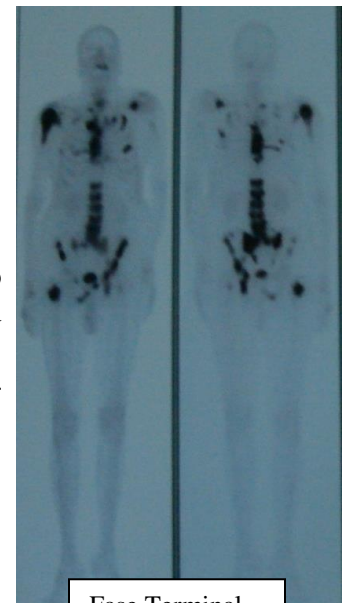
Processo Inflamatório crônico



## SPECT

- Single
- Photon
- Emission
- Computed
- Tomography

O SPECT permite ao médico angariar mais informações a partir dos cortes tomográficos



Fase Terminal

## Terapia da Dor Óssea

- Utilizada para pacientes com metástases ósseas disseminadas e dor que não responde a tratamento medicamentoso. Pode ser utilizado SAMÁRIO-153 ou ESTRÔNCIO-89.
- Os radionuclídeos são absorvidos pelas lesões ósseas e, por serem Beta-emissores, queimam as terminações nervosas que o tumor detém.
- Diminui a imunidade do paciente;
- Dose: 1 mCi/Kg
- Infiltrações inadmissíveis

### ○ Cintilografia Pulmonar

A cintilografia de perfusão/inalação tem como sua principal indicação o diagnóstico de Trombo Embolia Pulmonar (TEP) sendo útil também na avaliação pré-operatória de pneumectomias e na quantificação de shunts, além de disfunções bronco-alveolares como a doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC). Avalia a aeração dos pulmões e sua perfusão. As imagens são realizadas após a injeção intravenosa (no caso da cintilografia perfusional) ou inalação do material (no caso da cintilografia inalatória).

Em adultos, realizado em duas fases: Inalação e Perfusão

## Perfusão



Aparelho utilizado na Inalação ou Ventilação



Inalação

- Fase da Inalação: Realizado necessariamente antes da Perfusão

**Preparo:** Tomar 1 copo de água antes da inalação.

**Administração:** Inalação (feito com difusor de gases, como na nebulização durante 5 a 10 minutos)

**Radiofármaco e dose usual (adulto):** 40 a 75 mCi de  $^{99m}\text{Tc}$ -DTPA ou Fitato diluído em água destilada ou Cloreto de Sódio (apenas 5 a 10% chega até os pulmões).

#### ❖ Técnica de Aquisição

- Colimador: LEHR
- Início: após 5 a 10 min de inalação. Pode ser feito bochecho com água para remover atividade residual da boca.
- Posicionamento: decúbito dorsal horizontal, braços elevados.
- Projeções: Anterior, posterior, laterais, OPD e OPE (ocasionalmente incluir OAE, OAD, caso médico nuclear solicite).
- Aquisição: Imagens com 300 mil contagens.



- Fase da Perfusão: Realizado geralmente depois da Inalação

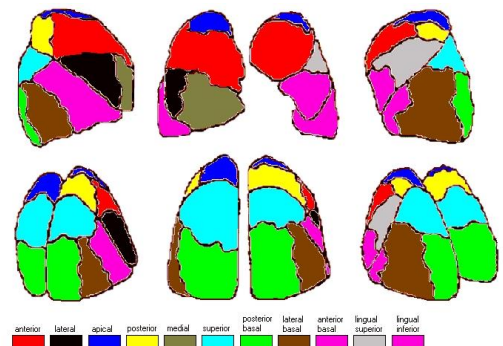
**Preparo:** Não há.

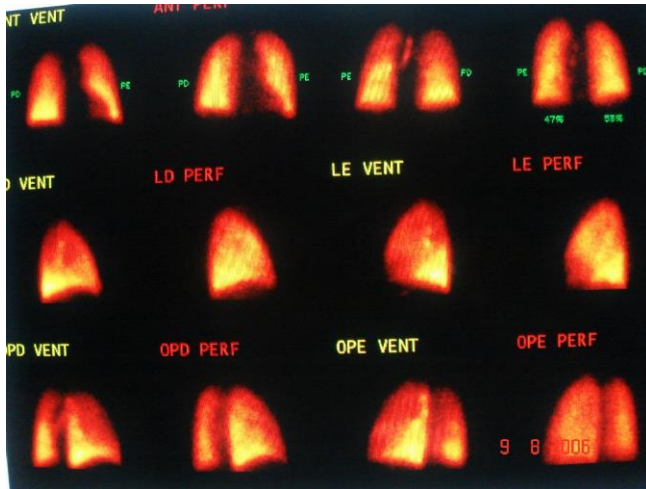
**Radiofármaco e dose usual (adulto):** 15 mCi de  $^{99m}\text{Tc}$ -MAA, com cerca de 500 mil partículas (atenção ao nº de partículas por frasco). Em crianças devem reduzir para 100 mil partículas. Agitar frasco e a seringa imediatamente antes de injetar. O paciente deve ser injetado deitado e respirando profundamente por 2-3 vezes.

#### ❖ Técnica de Aquisição

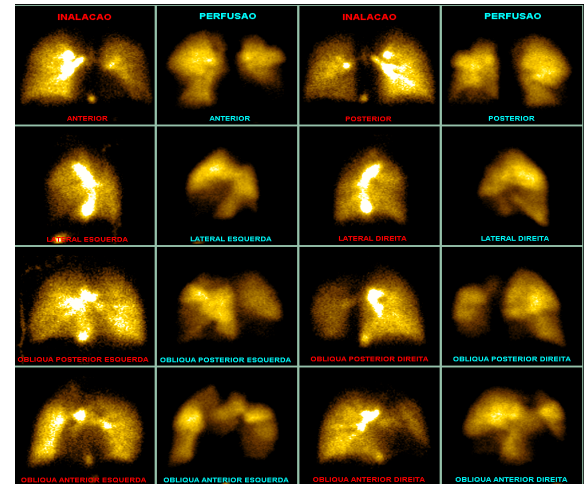
- Colimador: LEHR
- Início: após 3 minutos da administração por via endovenosa.
- Posicionamento: decúbito dorsal horizontal, braços elevados.
- Projeções: Anterior, posterior, laterais, OPD e OPE (ocasionalmente incluir OAE, OAD, caso médico nuclear solicite).
- O SPECT de 360° pode ser solicitado nesta fase.
- Aquisição: Imagens com 750 mil contagens.

Observação: Quando a dose radioativa da perfusão (que é 3 vezes maior que a dose da inalação) é administrada no paciente, a imagem de inalação, a qual antecedeu a perfusão, é substituída por esta, sem que haja perdas de qualidade na imagem.





Exame Normal



Trombo Embolia Pulmonar

### ○ Cintilografia de Refluxo Gastroesofágico

O refluxo de material ácido do estômago para o esôfago não significa necessariamente doença. Ele é comum e ocorre diversas vezes ao dia em todas as pessoas, mas por curtos períodos de tempo, esse ácido é eliminado do esôfago rapidamente. A mucosa do esôfago é pouco resistente ao ácido, mas tem a capacidade de suportar esse refluxo normal.

Em alguns casos, a mucosa do esôfago pode ter sua resistência diminuída ou o ácido refluir mais vezes ou por mais tempo que a mucosa esofágica pode resistir. O ácido pode ainda refluir até a garganta, ou causar sintomas pela simples irritação do esôfago. Nessas situações, o refluxo deixa de ser considerado normal e trata-se de Doença do Refluxo Gastroesofágico (DRGE).

A cintilografia de RGE consiste na observação do refluxo na área esofágica, após a ingestão de uma solução marcada com tecnécio (substância radioativa). Hoje em dia, pela sua boa tolerância, a cintilografia tem sido muito recomendada em crianças. Esse exame é considerado mais sensível que os métodos radiológicos, sendo também mais fisiológico e apresentando uma menor dose de radiação para o paciente.

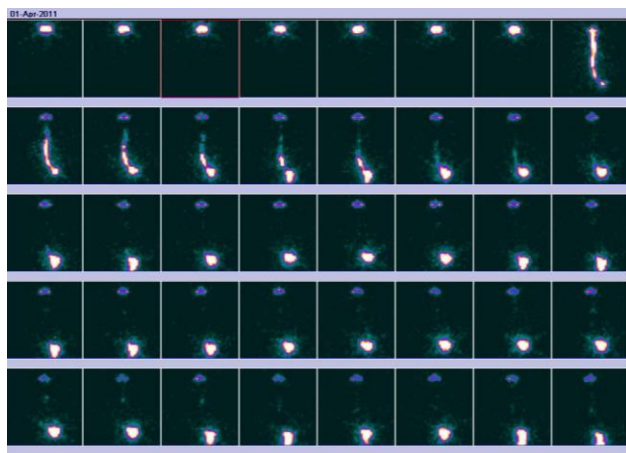
O radiofármaco utilizado é o Estanho coloidal (SN) marcado com  $^{99m}\text{Tc}$  administrado por via oral. É realizado como procedimento de rotina a imagem tardia dos campos pulmonares (3 a 5 horas após a ingestão do radiofármaco), para a pesquisa de aspiração pulmonar. Esta fase poderá ser dispensada a critério do médico solicitante.

**Preparo:** jejum de 4 horas (lactente - suspender a última mamadeira). Lactente: mamar um pouco, depois colocar o traçador na boca através de uma seringa e em seguida voltar a mamar. Crianças: Trazer 2 mamadeiras: 1 com leite da forma que a criança toma habitualmente em casa (de preferência não engrossado) e 1 vazia. Adultos ou crianças maiores: trazer 1 copo de suco de laranja.

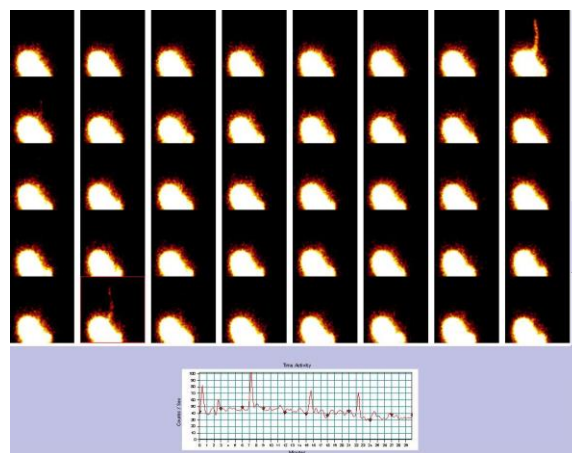
**Radiofármaco e dose usual (adulto):** 0,5 a 1 mCi (18,5 a 37 MBq) de  $^{99m}\text{Tc}$ - Estanho coloidal ou Fitato misturado em 30 ml de leite ou suco (criança: a seguir mamar leite não marcado até a saciedade, arrotar; adulto: a seguir tomar 1 copo de suco de laranja não marcado).

#### ❖ Técnica de Aquisição

- Colimador: LEHR
- Início: imediato após ingestão via oral e eructação.
- Posicionamento: decúbito dorsal horizontal.
- Projeções: Posterior de tórax e porção superior do abdômen.
- Aquisição: Em adultos e crianças maiores fazer o estudo em 2 fases. Primeira Fase: Iniciar com trânsito esofágico; Segunda Fase: Pesquisa de Refluxo, com imagens de 5-10 segundos por 30 minutos.



Trânsito Esofágico



Refluxo Gastroesofágico

Importante: Observar a frequência, duração e intensidade dos refluxos

#### ○ Cintilografia da Tireóide

A cintilografia de tireóide continua sendo importante ferramenta diagnóstica. Entre suas indicações destaca-se a avaliação pós tireoidectomia, a caracterização de nódulos quanto ao grau de captação de Iodo, detecção de nódulos autônomos, confirmação de tireoidite, tireóide ectópica, agenesia e hemigenesia. Valores de captação do iodo-131 são úteis no diagnóstico e tratamento de patologias da tireóide. A pesquisa de corpo inteiro com iodo-131 é o método de escolha para rastrear metástases de câncer de tireóide e para avaliar restos tireoidianos.

**Preparo:** Evitar substâncias que contenham iodo ou interfiram na função tireoidiana (alimentação, medicação, cosméticos, estudos contrastados).

### Captação

Inicia-se o exame administrando uma pequena dose de iodo radioativo via oral no paciente. Após isso realiza-se monitoração (*Captação*) de 2 e 24 horas para que seja investigada a taxa metabólica da tireóide, isto é, a quantidade de iodo que a tireóide absorveu em períodos diferentes.

**Radiofármaco e dose usual (adulto):** a 50  $\mu$ Ci - 0,37 MBq de Iodo-131 via oral.

#### ❖ Técnica de Aquisição

- Probe (Captador ou Espectrômetro) ajustado para 364 keV.
- Início: 2 e 24 horas após ingestão oral (de acordo com pedido médico);
- Posicionamento: sentada (no captador); No caso de bócio mergulhante contar região cervical / tórax e padrão afastando 2 x a distância padrão;
- Projeções: Anterior com sonda (captador) na distância padrão, perpendicular a região cervical e, para avaliar a radiação de fundo, na coxa ou braço;
- Aquisição: 1 minuto; comparar com padrão adquirido nas mesmas condições. Calculo: % captação = cervical - coxa / padrão x (correção de decaimento). Alguns equipamentos mostram o valor final na tela.

### Cintilografia da Tireóide

Após a captação de 24 horas, deve-se realizar a Cintilografia da tireóide, isto é, adquirir as imagens da função tireoidiana.

**Preparo:** não há

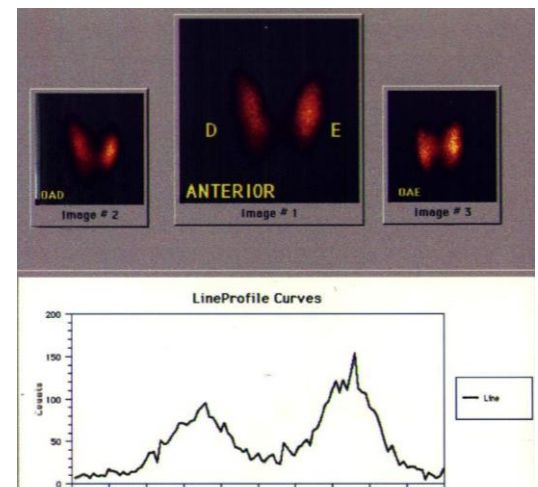
**Radiofármaco e dose usual (adulto):** 5 a 10 mCi (185 a 370 MBq) de pertecnetato.

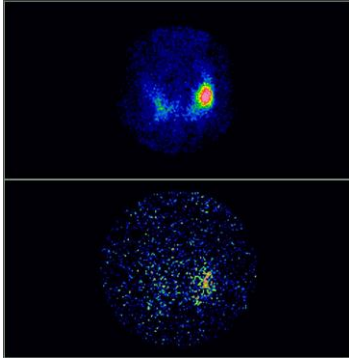
#### ❖ Técnica de Aquisição

- Primeira fase: Colimador Pinhole e janela de 364 keV.
- Posicionamento: decúbito dorsal horizontal, pescoço em extensão, distância fixa de 6 cm entre colimador e região cervical.
- Projeção anterior e com aquisição de 10 minutos.

#### Administra-se o Pertecnetato e troca-se a janela

- Segunda fase: Colimador Pinhole e janela de 140 keV.
- Início: 10-20 minutos após administração por via endovenosa.
- Posicionamento: a mesma da fase 1
- Projeções: Anterior, OAD e OAE.
- Aquisição: 100 mil contagens por imagem (mais ou menos 3 minutos). Pode beber água p/ lavar o esôfago.



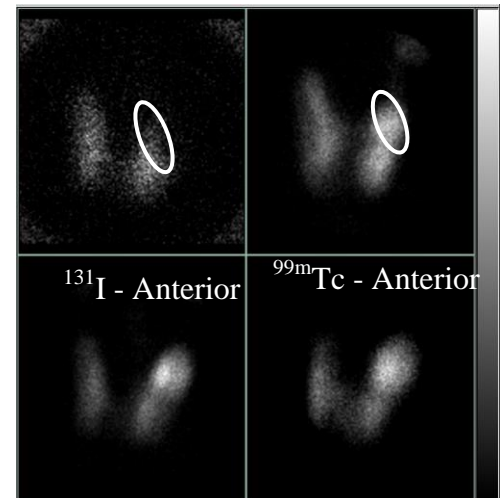


### Nódulos Concordantes Positivos

- Nódulo Quente na imagem do iodo e tecnécio;
- Alta probabilidade de benignidade;
- Indicado a Iodoterapia (doses até 30 mCi)

### Nódulos Discordantes

- Nódulo Quente na imagem do tecnécio e Frio na imagem do iodo;
- Alta probabilidade de malignidade;
- Indicado a Cirurgia e, em caso de remanescência, a Iodoterapia (doses até 200 mCi).



### ○ Cintilografia das Glândulas Salivares

Avalia a função das glândulas salivares. Utilizado principalmente em pacientes com "boca seca". Permite o estudo em tempo real da dinâmica das glândulas salivares, sendo possível a avaliação dos estágios da síndrome de Sjögren. O exame pode ser realizado em protocolo dinâmico (imagens sequenciais) ou por imagens estáticas.

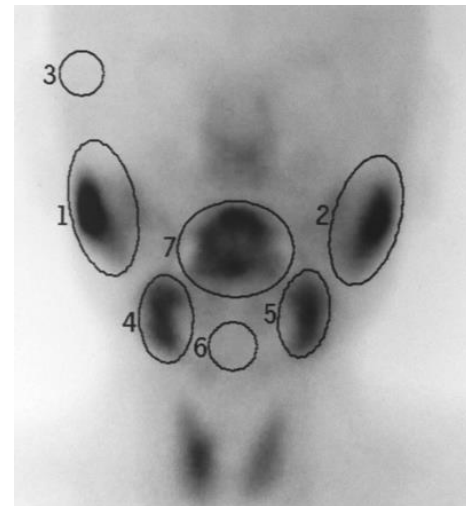
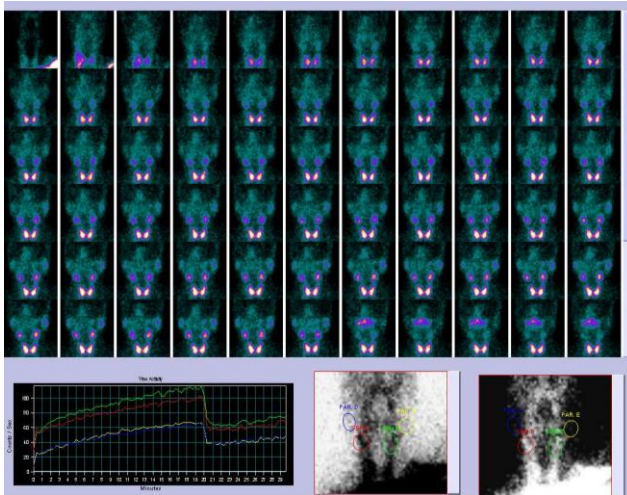
**Preparo:** Jejum de 2 horas (inclusive chicletes e balas). Trazer 1 limão.

**Radiofármaco e dose usual (adulto):** 25 a 30 mCi de  $^{99m}\text{Tc}$ -pertechnetato

### ❖ Técnica de Aquisição

- Colimador: LEHR
- Início: imediato após administração por via venosa.
- Posicionamento: decúbito dorsal horizontal

- Projeções: Anterior da cabeça.
- Aquisição: Fluxo com dinâmica de 25' com 75 imagens dinâmicas de 20 segundos. Aos 20' de exame administrar 3 mL de limão sublingual (sem movimentar a cabeça do paciente ou interromper a aquisição) e pedir para o mesmo engolir.
- Duração do Exame: aproximadamente 30 minutos.

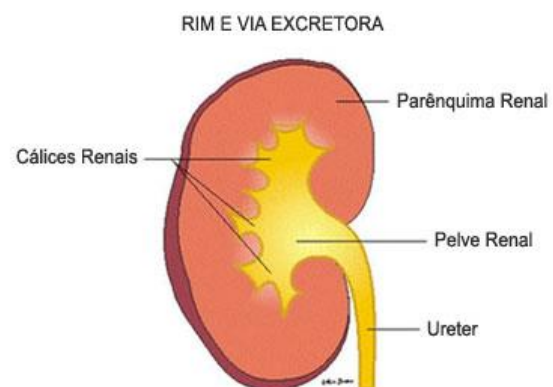
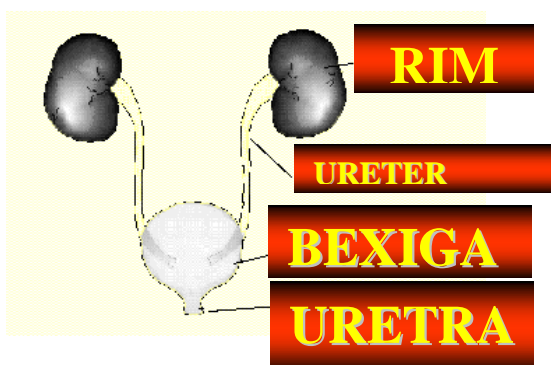


### ○ Cintilografia Renal Estática - DMSA

A cintilografia renal estática com DMSA permite avaliação da função renal de cada rim. Está indicada nas patologias infecciosas agudas dos rins, na detecção de cicatrizes, nas ectopias renais, nos traumas e tumores. Avalia a função renal tubular, sendo possível quantificar a função renal em termos relativos e absolutos, permitindo acompanhamento evolutivo. Excelente para o diagnóstico de pielonefrite.

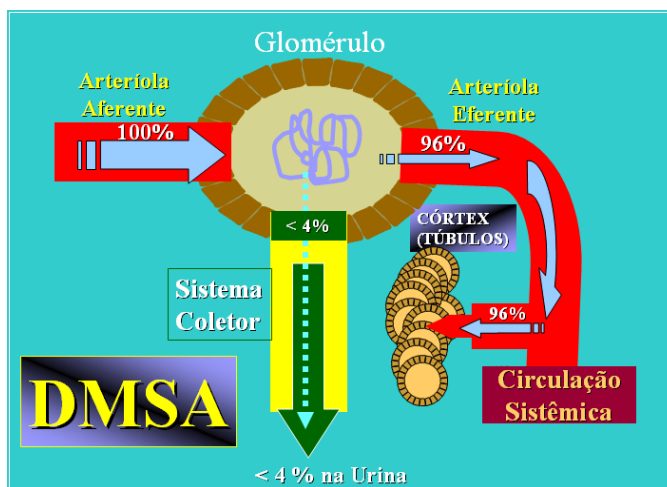
**Preparo:** Não há.

**Radiofármaco e dose usual (adulto):** 5 mCi (185 MBq) de  $^{99m}\text{Tc}$ -DMSA.

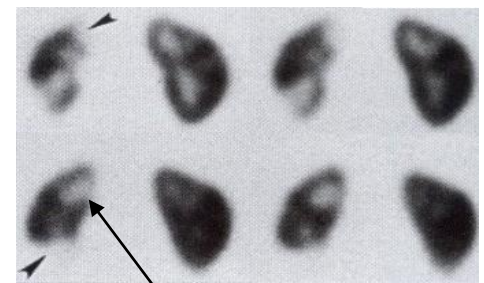
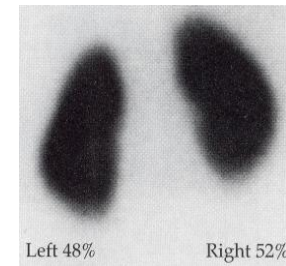


### ❖ Técnica de Aquisição

- Colimador: LEHR
- Início: 3 horas após administração por via venosa. No caso de retenção piélica: importante deve ser a realização da imagem posterior de 24 horas.
- Posicionamento: decúbito dorsal horizontal.
- Projeções: Anterior/ Posterior, OAD/OPE, OAE e OPD.
- Aquisição: Imagens com 3 min ou 500 mil contagens.



Exame Normal



Cicatrizes Renais

### ○ Cintilografia Renal Dinâmico - DTPA

Avalia os rins, ureteres e bexiga, fornecendo informações sobre o fluxo sanguíneo renal, função glomerular e excretora. Permite a análise da função renal diferencial, obstrução das vias urinárias, hipertensão renovascular, insuficiência renal e avaliação de transplante renal.

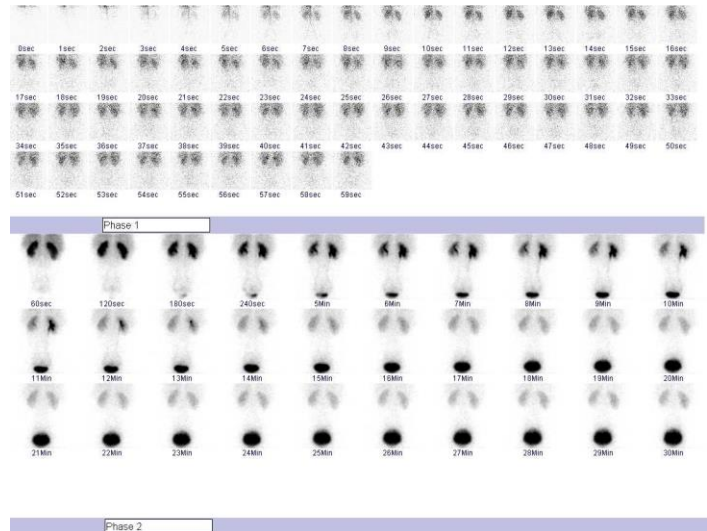
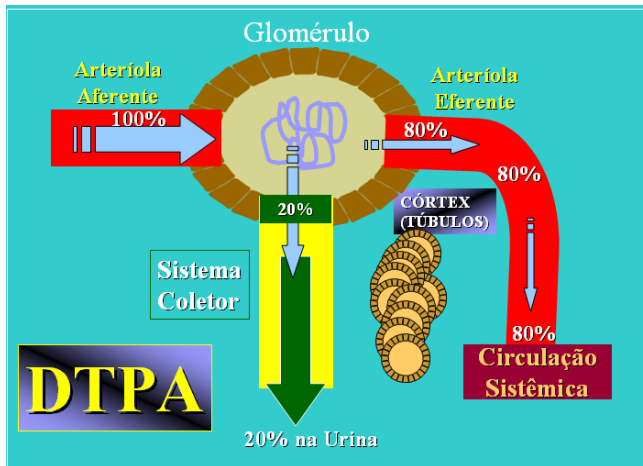
**Preparo:** Ingerir bastante líquido e esvaziar a bexiga antes de iniciar o exame.

**Radiofármaco e dose usual (adulto):** 10 mCi (370 MBq) de  $^{99m}\text{Tc}+\text{DTPA}$ .

### ❖ Técnica de Aquisição

- Colimador: LEHR
- Início: imediato após administração por via venosa em bolo.
- Posicionamento: decúbito dorsal horizontal.
- Projeção posterior de abdômen com centro do detector 7,5 cm abaixo do xifóide (projeção anterior em transplantados - conferir cicatriz cirúrgica).
- Aquisição: Esvaziar a bexiga antes da injeção. Conta seringa cheia, injeta, adquire fase de fluxo com 1 imagem a cada 2seg por 1 minuto e sequência dinâmica com 1 imagem por

minuto por 30 minutos. Em seguida adquire uma imagem estática Pré- Micção de 3min, paciente urina e adquire uma Pós- Micção. Conta seringa vazia. Ao final do estudo pode ser adquirida imagem cervical anterior com 100 mil contagens para avaliar presença de tecnécio livre.



### ○ Cintilografia de Perfusão Cerebral (SPECT)

A cintilografia de perfusão cerebral é realizada com ECD marcado com Tecnécio 99m. Este é um radiotraçador que se distribui no córtex cerebral proporcionalmente ao fluxo sanguíneo e atravessa livremente a barreira hemato-encefálica (BHE). Por isso ela é útil nas mais diversas patologias neurológicas e psiquiátricas. As principais indicações são os acidentes vasculares encefálicos e demências: Parkinson, Alzheimer, multi-infartos, hidrocefalias etc. Na epilepsia, é capaz de localizar o foco epileptogênico, através de estudo basal e ictal. A cintilografia de perfusão é utilizada também para avaliação da eficácia de tratamentos na perfusão de uma região cerebral. Embora em decrescente uso, a cintilografia cerebral convencional permite detecção de lesões que determinam permeabilidade de BHE, sendo útil em hematomas e tumores.

**Preparo:** Jejum de cafeína por 12 horas; retirar brincos, aparelhos auditivos ou ainda qualquer tipo de presilha de cabelo.

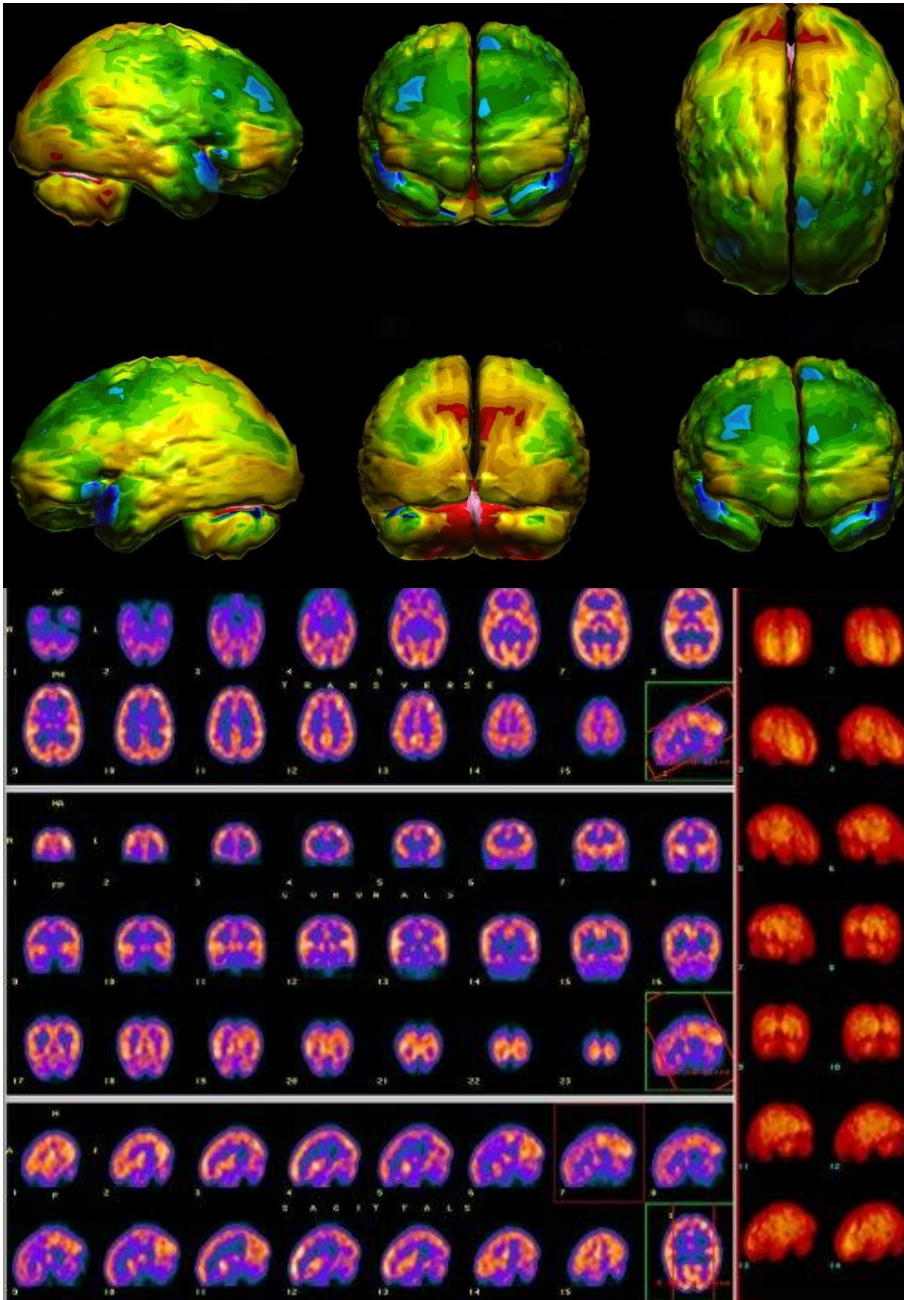
**Administração:** Endovenosa

**Radiofármaco e dose usual (adulto):** 25-30 mCi (740 a 1.110 MBq) de  $^{99m}\text{Tc}$  + ECD. O paciente deve estar com veia pega e em ambiente tranquilo por cerca de 30 minutos antes da injeção.

### ❖ Técnica de Aquisição

- Colimador: LEHR
- Início: 30 a 60 minutos após administração por via endovenosa.
- Posicionamento: decúbito dorsal horizontal, cabeça deve ser fixada com faixa, determinar posição que permita menor raio na órbita do SPECT.

- Projeções: SPECT 360°.
- Aquisição: SPECT matriz 128 com 60 steps (de acordo com protocolo do aparelho).



Antes da administração do radiofármaco, o paciente deve relaxar em uma sala escura e silenciosa por cerca de 30 minutos. Isto faz com que as regiões cerebrais responsáveis por esses sentidos não estejam tão aguçados no momento da absorção dos radiofármaco, o que ocasionaria uma hipercaptação nessas regiões desnecessariamente, ou seja, um artefato.

## Outras Considerações Sobre Aplicações Clínicas

### Observações sobre aplicações clínicas:

A- O Iodo-131 é aplicado tanto para fins diagnósticos como terapêuticos, porém o mais indicado para diagnósticos seja o Iodo-123 que além de ser emissor gama puro, tem meia vida de apenas 13 horas. Já o Iodo-131 é emissor gama e beta, sendo que a maior parte dos beta emitidos têm energia de 364 KeV;

B- O Gálio-67 liga-se às moléculas transportadoras do Ferro (Fe) tais como a desferrioxamina, a lactoferrina e às moléculas bacterianas transportadoras de ferro (sideróforas). Neste caso, as bactérias sideróforas liberadas por organismos patogênicos nos abscessos purulentos constituem no fator mais importante para o acúmulo de  $Ga^{67}$  nos abscessos comuns em pacientes com Aids;

C- O Tálcio-201 é injetado na forma de cloreto de tálcio e comporta-se como o potássio, de forma proporcional ao fluxo sanguíneo. Na realização do exame, o tálcio é injetado quando o paciente está no pico de um exercício físico, isto é, com aumento do trabalho cardíaco, e também em repouso. O paciente geralmente realiza o exercício em uma esteira ergométrica. As imagens são comparadas e analisadas. Imagens da distribuição do radioisótopo no miocárdio fornecerão informações sobre a existência ou não de anormalidades devidas à isquemia ou enfarte;

D- O  $^{18}F$ -FDG é útil no diagnóstico de tumores cerebrais. Isto porque os tumores apresentam alto nível de metabolismo glicolítico, enquanto o tecido cerebral necrosado ou normal apresenta níveis baixos, permitindo esta comparação nos exames.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

Apostila adaptada a partir das seguintes obras:

THRALL, J. H.; ZIESSMAN, H. A. Medicina Nuclear. 2ª ed. Rio de Janeiro: **Guanabara Koogan**, 2003.

CASTRO JÚNIOR, A; DIMENSTEIN, R. Guia Prático em Medicina Nuclear. São Paulo: **Senac**, 2002.

NOBREGA, A. I. Tecnologia Radiológica e Diagnóstico por Imagem. Vol 4. São Paulo: **Difusão**, 2006.

REIS, J. V. O. Técnicas usadas para avaliar a exposição interna de pacientes devido a incorporação de Molibdênio como impureza em eluatos de Tecnécio em Medicina Nuclear. Brasília, 2012.