

Regina Pinto de Carvalho

APLICAÇÕES DA ENERGIA NUCLEAR

INDÚSTRIA • MEIO AMBIENTE
PRODUÇÃO DE ALIMENTOS • BENS CULTURAIS



IAEA

International Atomic Energy Agency

Atoms for Peace

Regina Pinto de Carvalho

APLICAÇÕES DA ENERGIA NUCLEAR

Indústria • Meio ambiente
Produção de alimentos • Bens culturais



IAEA
International Atomic Energy Agency
Atoms for Peace

Publicado por

International Atomic Energy Agency - IAEA
Vienna International Centre
PO Box 100 / 1400 Vienna, Austria
www.iaea.org

Revisão

Vera Lucia De Simoni Castro

Revisão técnica

Ana Márcia Greco de Sousa

Ilustração

Henrique Cupertino

Diagramação

Christiane Morais

Apoio

Agência Internacional de Energia Nuclear - IAEA
Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência - SBPC
Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN
Sociedade Brasileira de Física - SBF

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO I – FUNDAMENTOS..... | 9 |
| A composição do núcleo..... | 9 |
| Reações nucleares..... | 10 |
| Decaimento radioativo..... | 12 |
| Obtenção de radioelementos..... | 12 |
| Obtenção de feixes de radiação ionizante..... | 13 |
| Interação da radiação com a matéria..... | 14 |
| Detecção da radiação ionizante..... | 15 |
| CAPÍTULO II - ISÓTOPOS ESTÁVEIS..... | 17 |
| Isótopos da água..... | 17 |
| Isótopos estáveis em matéria orgânica..... | 18 |
| Medida das variações isotópicas..... | 19 |
| <i>Espectrômetro de massa</i> | 19 |
| <i>Espectroscopia por absorção de laser</i> | 20 |
| Aplicações..... | 21 |
| <i>Isótopos do oxigênio</i> | 21 |
| <i>Informações sobre águas superficiais e subterrâneas</i> | 21 |
| <i>Isótopos do carbono</i> | 22 |
| <i>Origem do carbono na atmosfera</i> | 22 |
| <i>Origem do carbono nos oceanos</i> | 24 |
| <i>Isótopos do nitrogênio e enxofre</i> | 24 |
| CAPÍTULO III – APLICAÇÕES DA ENERGIA NUCLEAR NA INDÚSTRIA..... | 25 |
| Radiotraçadores..... | 25 |
| <i>Radiotraçadores na indústria petrolífera</i> | 25 |
| <i>Fluxos gasosos</i> | 28 |
| Sistemas nucleônicos de controle..... | 29 |
| <i>Retroespalhamento de nêutrons</i> | 29 |

| | |
|--|----|
| <i>PGNAA</i> | 30 |
| <i>Varredura γ</i> | 32 |
| <i>Análise por transmissão dual de emissão γ</i> | 32 |
| Testes não destrutivos..... | 33 |
| <i>Radiografias e gamagrafias</i> | 33 |
| Outros usos da radiação ionizante..... | 34 |
| CAPÍTULO IV - ESTUDOS AMBIENTAIS..... | 35 |
| Radiotraçadores..... | 36 |
| <i>Uso do ouro como radiotraçador</i> | 36 |
| <i>O tecnécio-99m usado como radiotraçador</i> | 37 |
| <i>Trítio como radiotraçador em aterros sanitários</i> | 38 |
| <i>Traçadores ativáveis</i> | 39 |
| Radiotraçadores para estudo de solo..... | 40 |
| Uso de fontes seladas..... | 41 |
| <i>Análise por transmissão γ</i> | 41 |
| <i>Retroespalhamento γ</i> | 41 |
| Estudos meteorológicos..... | 42 |
| CAPÍTULO V - APLICAÇÕES DA ENERGIA NUCLEAR NA PRODUÇÃO DE ALIMENTOS..... | 45 |
| Estudo de solos..... | 45 |
| Mutação induzida..... | 46 |
| Técnica do inseto estéril..... | 48 |
| Irradiação de alimentos..... | 52 |
| Pecuária..... | 53 |
| CAPÍTULO VI - APLICAÇÕES DA ENERGIA NUCLEAR PARA FINS CULTURAIS..... | 55 |
| Datação com carbono-14..... | 55 |
| Muografia..... | 56 |
| SUGESTÕES DE LEITURA..... | 59 |

As aplicações pacíficas da energia nuclear são em geral desconhecidas da população. Dando seguimento ao projeto iniciado no livro anterior, “Aplicações da Energia Nuclear na Saúde”, pretendemos com este novo trabalho exemplificar o uso da energia nuclear em áreas tão diversas quanto a indústria, os estudos ambientais, a produção de alimentos ou a preservação de bens culturais. O objetivo é fornecer ao professor do ensino médio bibliografia sobre o assunto, em nível adequado, para complementar seu trabalho em sala de aula.

Após uma breve introdução contendo os fundamentos da Física Nuclear, seguem-se capítulos sobre as aplicações nas diversas áreas. Os capítulos de aplicações são independentes e podem ser lidos em qualquer ordem. Por essa razão, optamos por repetir em alguns capítulos informação importante para a sua compreensão, mesmo que ela já tenha sido fornecida em outro capítulo.

Procuramos apresentar as ilustrações de forma a serem compreendidas por pessoas daltônicas. Se você, caro leitor, possui essa característica e teve dificuldade na interpretação das figuras, por favor, faça contato, para que o trabalho possa ser melhorado.

Gostaríamos de agradecer inúmeros especialistas, de todas as partes do planeta, que dedicaram parte do seu tempo para nos receber ou ler o material, enviar informação e referências. Alguns deles são citados ao final de cada capítulo.

Em especial, agradecemos ao Prof. João Alberto Osso Júnior (IAEA) por suas observações e comentários. A ele agradecemos também por se ocupar da parte operacional do projeto.

Agradecemos ao Dr. Raúl Ramirez pelo apoio ao projeto.

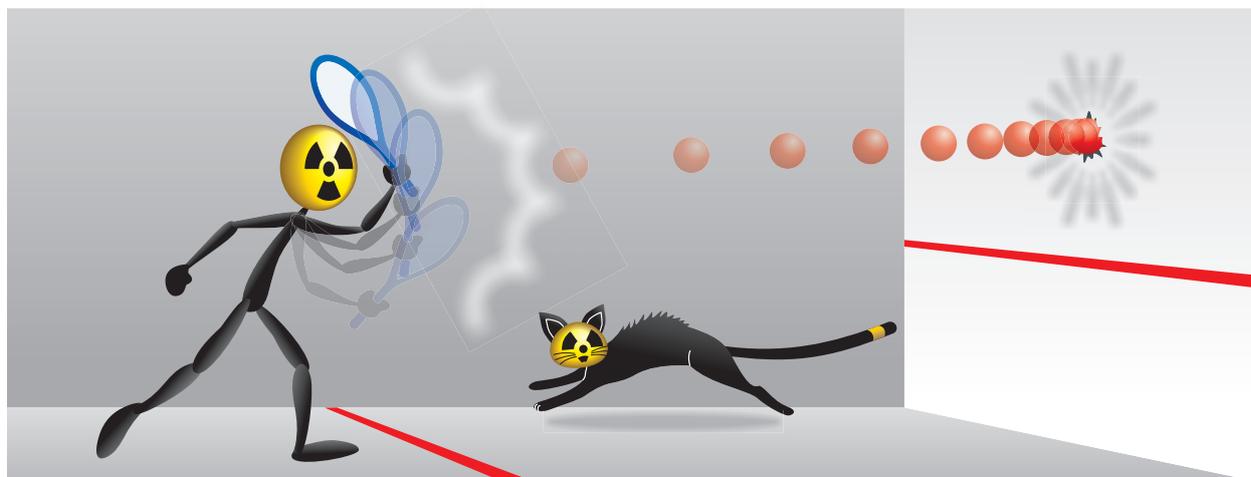
Agradecemos imensamente ao Prof. Aldo Malavasi (IAEA) que abraçou o projeto e permitiu que ele atingisse uma escala muito maior do que se imaginava inicialmente.

Regina
Janeiro/2019

(...) e não esquecer que a estrutura do átomo não é vista mas sabe-se dela. Sei de muita coisa que não vi. E vós também. (...)

Clarice Lispector - *A Hora da Estrela*

CAPÍTULO I – FUNDAMENTOS



Podemos descrever um átomo como possuindo um **núcleo** positivo e **elétrons** negativos, situados em uma região em torno do núcleo. O volume do átomo é determinado pela chamada nuvem eletrônica e sua massa é principalmente devida à massa do núcleo. As transformações dos núcleos através de bombardeamento e emissões são o objeto de estudo da Física Nuclear.

Este capítulo apresenta um sumário dos fundamentos da Física Nuclear que serão necessários para a compreensão dos capítulos posteriores.¹

A composição do núcleo

As partículas que compõem o núcleo são chamadas **núcleons**. Elas podem ser positivas (os **prótons**) ou não possuírem carga elétrica (os **nêutrons**). Existem forças de atração entre os núcleons, que precisam compensar as forças de repulsão elétrica entre os prótons, para que o núcleo se mantenha coeso.

Os elementos químicos se distinguem uns dos outros pelo número de prótons em seus núcleos (igual ao número de elétrons, se o átomo é neutro). Eles podem ter números diferentes de nêutrons, mantendo as mesmas propriedades químicas, mas possuindo massas diferentes. Átomos do mesmo elemento com números diferentes de nêutrons são chamados **isótopos**. A maioria dos elementos possui isótopos naturais. Muitos isótopos naturais são estáveis; outros, instáveis, decaem por emissões radioativas.

Os núcleos são representados pelo símbolo do elemento ao qual correspondem; um número à esquerda, abaixo do símbolo, representa o seu número atômico (número de prótons), e um número à esquerda, acima do símbolo, representa seu número de massa (número de prótons + número de nêutrons). Se um núcleo estiver em um estado excitado, isso é representado por um asterisco à direita, acima do símbolo. No exemplo abaixo, temos a representação de um núcleo de urânio-236 (92 prótons, 144 nêutrons) num estado excitado:



¹ Para um desenvolvimento mais detalhado do assunto, o leitor pode se dirigir aos primeiros capítulos do livro anterior: “Aplicações da Energia Nuclear na Saúde” (R. P. de Carvalho e S. M. Velasques de Oliveira), SBPC-IAEA (2017), disponível em: <<http://portal.sbpcnet.org.br/livro/energianuclearnaude.pdf>> Acesso em jan/2019.

É dispensável se escrever o número de prótons, já que ele é determinado pelo símbolo do elemento; porém, pode ser útil exibir esse número, para facilitar a visualização dos processos nucleares.

Reações nucleares

Um núcleo pode ser modificado por emissão espontânea, absorção ou bombardeamento de partículas, fótons ou de outros núcleos.

Quando um núcleo não está em equilíbrio, ele pode sofrer **decaimento**, emitindo partículas ou radiação, para atingir uma configuração mais estável. Os isótopos que decaem espontaneamente são denominados **radioisótopos**. As emissões nucleares são descritas na Tabela I-1 e na Figura I-1.

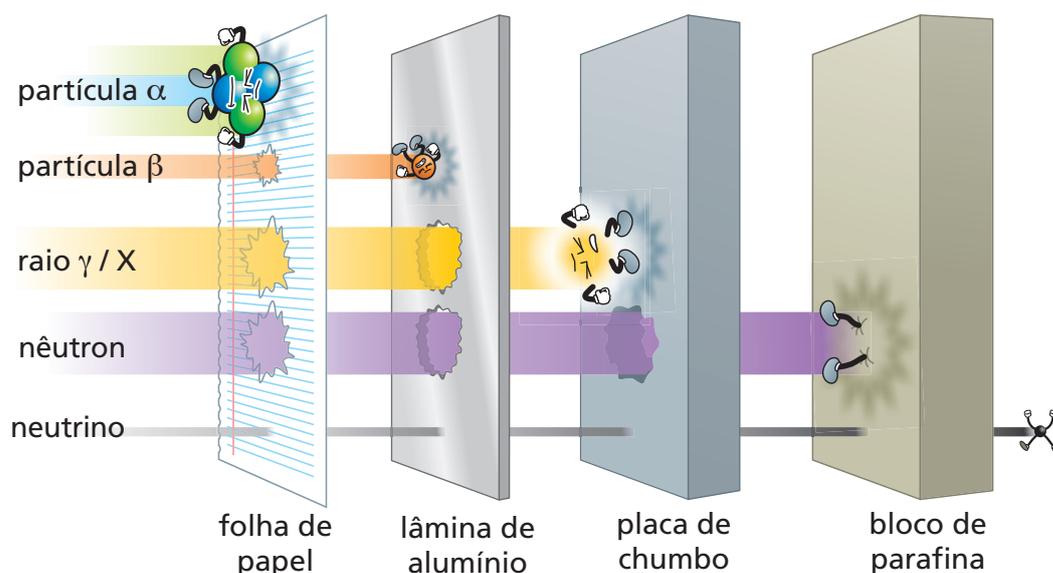
Tabela I-1 – Características das emissões nucleares

| Partícula | Composição | Barrada por |
|-------------|--|--|
| α | 2 prótons + 2 nêutrons | folha de papel |
| β^- | elétron | lâmina de Al |
| β^+ | pósitron (semelhante a um elétron de carga positiva) | lâmina de Al |
| ν | neutrino | - - |
| $\bar{\nu}$ | anti-neutrino | - - |
| γ | fóton de alta energia | placa de Pb ou alguns metros de concreto |
| n | nêutron | bloco de boro ou parafina |

Baseado em: R. P. de Carvalho e S. M. Velasques de Oliveira – Aplicações da Energia Nuclear na Saúde – IAEA, SBPC, 2017 – Disponível em: <http://portal.sbpcnet.org.br/livro/energianuclearnaude.pdf>

Obs: Prótons e nêutrons existem em permanência dentro do núcleo; as partículas β são criadas no momento de sua emissão, que é sempre acompanhada da emissão de neutrinos. Estes são partículas sem carga, de massa muito menor que a do elétron, e que transportam quantidade de movimento e energia, sendo responsáveis pela conservação dessas grandezas durante as transformações nucleares. Por serem neutros e terem massa muito pequena, os neutrinos interagem muito pouco com a matéria.

Figura I-1: Materiais que podem blindar as emissões nucleares



Baseado em: R. P. de Carvalho e S. M. Velasques de Oliveira – Aplicações da Energia Nuclear na Saúde – IAEA, SBPC, 2017 – Disponível em: <http://portal.sbpcnet.org.br/livro/energianuclearnaude.pdf>. Acesso em jan/2019.

As emissões nucleares têm altas energias e são capazes de ionizar os átomos sobre os quais incidem (ionizar = arrancar elétrons). Por isso, são chamadas **radiação ionizante**. Os raios-X, embora não tenham origem nuclear, também têm energia suficiente para ionizar a matéria, e, portanto, também são considerados como radiação ionizante.

As reações nucleares podem ser representadas de forma análoga às reações químicas. A seguir, temos alguns exemplos de reações nucleares:



A equação i-2 descreve o **decaimento espontâneo** do plutônio-238 que, após a emissão de uma partícula α , se transforma no urânio-234.

Na equação i-3, um núcleo de urânio-235 absorve um nêutron e se transforma em urânio-236, num estado excitado; em seguida, este se divide em dois núcleos menores, bário-141 e criptônio-92, emitindo 3 nêutrons. Esta reação é denominada **fissão** e desprende uma grande quantidade de energia.

Na equação i-4, temos a reação entre um isótopo de hidrogênio com 1 próton e 1 nêutron (o **deutério**, que pode também ser representado pelo símbolo D) e outro isótopo do hidrogênio, com 1 próton e 2 nêutrons (o **trítio**, também representado por T). Os dois núcleos se fundem em um núcleo de hélio-4, emitindo 1 nêutron e grande quantidade de energia. Essa reação leva o nome de **fusão** e é uma das principais fontes de energia do Sol e das estrelas.

A equação i-5 descreve o **bombardeamento** do oxigênio-18 por um próton, resultando em flúor-18, emissão de um nêutron e de energia.

A equação i-6 é uma forma simplificada de descrever a reação da equação i-5: estão indicados o núcleo inicial, as partículas envolvidas (entre parênteses) e o núcleo final.

Na equação i-7, temos um exemplo de **captura eletrônica**: o núcleo de berílio-7 absorve um elétron de sua própria nuvem eletrônica, transformando-se em lítio-7 e emitindo um neutrino e energia na forma de radiação γ .

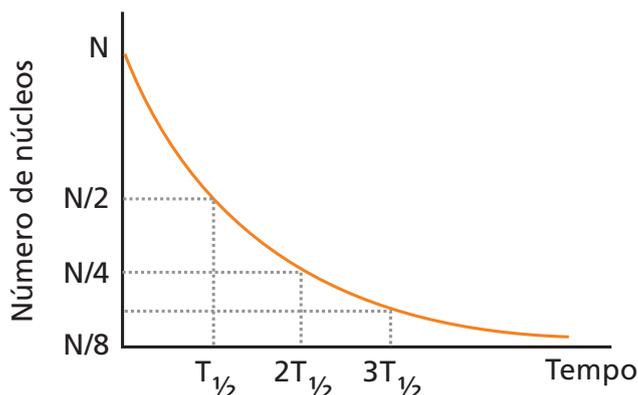
Decaimento radioativo

Durante o decaimento radioativo, o número N de radioisótopos diminui com o tempo t , a partir de um número inicial N_0 , segundo uma lei exponencial:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad \text{i-8}$$

O tempo necessário para ocorrer o decaimento de metade dos núcleos em uma amostra é denominado meia-vida e representado pelo símbolo $T_{1/2}$. Assim, se no início de uma observação existem N núcleos radioativos na amostra, após uma meia-vida restarão $\frac{N}{2}$ núcleos radioativos; depois de 2 meias-vidas, restarão $\frac{1}{2} \cdot \frac{N}{2} = \frac{N}{4}$ núcleos radioativos, e assim por diante. A Figura I-2 mostra a variação do número de núcleos radioativos em função do tempo.

Figura I-2: Variação do número de núcleos radioativos em função do tempo, em um caso de decaimento espontâneo



Fonte: R. P. de Carvalho e S. M. Velasques de Oliveira – Aplicações da Energia Nuclear na Saúde – IAEA, SBPC, 2017 – Disponível em: <<http://portal.sbpcnet.org.br/livro/energianuclearnaude.pdf>>. Acesso em jan/2019.

Obtenção de radioelementos

Os radioelementos encontrados na Natureza são aqueles cuja meia-vida é maior que a idade da Terra, pois os outros decaíram para um núcleo estável. Encontramos também radioelementos naturais de meia-vida mais curta, que fazem parte da cadeia de decaimento dos elementos de meia-vida mais longa. Por exemplo, o rádio-228 ($T_{1/2} = 5.8$ anos) existe na Natureza porque provém do decaimento do tório-232 ($T_{1/2} = 14 \cdot 10^9$ anos). Temos ainda radioelementos de meia-vida mais curta que a idade da Terra formados na alta atmosfera pelo bombardeamento das moléculas ali presentes por raios cósmicos.

Outros radioisótopos podem ser obtidos artificialmente por bombardeamento com partículas carregadas ou nêutrons. Muitos são também formados nas reações de fissão provocadas pelo homem; quando isso ocorre em reatores nucleares, os produtos de fissão podem ser reaproveitados para outros usos. Testes e explosões nucleares ocorridos no século passado lançaram radioelementos na atmosfera terrestre, sendo que os de meia-vida mais longa ainda estão presentes em todo o planeta.

Quando os radioisótopos presentes na atmosfera, sejam eles de origem natural ou antropogênica, caem sobre o solo, são chamados FRNs (do inglês *Fallout RadioNuclides*, radionuclídeos de queda).

A Tabela I-2 mostra alguns radioelementos, sua origem e valor da meia-vida.

Tabela I-2 – Origem e meia-vida de alguns radioelementos

| Radioelemento | Meia-vida | Origem |
|-------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| ^{232}Th | $14 \cdot 10^9$ anos | Meia-vida comparável à idade da Terra |
| ^{238}U | $4,5 \cdot 10^9$ anos | |
| ^{40}K | $1,3 \cdot 10^9$ anos | |
| ^{14}C | 5.730 anos | Formados na alta atmosfera |
| ^3H | 12,3 anos | |
| ^7Be | 53 dias | |

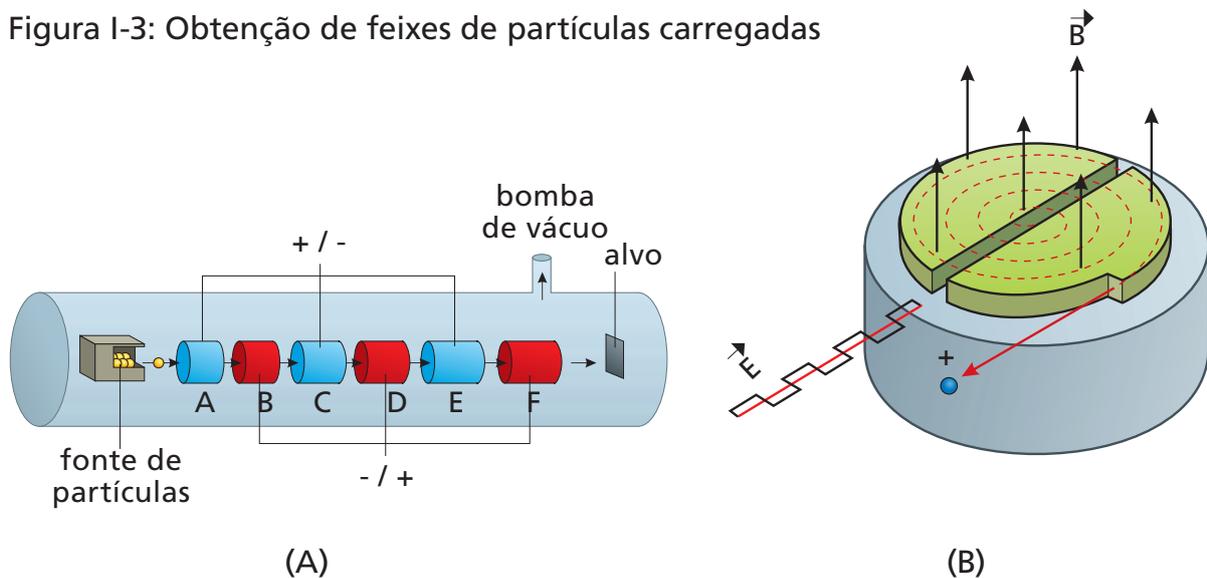
| Radioelemento | Meia-vida | Origem |
|-------------------|----------------------|--|
| ^{210}Pb | 22,2 anos | Produto de decaimento do ^{238}U |
| ^{239}Pu | $24 \cdot 10^3$ anos | Formados em testes e explosões nucleares |
| ^{137}Cs | 30 anos | |
| ^{90}Sr | 28 anos | |
| ^{60}Co | 5,3 anos | Obtidos em reatores para uso na Medicina ou na Indústria |
| ^{131}I | 12 dias | |

Obtenção de feixes de radiação ionizante

Para se obter artificialmente os radioisótopos, são necessários equipamentos para produzir os feixes de partículas ou radiação, que promovem as reações nucleares.

Os feixes de partículas carregadas são obtidos em aceleradores lineares ou cíclotrons, como mostrado na Figura I-3.

Figura I-3: Obtenção de feixes de partículas carregadas



A: Num acelerador linear, um filamento metálico é aquecido para separar elétrons dos átomos do metal; esses elétrons são acelerados em regiões com campos elétricos alternados e sincronizados com o movimento dos elétrons, de modo a acelerá-los sempre na mesma direção. Feixes de prótons podem ser obtidos de forma semelhante. Os feixes são concentrados usando-se campos magnéticos. B: Num cíclotron, ao mesmo tempo em que são aceleradas, as partículas carregadas são desviadas por campos magnéticos, percorrendo uma trajetória em espiral. A cada volta, os valores de campo elétrico e magnético são ajustados para aumentar a energia do feixe. Fonte: R. P. de Carvalho e S. M. Velasques de Oliveira – Aplicações da Energia Nuclear na Saúde – IAEA, SBPC, 2017. Disponível em: <<http://portal.sbpcnet.org.br/livro/energianuclearnaude.pdf>>. Acesso em jan/2019.

Os feixes de nêutrons são obtidos no interior de reatores de fissão, que produzem nêutrons de alta energia. Eles são moderados (têm sua energia cinética reduzida) por material rico em hidrogênio contido no reator, em geral, água ou água pesada (contendo isótopos pesados de hidrogênio). As colisões dos nêutrons com núcleos de massa semelhante (hidrogênio ou deutério) fazem com que a energia seja repartida. Outra forma de se obterem nêutrons é o uso de reações indiretas, em que partículas carregadas incidem sobre um alvo e provocam uma reação, emitindo nêutrons. Existem também alguns radioisótopos que decaem com emissão de nêutrons.

Os raios-X podem ser obtidos por desaceleração de partículas carregadas ou por bombardeamento. Quando essas partículas são desaceleradas, há uma emissão de raios-X, no fenômeno conhecido como *bremstrahlung*, palavra alemã que significa radiação de frenamento. Esse efeito é obtido lançando-se as partículas contra um alvo. Ao mesmo tempo, elas deslocam elétrons das camadas mais internas dos átomos desse alvo; elétrons de níveis mais altos “caem” para ocupar o lugar dos elétrons arrancados, emitindo raios-X de energia correspondente à diferença de energia entre o estado inicial e o final do elétron.

Interação da radiação com a matéria

As formas de interação da radiação com a matéria dependem do tipo de radiação: fótons (radiação eletromagnética), partículas carregadas ou nêutrons.

A radiação eletromagnética (fótons) interage com a matéria em 3 diferentes formas, de acordo com a sua energia: o efeito fotoelétrico, o efeito Compton e a formação de pares (Figura I-4).

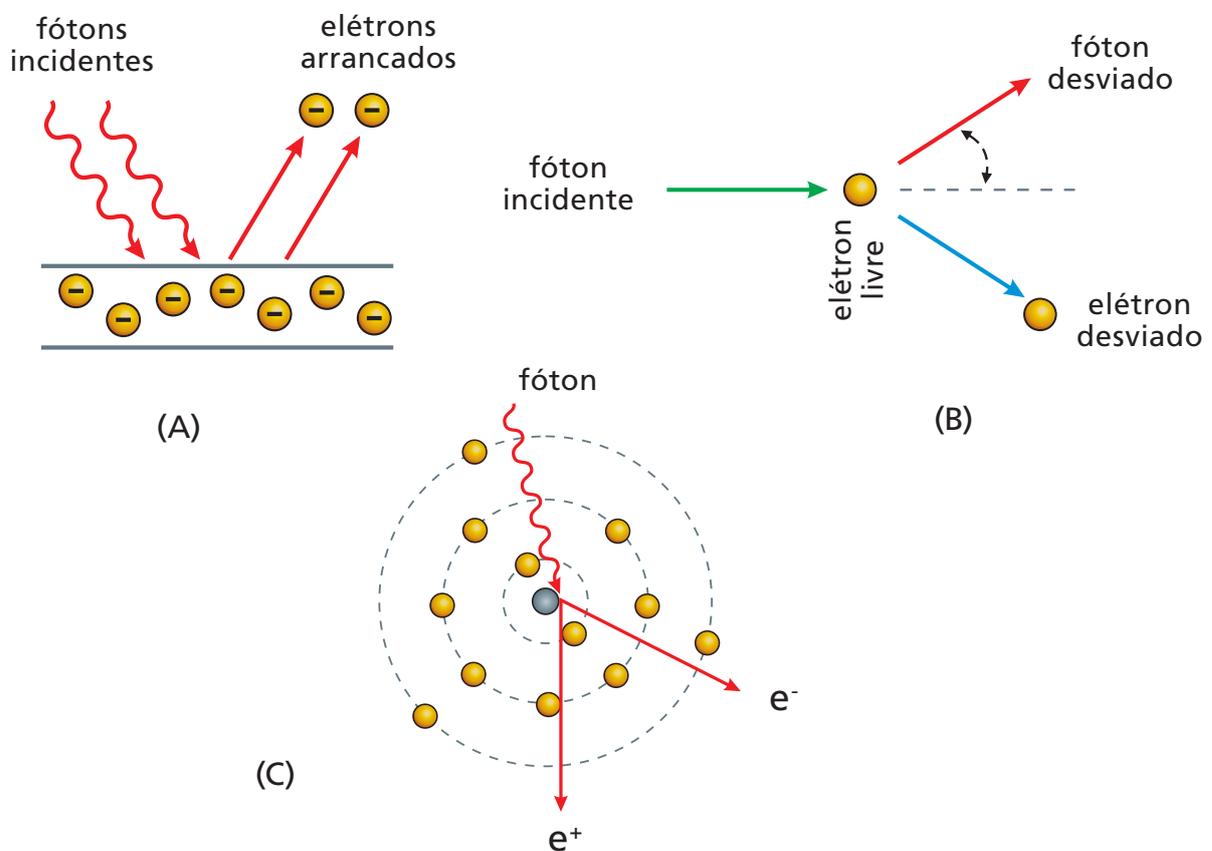
No **efeito fotoelétrico**, um fóton incide sobre uma superfície metálica e arranca um elétron pertencente a um átomo da superfície. Esse fenômeno ocorre para energias mais baixas do fóton.

Em energias intermediárias, um fóton e um elétron livre ou fracamente ligado a um átomo se comportam como duas partículas que se chocam, modificando suas trajetórias e obedecendo as leis de conservação da energia e da quantidade de movimento. Esse fenômeno é denominado **efeito Compton**.

Se a energia do fóton é bastante alta, pode ocorrer a **formação de pares**: o fóton desaparece, dando surgimento a um elétron e um pósitron, obedecendo à lei de conservação da massa-energia. Esse fenômeno ocorre nas proximidades de um núcleo, que recua, obedecendo à lei de conservação da quantidade de movimento.

Pode também ocorrer o fenômeno inverso, a **aniquilação de pares**: um pósitron e um elétron se aniquilam, gerando fótons de energia correspondente às massas e energias do par. Embora não tenham origem nuclear, esses fótons são chamados radiação γ , devido à sua alta energia.

Figura I-4: A: Ilustração do efeito fotoelétrico, B: do efeito Compton e C: da formação de pares



Fonte: R. P. de Carvalho e S. M. Velasques de Oliveira – Aplicações da Energia Nuclear na Saúde – IAEA, SBPC, 2017 – Disponível em: <<http://portal.sbpcnet.org.br/livro/energianuclearnaude.pdf>>. Acesso em jan/2019.

As partículas carregadas interagem com os átomos principalmente arrancando elétrons (ionização) ou transferindo-os para níveis de energia mais elevados (excitação). Durante a interação, elas sofrem desaceleração e emitem radiação eletromagnética.

Os nêutrons, por não possuírem carga elétrica, interagem com os núcleos através de espalhamento (choque com troca de energia) ou captura, quando levam o núcleo a um estado excitado e provocam reações nucleares ou fissão do núcleo.

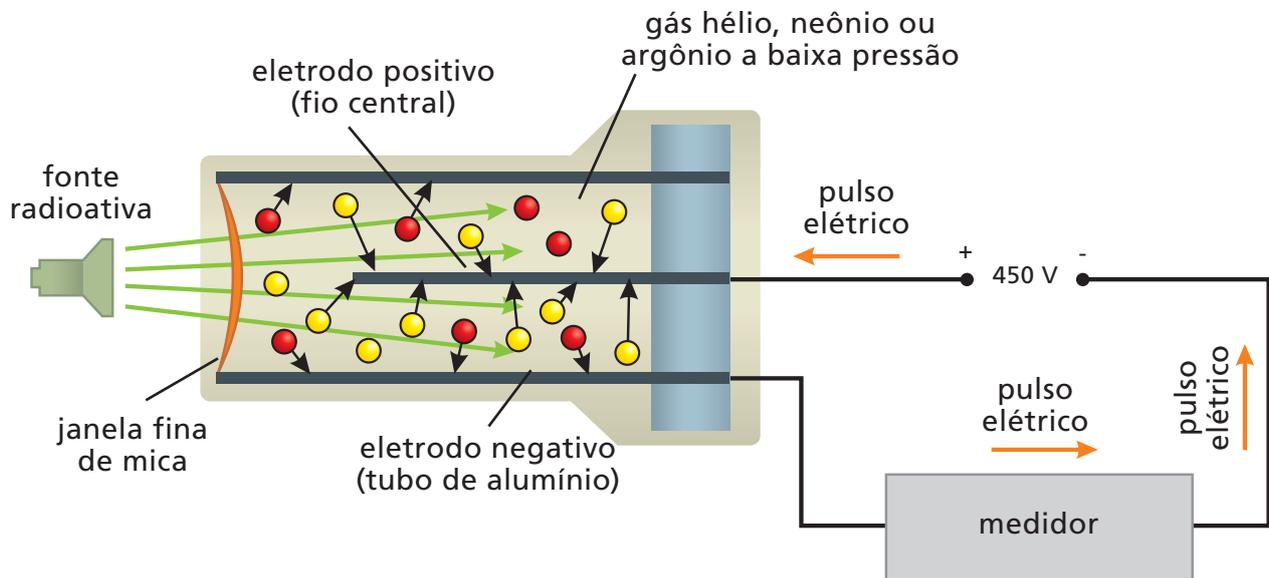
Detecção da radiação ionizante

Os detectores de radiação usam como meio de detecção as formas de interação da radiação com a matéria e, em geral, transformam os sinais obtidos em seu interior em imagens ou pulsos elétricos, que podem ser medidos e analisados.

A primeira forma de detectar radiação foram os filmes com **emulsão fotográfica**. A emulsão consiste em grãos de sais de prata, que são ionizados pela passagem da radiação. A prata se transforma em prata metálica, e se pode ter uma imagem mostrando a trajetória da radiação. Esta forma de detecção ainda é usada em casos especiais.

Atualmente, os detectores mais comuns contêm gás, que é ionizado pela passagem da radiação; os íons se deslocam sob a ação de uma diferença de potencial, provocando um pulso elétrico que pode ser medido. O detector de gás mais conhecido é o contador de **Geiger-Müller** (Figura I-5).

Figura I-5: Esquema de um contador de Geiger-Müller

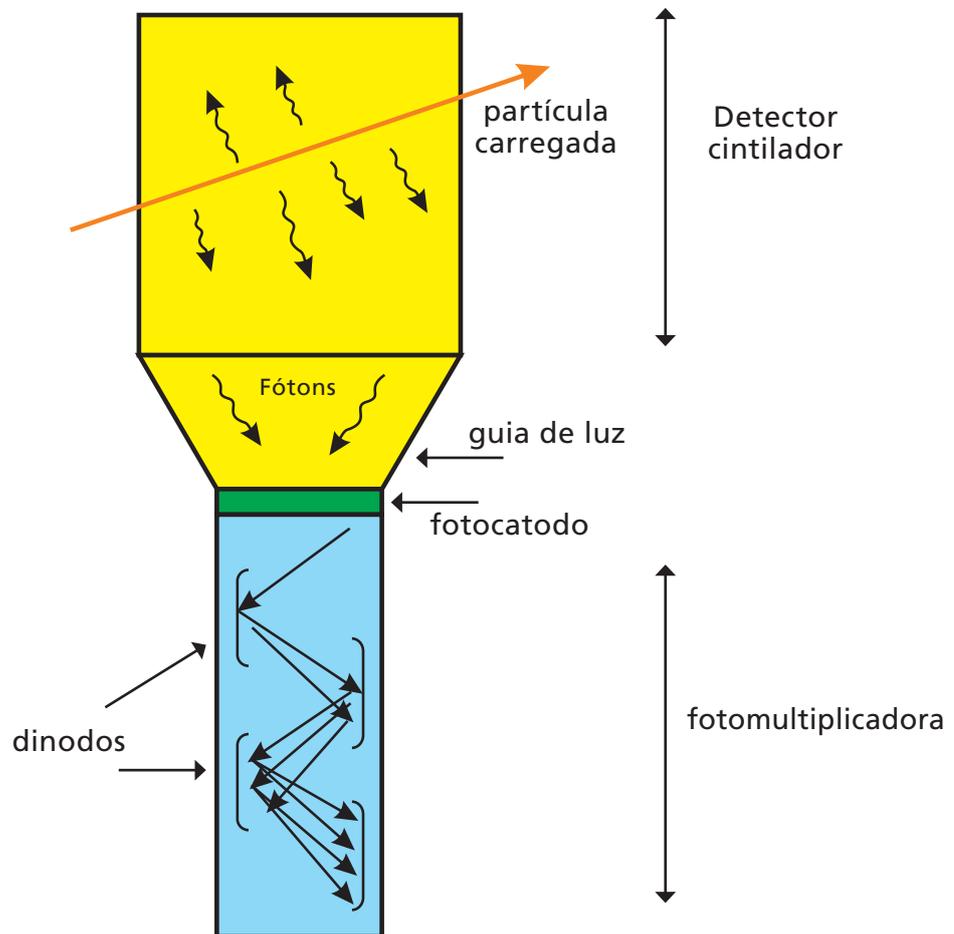


A radiação ioniza o gás contido em uma câmara; os íons se deslocam sob a ação de uma diferença de potencial entre a carcaça e um fio central, provocando um pulso elétrico que é registrado em um medidor externo.

Baseado em: R. P. de Carvalho e S. M. Velasques de Oliveira – Aplicações da Energia Nuclear na Saúde – IAEA, SBPC, 2017 – Disponível em: <<http://portal.sbpnet.org.br/livro/energianuclearnaude.pdf>>. Acesso em jan/2019.

Detectores mais modernos usam cristais **cintiladores**, que emitem luz após a passagem da radiação; os fótons emitidos geram elétrons, que são multiplicados e medidos em um circuito externo (Figura I-6).

Figura I-6: Esquema de um detector cintilador



O cristal cintilador emite fótons com a passagem da radiação; ao incidir sobre o fotocátodo, os fótons geram elétrons devido ao efeito fotoelétrico. Os elétrons emitidos são acelerados e se chocam contra placas metálicas (dinodos), de onde arrancam outros elétrons. O feixe de elétrons, assim multiplicado, forma um pulso elétrico, que é analisado por um circuito externo.

Fonte: R. P. de Carvalho e S. M. Velasques de Oliveira – Aplicações da Energia Nuclear na Saúde – IAEA, SBPC, 2017 – Disponível em: <<http://portal.sbpnet.org.br/livro/energianuclearnaude.pdf>>. Acesso em jan/2019.

Outro tipo de detecção é feito usando-se materiais **semicondutores**: neles, a radiação ioniza um cristal semicondutor e os elétrons emitidos ficam retidos em níveis de energia não ocupados, em impurezas do cristal. Esses elétrons podem ser liberados, por exemplo, com o aumento da temperatura do cristal e, ao voltar para seus níveis de energia originais, emitem fótons, que podem ser transformados em pulsos elétricos.

CAPÍTULO II - ISÓTOPOS ESTÁVEIS



Quase todos os elementos possuem diversos isótopos (núcleos com o mesmo número de prótons, porém número diferente de nêutrons), ocorrendo na natureza em diferentes proporções. Alguns são estáveis, outros emitem radiação de tipo, energia e meia-vida bem definidos. Como veremos a seguir, é possível usar a proporção de isótopos estáveis para se determinarem certas características das substâncias e compostos formados por esses elementos.

Isótopos da água

As moléculas de água (H_2O) são principalmente formadas por 1_1H e $^{16}_8O$, mas existem pequenas proporções de moléculas formadas por 2_1H (deutério), $^{17}_8O$ ou $^{18}_8O$. A Tabela II-1 mostra a abundância média dos isótopos estáveis de hidrogênio e de oxigênio. A determinação desses valores médios é feita usando-se água do mar.

Tabela II-1 – Abundância de isótopos estáveis em água do mar

| isótopo de oxigênio | abundância relativa | isótopo de hidrogênio | abundância relativa |
|---------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|
| $^{16}_8O$ | 0,99985 | 1_1H | 0,99757 |
| $^{17}_8O$ | 0,00015 | 2_1H | 0,00038 |
| $^{18}_8O$ | | 3_1H | 0,00205 |

Os valores padrão para as abundâncias relativas de hidrogênio e oxigênio na água do mar são medidos nos laboratórios da IAEA (*International Atomic Energy Agency*, Agência Internacional de Energia Atômica), em Viena, Áustria, usando uma mistura de água dos cinco continentes, e são conhecidos pela sigla VSMOW (do inglês *Vienna Standard Mean Ocean Water*, Padrão Médio de Viena de Água do Oceano).

A proporção de isótopos estáveis δ em uma determinada amostra é dada com relação à proporção na amostra padrão:

$$\delta = \frac{(R_{amostra} - R_{padrão})}{R_{padrão}} \cdot 1000,$$

sendo $R = \frac{[\text{concentração do isótopo pesado}]}{[\text{concentração do isótopo leve}]}$.

A unidade de δ é ‰ (partes por mil).

Por exemplo, se tivermos uma amostra em que $\delta^{18}\text{O} = -10\text{‰}$, isso quer dizer que:

$$\frac{(R_{\text{amostra}} - R_{\text{padrão}})}{R_{\text{padrão}}} \cdot 1000 = -10$$

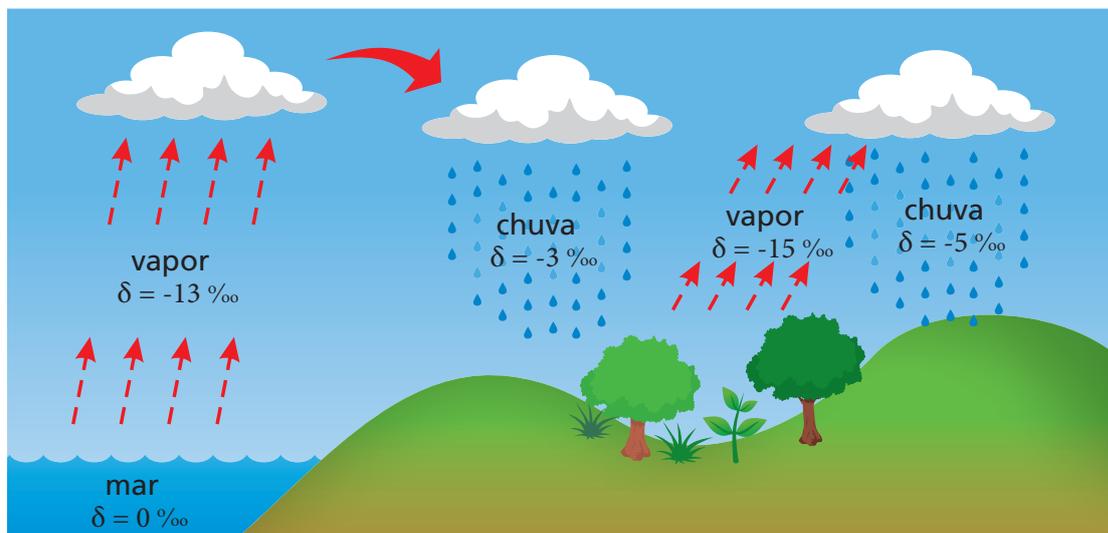
$$R_{\text{amostra}} = 0,99R_{\text{padrão}}$$

ou seja, a razão $\frac{[^{18}\text{O}]}{[^{16}\text{O}]}$ na amostra é 1% menor que essa razão no padrão.

Observa-se que as moléculas contendo isótopos mais leves têm mais probabilidade de evaporar ou de participar de reações químicas, porque as ligações moleculares são mais facilmente quebradas. Pela mesma razão, as moléculas com isótopos mais pesados têm mais probabilidade de permanecer em fases condensadas.

A partir dessas observações, pode-se estudar a variação de δ no trajeto descrito pela água desde a evaporação nos oceanos até a formação de rios e lagos pela chuva. A Figura II-1 dá um exemplo desse trajeto. A mudança da distribuição isotópica durante um processo de vaporização / condensação é chamada **fracionamento de Rayleigh**.

Figura II-1: variação de $\delta^{18}\text{O}$ no ciclo da água



O padrão é dado pela composição isotópica da água do mar, $\delta = 0\text{‰}$. A evaporação prioriza o isótopo mais leve: $\delta_1(\text{vapor}) = -13\text{‰}$. As nuvens se deslocam para o continente, onde o vapor se condensa em chuva e ocorre o inverso: $\delta_1(\text{chuva}) = -3\text{‰}$. Novamente a água se evapora, com $\delta_2(\text{vapor}) = -15\text{‰}$ e as nuvens são carregadas pelo vento para o interior do continente, onde se condensam dando $\delta_2(\text{chuva}) = -5\text{‰}$.

Isótopos estáveis em matéria orgânica

O estudo da origem ou do transporte de matéria orgânica pode ser feito usando-se as razões isotópicas de carbono, nitrogênio ou enxofre, além das de hidrogênio e oxigênio mostradas anteriormente. A Tabela II-2 mostra a razão entre os principais isótopos estáveis desses três elementos.

Tabela II-2 – Abundância relativa de isótopos de carbono, nitrogênio e enxofre

| Isótopo de carbono | Abundância relativa | Isótopo de nitrogênio | Abundância relativa | Isótopo de enxofre | Abundância relativa |
|--------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| $^{12}_6\text{C}$ | 0,9893 | $^{14}_7\text{N}$ | 0,99636 | $^{32}_{16}\text{S}$ | 0,9502 |
| $^{13}_6\text{C}$ | 0,0107 | $^{15}_7\text{N}$ | 0,00364 | $^{34}_{16}\text{S}$ | 0,0421 |

O valores de referência para as abundâncias relativas dos isótopos são medidos pelo laboratório IAEA, em Viena, que fornece as amostras padrão. O padrão para o carbono é medido na belemnita, rocha calcária oriunda de fósseis marinhos, proveniente da formação geológica Pee Dee na Carolina do Norte (EUA), e leva o nome de VPDB (Vienna-Pee Dee Belemnite); o padrão para o nitrogênio é estabelecido usando-se ar atmosférico e leva o nome de AIR; para o enxofre, usa-se o padrão VCDT (Vienna-Canyon Diablo Troilite), medido em meteoritos encontrados na região de Canyon Diablo (EUA).²

Medida das variações isotópicas

Observando as Tabelas II-1 e II-2, verifica-se que, para muitos elementos, a razão entre as concentrações naturais dos diferentes isótopos tem ordens de grandeza de 10^{-3} ou até menos. Por isso, os instrumentos de medida devem ter alta sensibilidade e precisão. Atualmente são usados **espectrômetros de massa** ou de **absorção por laser** no infravermelho.

Espectrômetro de massa

A Figura II-2 mostra o esquema de funcionamento de um espectrômetro de massa (MS, do inglês *Mass Spectrometer*), equipamento usado para se medir a quantidade de átomos com determinada massa.

O material a ser analisado é vaporizado e ionizado, e os íons são acelerados por um campo elétrico, adquirindo uma velocidade \vec{v}_0 . Na figura, o íon mostrado é negativo e sua velocidade é horizontal, para a direita.

O feixe iônico então passa por um filtro de velocidades, onde existe um campo elétrico \vec{E} e um campo magnético \vec{B} . Na figura, \vec{E} é vertical, de cima para baixo, e \vec{B} é perpendicular à página e penetra nela.

Nessa região, cada íon negativo está sujeito a uma força elétrica \vec{F}_E , vertical para cima, e a uma força magnética \vec{F}_B , vertical para baixo. A força elétrica é proporcional à carga q do íon ($F_E = qE$), e a força magnética, à carga e à velocidade v do mesmo ($F_B = qvB$). Por isso é possível regular os valores dos campos para que as forças elétrica e magnética se cancelem para íons com determinada velocidade; esses íons seguirão em linha reta e alcançarão uma abertura no final dessa região.

Depois do filtro de velocidades, os íons alcançam uma região onde existe somente o campo magnético, perpendicular à direção da sua velocidade. Esse campo modifica o deslocamento do feixe iônico, fazendo com que os íons percorram uma trajetória circular, cujo raio depende do valor da massa dos íons. Isso pode ser deduzido se observamos que a força magnética é a força centrípeta que provoca o movimento circular de cada íon:

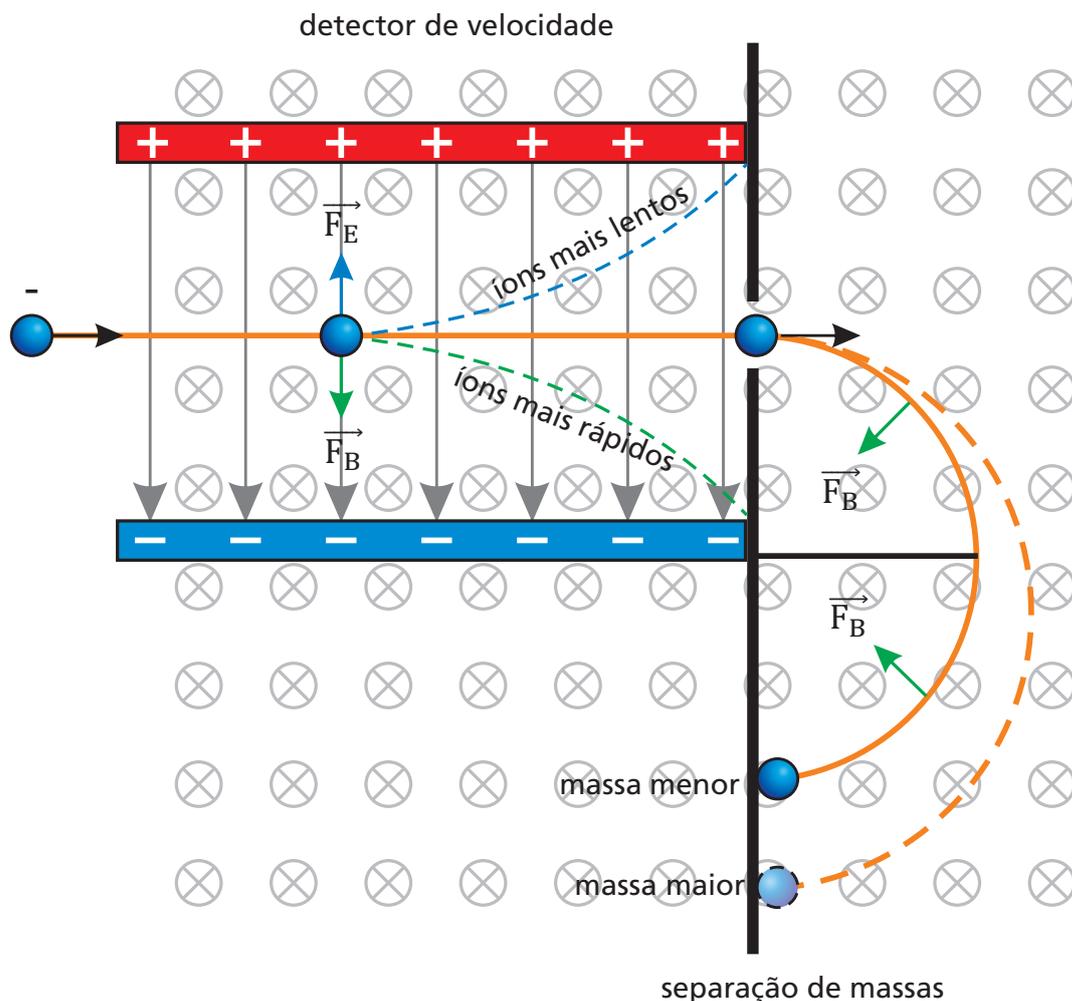
$$\frac{mv^2}{R} = qvB$$

$$R = m \cdot \frac{v}{qB}$$

² Os padrões para as razões isotópicas podem também ser fornecidos por outras organizações internacionais, por exemplo, pelo NIST (*National Institute of Standards and Technology*, Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia, EUA) ou pelo IRMM (*Institute for Reference Materials and Measurements*, Instituto para Materiais e Medidas de Referência, da Comunidade Européia)

Uma placa detectora, colocada ao final da trajetória dos íons, informa a intensidade do feixe para cada valor do raio, ou seja, para cada valor de massa.

Figura II-2: Esquema de um espectrômetro de massas



O espectrômetro de massas tem o inconveniente de ser um equipamento de grande porte e que exige blindagem, para que campos magnéticos externos não interfiram na medida. Além disso, se existirem íons diferentes, porém com a mesma razão carga/massa, eles serão igualmente detectados. No entanto, ele tem a vantagem de que o mesmo equipamento pode ser usado para medir razões isotópicas em diferentes elementos, e é usado para H, C, O, N ou S.

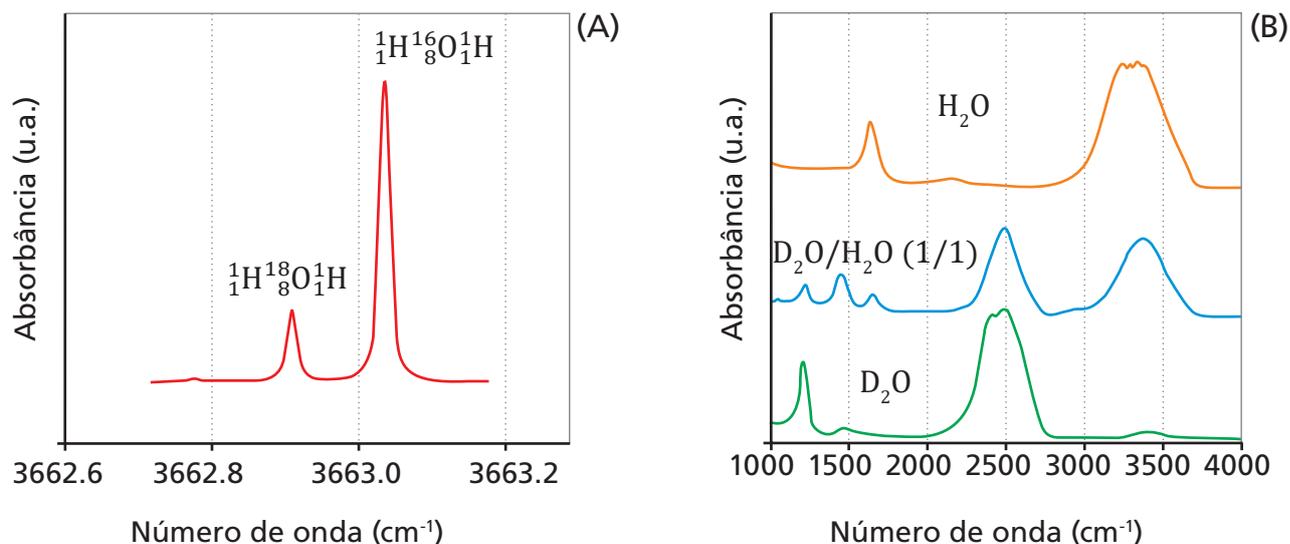
Espectroscopia por absorção de laser

Um outro equipamento desenvolvido recentemente é o espectrômetro por absorção de laser (LAS, do inglês *Laser Absorption Spectrometer*), que se baseia no fato de que, quando iluminadas com laser que emite no infravermelho, as moléculas absorvem as frequências correspondentes às suas vibrações naturais.

As moléculas podem ser comparadas a sistemas massa-mola, onde os átomos seriam as massas e as forças de ligação entre eles seriam as molas. Esses conjuntos podem oscilar por rotação das "massas", compressão ou flexão das "molas", com frequências de vibração características de cada sistema, e que estão na faixa de frequências do infravermelho. Assim, se em uma amostra temos moléculas que diferem pela presença de isótopos do mesmo átomo em algumas delas, as frequências de vibração serão ligeiramente diferentes, e isso pode ser observado no espectro de absorção da amostra.

A Figura II-3 mostra exemplos de espectros de absorção para amostras de água contendo diferentes isótopos. Quanto maior a massa do isótopo, menor a sua frequência de vibração.

Figura II-3: Espectros de absorção no infravermelho de amostras de água



Baseado em: van Trigt, R. : Thesis Rijksuniversiteit Groningen (2001) disponível em: <<https://www.rug.nl/research/portal/files/3035350/thesis.pdf>>. Acesso em jan/2019.

Baseado em: Vanderkooi, J. M. et al. : Biochimica et Biophysica Acta - Proteins and Proteomics, 1749 (2), 214-233 (2005).

No eixo horizontal temos o número de onda, que corresponde ao inverso do comprimento de onda e, portanto, é proporcional à frequência da luz absorvida. No eixo vertical temos a absorvância, em unidades arbitrárias. Em A, a amostra contém ${}^1_1\text{H}^{16}_8\text{O}^1_1\text{H}$ e ${}^1_1\text{H}^{18}_8\text{O}^1_1\text{H}$. Nota-se que o pico de absorção do isótopo de menor massa está numa frequência mais alta (modo rotacional/vibracional). Em B, o espectro de uma amostra composta é comparado ao espectro de uma amostra pura de ${}^1_1\text{H}^{16}_8\text{O}^1_1\text{H}$ e outra de ${}^2_1\text{H}^{16}_8\text{O}^2_1\text{H}$. Da mesma forma que no caso anterior, observa-se que o isótopo de menor massa vibra com frequência maior (modo de estiramento simétrico).³

Os equipamentos LAS são compactos e fáceis de transportar, o que facilita seu uso em pesquisas de campo. Para esse fim, eles são calibrados de forma a calcular automaticamente a razão entre os isótopos desejados. Por isso, são necessários equipamentos diferentes para medidas em H_2O , CO_2 ou N_2O (medidas em H, O ou C). Para as medidas em N ou S, usa-se o espectrômetro de massa.

Aplicações

Isótopos do oxigênio

Informações sobre águas superficiais e subterrâneas

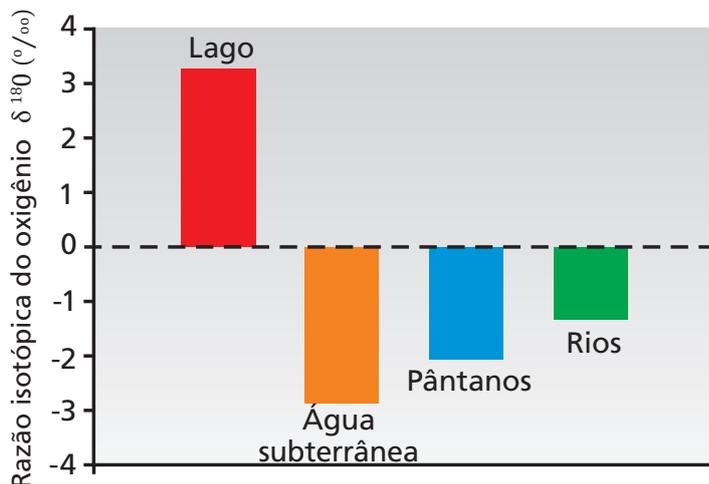
A análise isotópica das águas de rios, lagos e reservas subterrâneas pode informar sobre o movimento dessas águas; essa informação é valiosa para se acompanhar e administrar a obtenção e o uso da água.

Um exemplo interessante está na Figura II-4, que mostra a razão isotópica $\delta^{18}\text{O}$ para o lago Vitória,⁴ na África, assim como para os pântanos, rios e águas subterrâneas no seu entorno. A partir dos dados mostrados, é possível concluir que as águas do lago sofrem evaporação e precipitação, porém o lago não é abastecido pela reserva subterrânea nem pelos rios adjacentes. Além disso, pode-se também concluir que os pântanos são abastecidos pela reserva subterrânea, e não por fluxo lateral das águas do lago.

³ ${}^2_1\text{H}$ (núcleo de hidrogênio com 1 próton e 1 nêutron) é chamado de deutério, para o qual se usa o símbolo D.

⁴ O lago Vitória é um dos grandes lagos africanos localizado entre a Tanzânia, o Quênia e Uganda.

Figura II-4: Razão isotópica $\delta^{18}\text{O}$ para o lago Vitória (África) e para as águas no seu entorno



A razão positiva para o lago indica que ele sofre principalmente evaporação e precipitação e não é abastecido pela reserva subterrânea ou pelos rios, que tem $\delta^{18}\text{O}$ negativo. Os pântanos tem $\delta^{18}\text{O}$ negativo, indicando que são abastecidos pela água subterrânea e não por transbordamento do lago. (Baseado em documento IAEA- Water Resources Program)

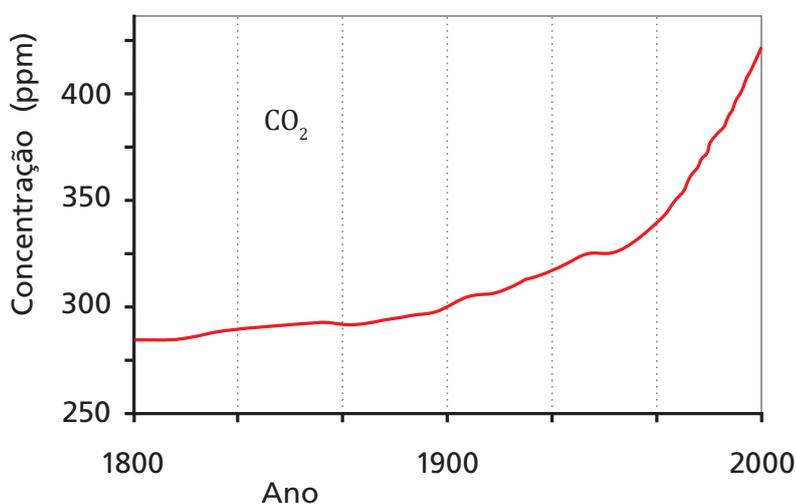
Isótopos do carbono

Origem do carbono na atmosfera

A presença de CO_2 na atmosfera terrestre é principalmente devida à respiração dos seres vivos ou à decomposição de seus restos. Embora a sua concentração seja baixa, esse gás é útil porque provoca um “efeito estufa” benéfico, que impede que parte do calor do Sol absorvido na superfície do globo escape novamente para o espaço. Isso ajuda a manter a temperatura da Terra em níveis convenientes para a manutenção da vida. No entanto, se a concentração de CO_2 na atmosfera aumentar, pode ocorrer retenção excessiva de calor, resultando em desequilíbrio do clima e prejuízo para os seres vivos.

A concentração de gás carbônico na atmosfera terrestre se manteve constante durante um longo período de tempo, em torno de 0,028%. Porém, nos últimos 150 anos, tem-se notado um aumento nessa concentração, que chega hoje a 0,040%, o que significa um aumento de 30% (Figura II-5). Através de medidas da razão isotópica do carbono é possível se estudar a causa desse aumento.

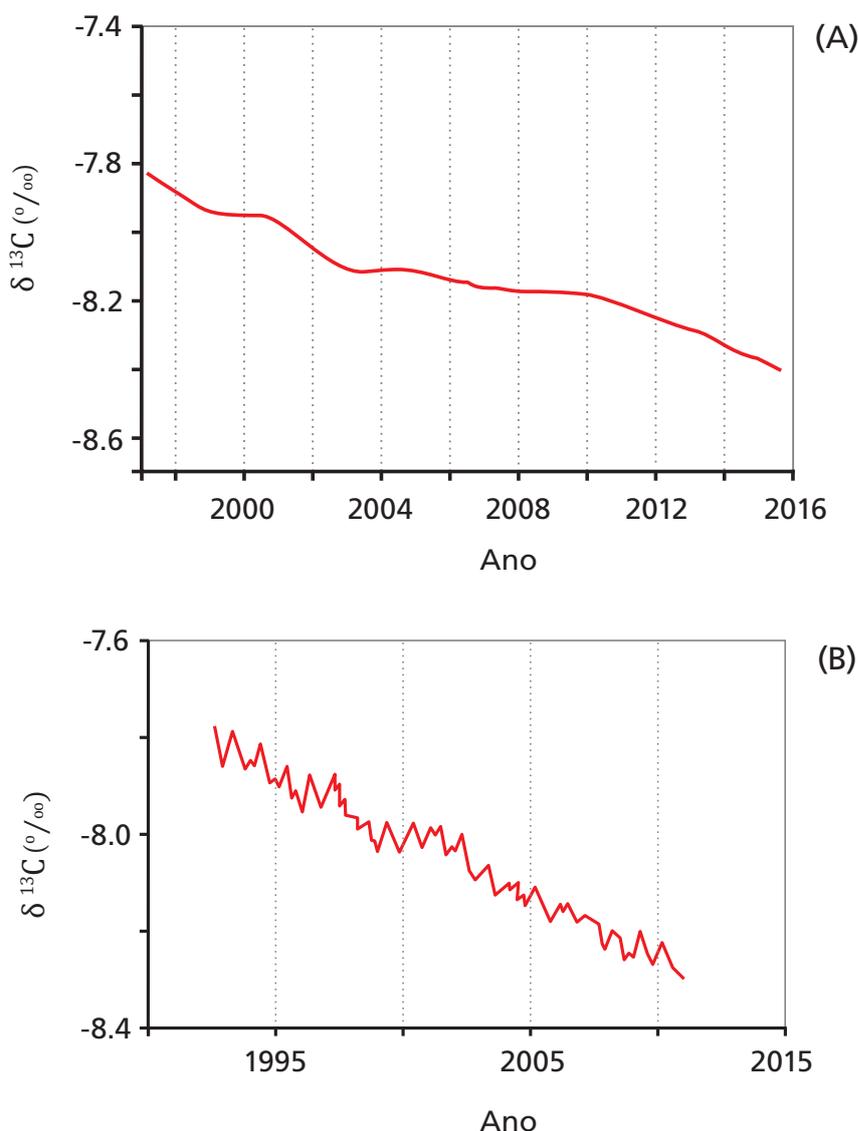
Figura II-5: Variação da concentração de CO_2 na atmosfera terrestre ao longo do tempo



Baseado em dados da EEA (European Environment Agency, Agência Europeia para o Meio Ambiente), disponíveis em: <<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/atmospheric-greenhouse-gas-concentrations-10/assessment>>. Acesso em jan/2019.

Ao lado disso, medidas de $\delta^{13}\text{C}$ na atmosfera, mostradas na figura II-6, indicam que esse valor diminuiu com o tempo, embora tenha aumentado a concentração de CO_2 .⁵ Sabe-se que as plantas absorvem mais facilmente do ar o gás composto por isótopos mais leves. A razão isotópica do carbono nas plantas é, portanto, diferente dessa razão na atmosfera. Com o passar do tempo, as plantas mortas foram soterradas e transformadas em combustíveis fósseis, guardando a mesma proporção isotópica. A queima desse combustível, então, lança na atmosfera CO_2 com uma proporção menor de ^{13}C com relação ao ^{12}C . A diminuição do valor de $\delta^{13}\text{C}$ na atmosfera leva, portanto, à suposição de que o aumento do gás carbônico lançado na atmosfera é devido à queima de combustíveis fósseis, hipótese corroborada pelo fato de que essa tendência tenha sido notada a partir do início da Revolução Industrial.

Figura II-6: Variação da razão isotópica $\delta^{13}\text{C}$ em CO_2 da atmosfera, em função do tempo, medida na Antártida (A) e na Austrália (B)



Baseado em dados do NIWA (*National Institute of Water and Atmospheric Research*, Instituto Nacional de Pesquisas Aquáticas e Atmosféricas, Nova Zelândia), disponíveis em: <<https://www.niwa.co.nz/atmosphere/our-data/trace-gas-plots/carbon-dioxide>>. Acesso em jan/2019.

⁵ Tanto a concentração de CO_2 quanto o valor de $\delta^{13}\text{C}$ em tempos passados podem ser inferidos através de medidas feitas em anéis de troncos de árvores muito antigas, em corais e esponjas oceânicas ou no ar preso em gelo nos polos.

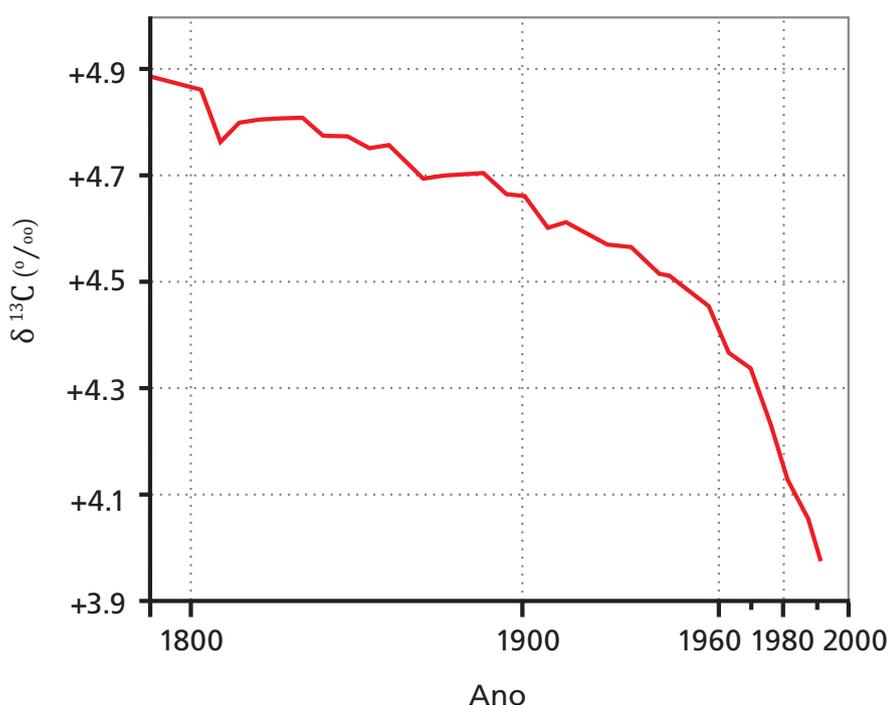
Origem do carbono nos oceanos

Parte do gás carbônico lançado na atmosfera se dissolve nas águas oceânicas ou é absorvido por microalgas, na superfície dos oceanos, e transformado em moléculas orgânicas. Eventualmente o carbono de origem orgânica será depositado no fundo do oceano, sem contato com a atmosfera.

O bombeamento de CO_2 da atmosfera pelos oceanos é útil, para manter estáveis os níveis de gás carbônico na atmosfera, porém o excesso desse gás dissolvido nos oceanos pode provocar a acidificação dos mesmos, trazendo danos à vida marinha.

Atualmente verifica-se um aumento na concentração de CO_2 nos oceanos, e análises isotópicas de carbono em corais e esponjas indicam a diminuição no valor de $\delta^{13}\text{C}$ (Figura II-7), o que pode ser mais uma evidência de que o excesso de gás carbônico é devido à queima de combustíveis fósseis.

Figura II-7: Variação da razão isotópica $\delta^{13}\text{C}$ em CO_2 de esponjas marinhas, em função do tempo, medida na Jamaica



Baseado em dados de F. Böhm et. al. [Earth and Planetary Science Letters 139(1-2), 291 (1996)], disponíveis em: <http://www.realclimate.org/images/bohm_corals_13C.jpg>. Acesso em jan/2019.

Isótopos do nitrogênio e enxofre

As composições isotópicas do nitrogênio e do enxofre podem ser usadas para se determinar a presença de poluição nas águas ou de agrotóxicos e excesso de antibióticos em alimentos de origem animal ou vegetal. Isso é possível porque detergentes, medicamentos e produtos químicos usados na indústria e na agropecuária contêm grande quantidade de nitratos e sulfatos. As reações químicas usadas para a produção dessas substâncias ocorrem de forma diferente para isótopos de massas diferentes, e, portanto, há variação nos valores de $\delta^{15}\text{N}$ e $\delta^{34}\text{S}$.

Medidas isotópicas podem informar se a origem do nitrogênio e do enxofre contidos em águas e alimentos é natural ou devida a poluentes artificiais.

Agradecimentos: agradecemos a colaboração dos pesquisadores L. Araguas-Araguas e Manfred Groening (IAEA) na elaboração deste capítulo.

CAPÍTULO III – APLICAÇÕES DA ENERGIA NUCLEAR NA INDÚSTRIA



Os radioisótopos têm diversas aplicações industriais, por exemplo, nas indústrias químicas e do petróleo ou na mineração. São usadas principalmente três técnicas: radiotraçadores, sistemas de controle nucleônico e técnicas não destrutivas. Neste capítulo serão mostrados alguns exemplos do uso dessas técnicas.

Radiotraçadores

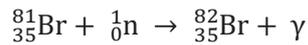
Radiotraçadores são radioisótopos incorporados a um sistema e que podem ser monitorados, indicando o movimento do fluido ou sólido a ser estudado. São muito usados nas indústrias química e petrolífera, e também nos estudos de processos ambientais. Os traçadores radioativos são interessantes porque os detectores são muito sensíveis, podendo-se usar concentrações muito baixas do radioelemento. Na maioria das vezes se tem detectores portáteis e as medidas podem ser feitas no local estudado.

O radiotraçador deve estar numa forma cujas propriedades físicas e químicas sejam semelhantes às do material que se quer rastrear, e ter meia-vida compatível com o tempo de medida: se a meia-vida for muito curta, não será possível preparar, transportar, introduzir o traçador no local do teste e realizar a medida antes que a atividade caia a valores não mensuráveis; se ela for muito longa, restará material radioativo no local, após o fim da análise.

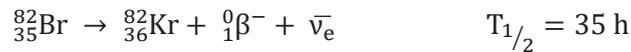
Radiotraçadores na indústria petrolífera

Na indústria petrolífera, os radiotraçadores podem ser usados para a detecção de vazamentos em tubulações, devido a falhas nas conexões ou rachaduras. Como nos campos de petróleo normalmente se injeta água sob alta pressão, para facilitar a extração e transporte do óleo, é comum se usarem radiotraçadores solúveis em água. Estes podem ser sais solúveis, como o KBr contendo bromo-82, ou água tritiada (água onde um ou os dois átomos de hidrogênio foi substituído por trítio).

O ^{82}Br pode ser obtido através do bombardeamento com nêutrons do isótopo estável ^{81}Br :



Por sua vez, o bromo-82 decai por emissão β^- no elemento estável criptônio-82:



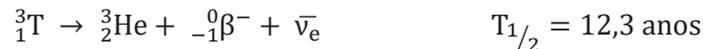
A meia-vida do bromo-82 indica que há tempo suficiente para que a atividade do elemento possa ser observada durante os trabalhos em uma refinaria, por exemplo; ao mesmo tempo, ao final das medidas, o radiotraçador terá decaído e não deixará resíduos radioativos no ambiente.

O trítio (átomo de hidrogênio com 2 nêutrons e um próton) é o único isótopo radioativo do hidrogênio. Embora sua meia-vida (12,3 anos) seja curta, em comparação com a idade da Terra, ele existe na natureza porque é criado na alta atmosfera, através do bombardeamento de nitrogênio por raios cósmicos. Seu comportamento químico é o mesmo do átomo de hidrogênio, e, portanto, tende a se combinar com oxigênio para formar água tritiada, que é também chamada óxido de trítio (THO, TDO ou T_2O).⁶ A concentração de trítio natural é muito baixa (1 átomo de T para 10^{18} átomos de H), mas ele pode ser obtido artificialmente, por exemplo, através da ativação de lítio-6 por nêutrons:



O processo é feito submetendo-se cerâmica contendo lítio ao fluxo de nêutrons de um reator nuclear.

O trítio decai em hélio-3 (estável) com emissão β^- :



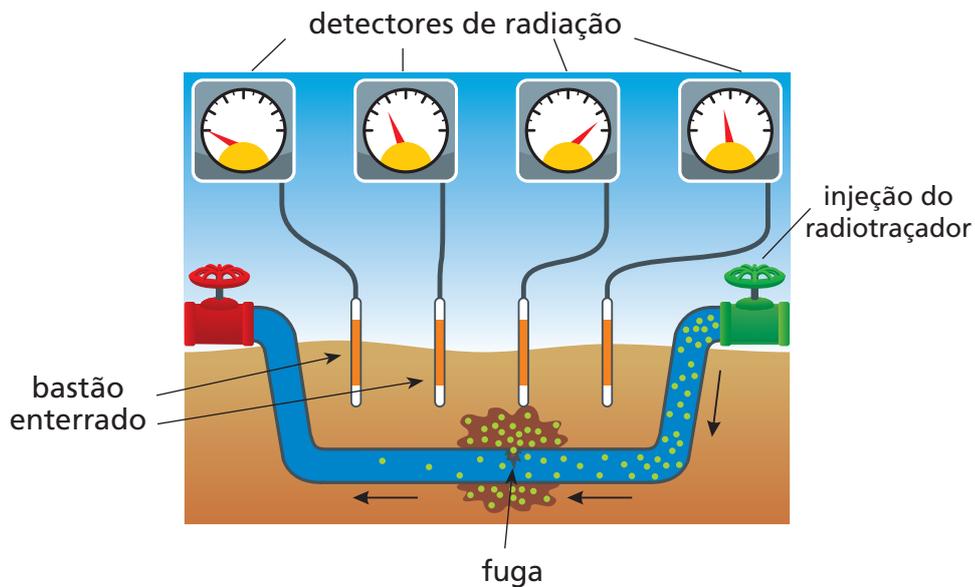
As vantagens de se usar o óxido de trítio como radiotraçador são seu comportamento químico, idêntico ao da água, e o fato de em seu decaimento não haver emissão γ , apenas emissão β^- de baixa energia, que é facilmente blindada. A desvantagem é que a energia da radiação emitida é baixa: ela é de no máximo 18,6 keV, com média de 6 keV. Para sua detecção, é necessário adicionar a amostra de água tritiada a um detector de cintilação, que emite luz fluorescente em resposta à radiação β^- . Esse procedimento precisa ser feito em laboratório.

Embora a meia-vida do trítio seja relativamente longa, em comparação com o tempo das medidas feitas na indústria, o resíduo não é danoso ao ser humano ou ao meio ambiente. Isto é devido ao fato de que a energia da sua emissão é muito baixa, e a radiação é pouco penetrante (ela não penetra, por exemplo, a pele humana). No caso de ingestão, o trítio é rapidamente eliminado do organismo nas moléculas de água, principalmente pelas vias urinárias.

A Figura III-1 ilustra o procedimento para detecção de fugas em tubulação, usando um radiotraçador e detectores enterrados ao longo da tubulação. Na Figura III-2, mostra-se o método de detecção usando uma sonda que se desloca no interior da tubulação.

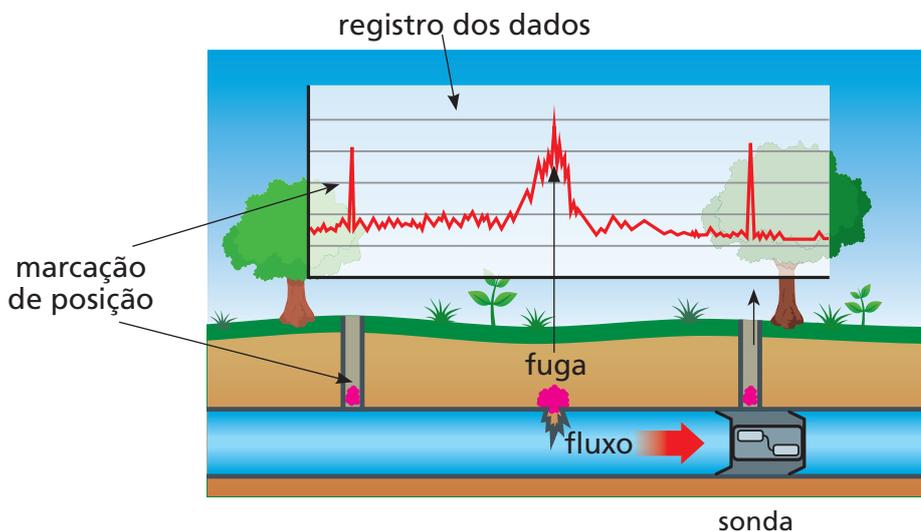
⁶ Usa-se o símbolo T para o trítio (hidrogênio com 2 nêutrons e 1 próton) e D para o deutério (hidrogênio com 1 nêutron e 1 próton).

Figura III-1: Detecção de vazamento em uma tubulação, usando radiotraçador e detectores enterrados



O radioisótopo é injetado em um trecho da tubulação e, após algum tempo, observa-se a leitura em detectores enterrados no trajeto da tubulação. No caso de haver vazamento ou bloqueio na tubulação, o radioisótopo irá se concentrar no local do problema e os detectores situados depois desse local não indicarão a presença de atividade. Baseado em documento disponibilizado por Patrick Brisset (IAEA).

Figura III-2: Detecção de vazamento em uma tubulação, usando radiotraçador e uma sonda

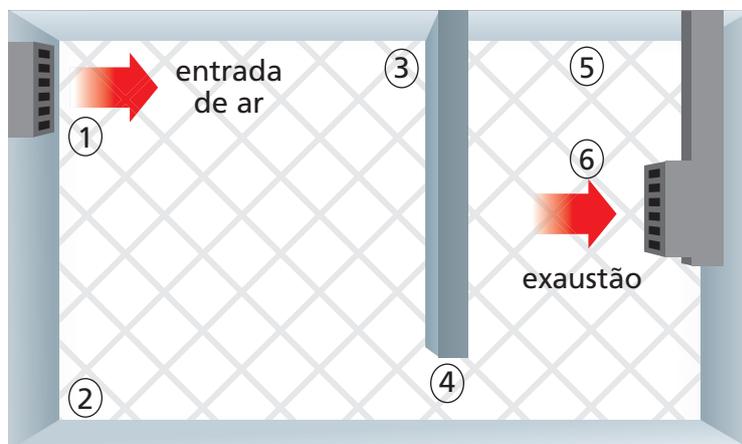


O radioisótopo é injetado na tubulação e espera-se certo tempo, para que ele viaje ao longo da linha, junto com o fluido. No caso de haver vazamento no trajeto, o radioisótopo ficará acumulado na região da fuga. A seguir, a sonda é inserida dentro da tubulação. Enquanto se move junto com o fluido, ela registra a atividade ao longo da tubulação e é recolhida no final do trajeto, para que os dados sejam analisados. A intervalos regulares, são enterradas fontes para marcação das distâncias. Baseado em documento disponibilizado por Patrick Brisset (IAEA).

Fluxos gasosos

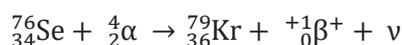
O estudo de fluxos gasosos é importante na indústria petrolífera, em tubulações de transporte de gases, ou na indústria química, em colunas de fracionamento catalítico ou em ambientes com exaustão e fluxo de ar controlado (Figura III-3).

Figura III-3: Uso de radiotraçador para monitoramento do fluxo de ar em um ambiente industrial



O traçador é inserido através da entrada de ar e sua atividade é medida em diferentes pontos da sala, com os medidores 1 a 6; posteriormente, ele é eliminado junto com a exaustão de ar. Baseado em documento IAEA disponível em: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS423_web.pdf> (pg. 141). Acesso em jan/2019.

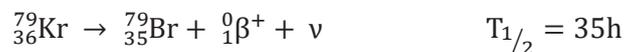
Um exemplo de radiotraçador gasoso é o criptônio-79, gás nobre que pode ser obtido por bombardeamento α de selênio-76:



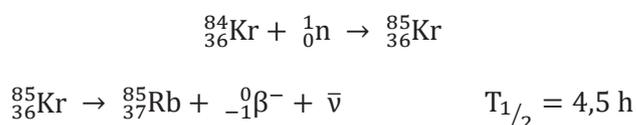
Outra forma de obtenção é através do bombardeamento de bromo-79 com prótons, a partir de uma solução aquosa de brometo de sódio (NaBr):



O criptônio-79 decai em bromo-79 com emissão β^+ :



Para a produção dos isótopos acima é preciso usar aceleradores de partículas carregadas. Outra rota para a produção do radiocriptônio é a irradiação por nêutrons do criptônio-84 em reator nuclear, obtendo-se o criptônio-85 ($T_{1/2} = 4,5\text{ h}$), mais adequado para estudos de ventilação. O isótopo estável ${}^{84}\text{Kr}$ é o mais abundante dos sete isótopos naturais do criptônio (abundância isotópica $\sim 57\%$) e as irradiações em reatores são frequentemente mais práticas do que em aceleradores. As reações de produção e de decaimento do criptônio-85 são:



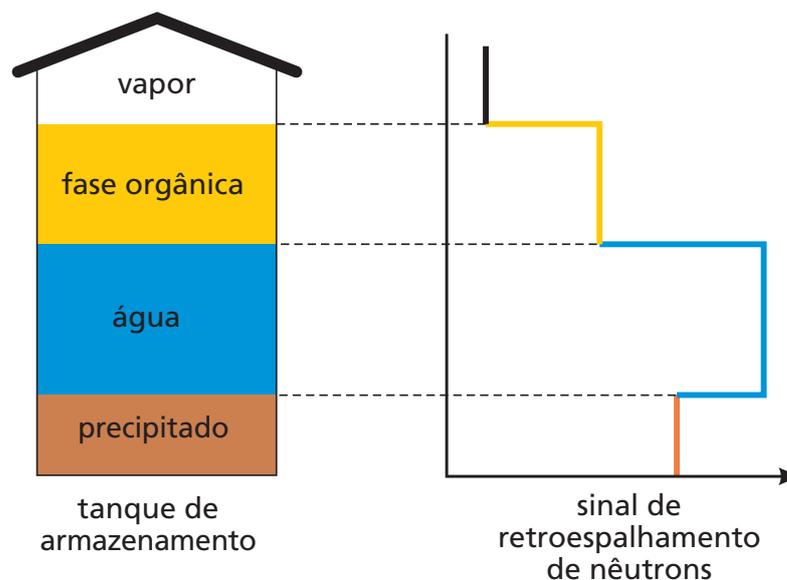
Sistemas nucleônicos de controle

Os sistemas nucleônicos de controle (NCS, do inglês *Nucleonic Control Systems*) são sistemas onde radiação ionizante (α , β , γ , X ou n) incide sobre o material a ser analisado, e se obtém informação sobre o material através da interação entre ele e a radiação, usando-se detectores apropriados. Dessa forma se podem controlar propriedades físicas do material: densidade, massa, composição química, teor de umidade etc. Entre os NCS destacam-se a moderação e o retroespalhamento de nêutrons, a análise de ativação por nêutrons de raios γ imediatos (γ pronto), análise por transmissão dual de emissão γ , retroespalhamento, tomografia e varredura γ .

Retroespalhamento de nêutrons

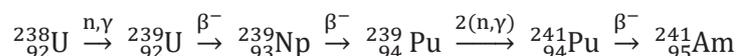
Nesta técnica, um feixe de nêutrons rápidos incide sobre o material a ser analisado. Ao colidir com núcleos de hidrogênio do material, os nêutrons perdem energia (são moderados); choques diretos fazem com que alguns nêutrons sejam refletidos de volta e percam parte de sua energia. Um detector de nêutrons lentos é colocado ao lado da fonte e registra a intensidade de nêutrons retroespalhados, que é proporcional à densidade de átomos de hidrogênio no material. Deslocando-se a fonte e o detector ao longo do recipiente, podem-se conhecer, por exemplo, os níveis de líquidos e/ou gases em colunas, a separação de fases, presença de precipitação ou impurezas etc. A técnica pode ser usada externamente, em recipientes fechados, sem interromper o processamento do material. A Figura III- 4 ilustra o uso do retroespalhamento de nêutrons em um tanque de petróleo para se conhecer o conteúdo interno do mesmo.

Figura III-4: Medida por retroespalhamento de nêutrons em um tanque de petróleo



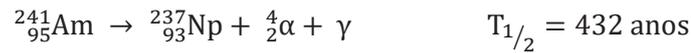
Cada fase do material pode ser reconhecida pela intensidade de nêutrons retroespalhados, que é proporcional à densidade de átomos de hidrogênio presentes naquela fase. Baseado em documento IAEA disponível em: <<https://gnssn.iaea.org/RTWS/general/Shared%20Documents/Radiation%20Protection/CS%20on%20Radiotracers,%202024%20February%202017/Review%20paper%20Radioisotope%20applications.Rev%20PB%2013%20sept%202013.pdf>>. Acesso em jan/2019.

A fonte de nêutrons geralmente usada nesta técnica é composta por uma pastilha de óxido de amerício-241, prensado com berílio-9 metálico. O amerício é um elemento transurânico⁷ que pode ser obtido em reator, bombardeando urânio-238 com nêutrons, o que provoca uma série de emissões γ e β^- :

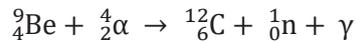


⁷ Elementos transurânicos são elementos que possuem números atômicos maiores que o do urânio. São instáveis e não existem na natureza, podendo ser obtidos artificialmente em laboratório.

O amerício-241 decai com emissão α :



O berílio absorve a partícula α e se transforma em carbono-12, emitindo um nêutron rápido:



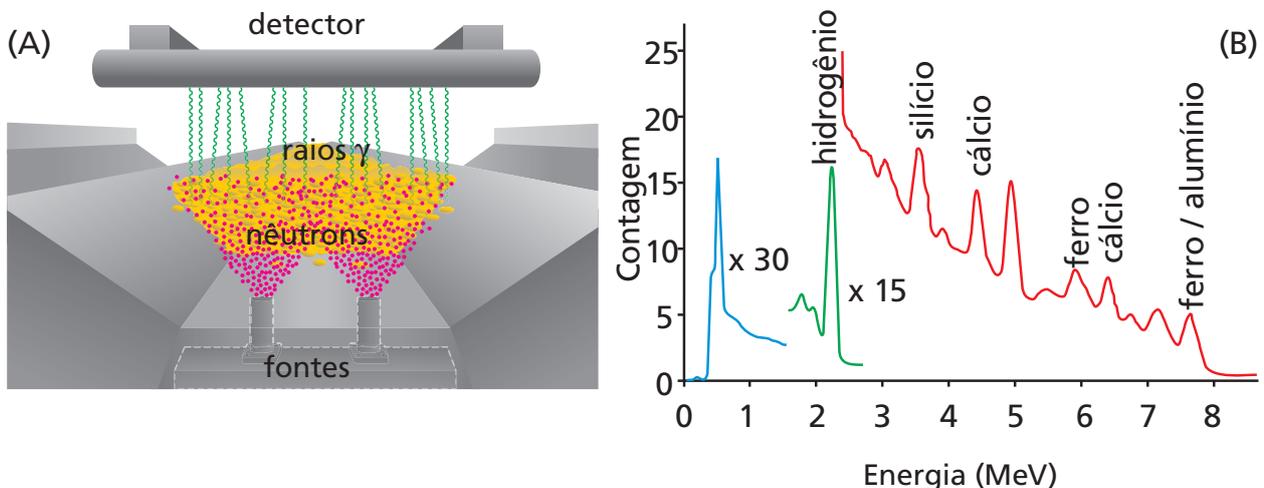
A energia dos nêutrons emitidos é da ordem de 4 MeV.

PGNAA

A PGNAA (do inglês *Prompt Gamma Neutron Activation Analysis*, análise de raios γ imediatos por ativação de nêutrons) é uma técnica usada, por exemplo, na mineração ou na indústria de cimento, para análise de material enquanto é transportado em esteiras (Figura III-5A).

Fontes de nêutrons térmicos⁸ são colocadas abaixo da esteira transportadora. Ao incidir sobre o material, os nêutrons são absorvidos pelos núcleos, que são excitados e decaem para seu estado fundamental emitindo raios γ . Cada elemento presente no material a ser analisado tem emissão γ com energia bem definida, e a intensidade da emissão é proporcional à quantidade do elemento; detectores γ colocados acima da esteira indicam, então, a presença e a quantidade de cada componente (Figura III-5B). Nêutrons são muito penetrantes, o que permite analisar toda a espessura do material na esteira.

Figura III-5: Análise de raios γ imediatos por ativação de nêutrons (PGNAA)

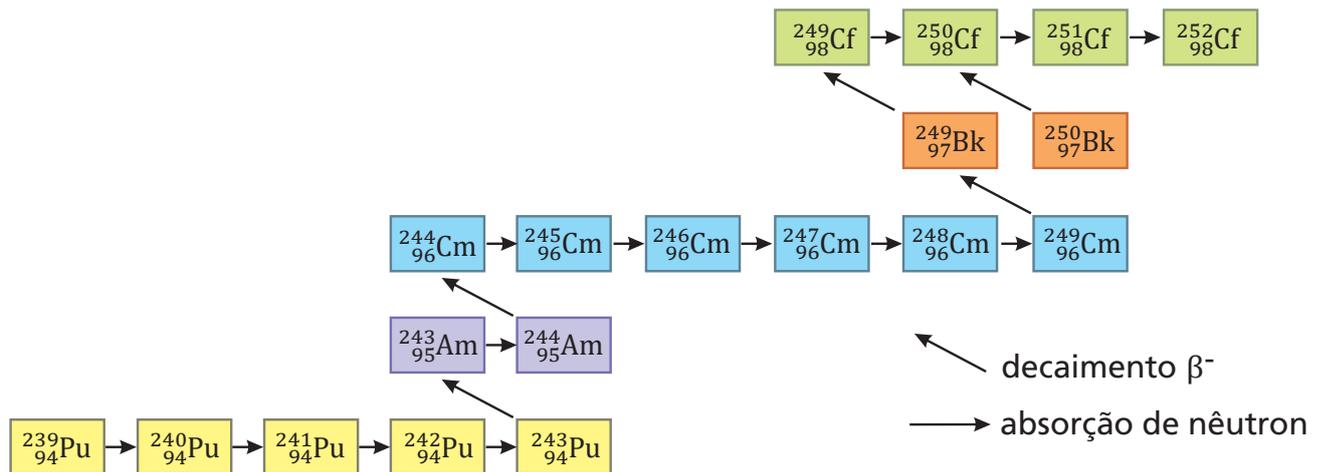


A: Esquema do equipamento. B: Espectro de energias na análise de cimento. Baseado em documento Thermofisher Scientific, disponível em: <<https://www.thermofisher.com/br/en/home/industrial/cement-coal-minerals/cement-coal-minerals-learning-center/cement-analysis-production-information/pgnaa-pftna-technology.html>>. Acesso em jan/2019.

A fonte de nêutrons usada na PGNAA é o califórnio-252. O califórnio é um elemento transurânico que pode ser obtido a partir do plutônio, em um reator nuclear, através de uma sequência de absorções de nêutrons e decaimentos β^- (Figura III-6).

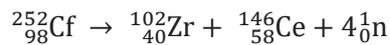
⁸ Nêutrons térmicos são nêutrons em equilíbrio térmico com o meio em que se encontram ou seja, que têm energias da ordem de $\frac{3}{2}KT$ (cerca de 0.04 eV ou 6×10^{-21} J)

Figura III- 6: Obtenção do Cf-252 a partir do Pu-239, por meio de uma sequência de absorções de nêutrons e decaimentos β^-



A sequência de eventos é muito longa, o que explica a enorme perda de material durante o processo de obtenção. Essa dificuldade na obtenção e manuseio do material faz com que ele seja extremamente caro, cerca de US\$30×10⁶ a grama. Porém, sendo um forte emissor de nêutrons, a quantidade usada em equipamentos de medida é da ordem de microgramas (μg).

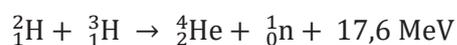
O califórnio é instável e decai por emissão de partículas α ou por fissão; no último caso, há a geração de grande quantidade de nêutrons, como no exemplo abaixo:



Os nêutrons gerados têm alta energia (em média, 0,7 MeV, podendo chegar a até 2,6 MeV) e devem ser termalizados antes de incidir sobre o material a ser analisado. Para isso, o radioelemento é encapsulado com material composto de grande quantidade de átomos de hidrogênio (cerâmicas ou polímeros).

Outra fonte de nêutrons usada na PGNAA é o amerício-241, já descrito neste capítulo.

É também possível obter nêutrons através da fusão de deutério e trítio, formando hélio e liberando nêutrons:



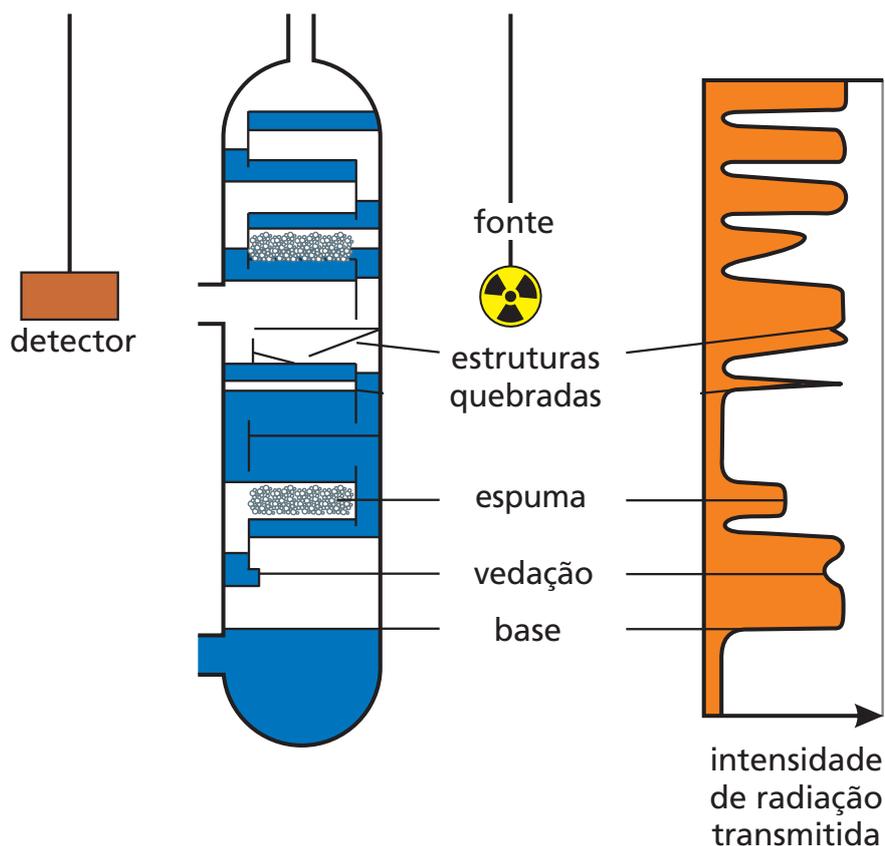
Como os nêutrons usados na PGNAA são os térmicos, é preciso moderar estas formidáveis energias de um fator da ordem de 10⁹ vezes. Isto se faz introduzindo materiais especiais constituídos de átomos leves (p.ex. parafina) entre a fonte e o material a ser analisado.

Para que ocorram as reações de fusão, é necessário um acelerador que forneça aos núcleos energia suficiente para vencer a repulsão eletrostática entre eles. Geradores de nêutrons baseados na fusão D-T já estão sendo comercializados e proporcionarão uma fonte de nêutrons muito mais acessível e de custo mais baixo que os reatores nucleares.

Varredura γ

A atenuação dos raios γ depende da densidade e da espessura do material que eles atravessam. Por isso, é possível se obter informação sobre o interior de um recipiente fechado, usando-se fontes γ e detectores apropriados. No caso da varredura γ , a fonte é colocada de um lado do recipiente, e o detector, do lado oposto; eles se deslocam em conjunto, permitindo uma varredura de todo o recipiente (Figura III-7). Essa técnica é útil para se conhecer o nível das diversas fases presentes no interior de uma coluna de destilação, bem como defeitos na sua estrutura interna. As fontes mais comumente usadas são o ^{137}Cs ou ^{60}Co ; e como detectores usam-se cintiladores de NaI(Tl).

Figura III-7: Perfil de uma coluna da indústria petrolífera, feito através de varredura γ



A fonte γ é colocada em um lado da coluna, e o detector, no lado oposto. Como a intensidade γ transmitida depende da densidade do material atravessado, é possível mapear a estrutura interna da coluna e a presença de líquido ou espuma. Baseado em A. Jaafar, Hydrocarbon Asia jan/feb, 62-65 (2005) disponível em: <<http://scanningtech.com/PDF/article3.pdf>>. Acesso em jan/2019.

Análise por transmissão dual de emissão γ

Muitas vezes se quer conhecer a forma de um objeto ou estrutura inseridos em um recipiente, porém o perfil obtido fica comprometido, porque as diversas fases presentes têm índices de atenuação da radiação muito próximos, o que dificulta o estabelecimento de fronteiras nítidas entre as fases. Esse problema pode ser contornado usando-se duas emissões γ de energias diferentes.

O perfil de atenuação de cada material é dependente da energia da radiação; combinando-se os resultados obtidos com radiação de energias diferentes, é possível se obter informação mais precisa sobre o interior do recipiente.

A transmissão dual também é útil para análise de produtos de mineração transportados por esteira, em que a espessura do material transportado pode dificultar a transmissão da radiação através de componentes de maior densidade.

Testes não destrutivos

Os testes não destrutivos (NDT, do inglês *Non Destructive Testing*) são aqueles que não alteram o material analisado e geralmente usam a absorção de radiação eletromagnética ou de som para obter informação sobre o interior de um recipiente. NDTs radiográficos incluem a obtenção de imagens através de raios γ , raios-X e, mais raramente, feixes de nêutrons. Recentemente, a análise de feixes de múons vindos do espaço tem sido usada para o estudo de grandes estruturas.

Radiografias e gamagrafias

Após a passagem através de um material, os raios-X e raios γ são atenuados de forma proporcional à densidade e à espessura desse material. Medindo-se a intensidade da radiação que atravessou um objeto, é possível transformar a informação obtida em imagens que ilustram o interior dos objetos. Essa técnica é amplamente usada na medicina, no controle de bagagem em aeroportos, na verificação da estrutura interna de recipientes, máquinas industriais, esculturas, objetos antigos etc (Figura III-8). A geração de raios-X exige equipamentos fixos e de grande volume, além de uma fonte de energia elétrica; nas situações em que é necessário deslocar a fonte emissora, pode ser mais conveniente usar fontes γ , geralmente cobalto-60 ou césio-137. Além disso, os raios γ são mais energéticos e, portanto, mais penetrantes que os raios-X, fornecendo mais informação quando se tem objetos muito espessos.

Figura III-8: Gamagrafia da engrenagem do motor de uma turbina, mostrando falha em seu interior

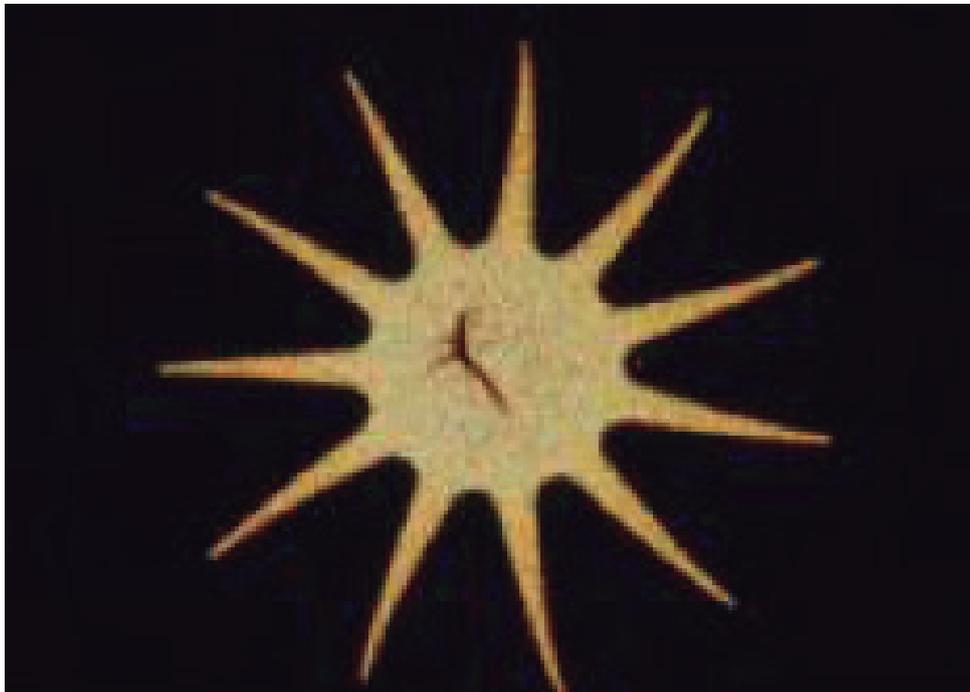


Foto: Commissariat à l'Énergie Nucléaire – CEA-CADAM (França)

Fonte: <http://www.radioactivity.eu.com/site/pages/Non_Destructive_Testing.htm>. Acesso em jan/2019.

Na radiografia e na gamagrafia, a detecção é feita por detectores cintiladores e os dados são processados em computador para fornecer uma imagem do objeto.⁹

Na tomografia, imagens feitas em diferentes ângulos e alturas podem ser agrupadas para se ter uma ideia tridimensional do objeto.

Outros usos da radiação ionizante

Além dos exemplos já citados, a cada dia surgem novas propostas de aplicação da energia nuclear na indústria, assim como em outras áreas. Através de irradiação γ , por exemplo, é possível se obter a cura de materiais poliméricos devido a alterações em sua estrutura (aparecimento de ligações entre as cadeias poliméricas).

Agradecimentos: agradecemos a colaboração dos pesquisadores Rubens Martins Moreira e Jefferson Vianna Bandeira (CNEN, Brasil), João Alberto Osso Júnior, Patrick Brisset e Sabharwal Sunil (IAEA) na elaboração deste capítulo.

⁹ Antes do desenvolvimento dos métodos computacionais, a detecção de raios-X ou γ era feita usando-se filmes fotográficos, sensíveis à radiação. Hoje, esses filmes são ainda usados em situações especiais.

CAPÍTULO IV - ESTUDOS AMBIENTAIS



As regiões costeiras ou as margens de cursos d'água são preferencialmente escolhidas para habitação pelas populações do mundo inteiro. O ambiente nesses locais é modificado, seja por eventos climáticos, seja pela ação humana, alterando o fluxo natural de sedimentos e podendo provocar assoreamento ou erosão.

O estudo do transporte de sedimentos em meio aquoso é importante na construção e manutenção de portos e barragens, onde é preciso se conhecer se a água transporta sedimentos ou se eles são acumulados em locais determinados. Esse estudo também indica possíveis alterações no meio ambiente costeiro e aquático, sendo importante para a sua proteção.

Uma das formas de se estudar a movimentação de água e sedimentos em portos, represas ou cursos d'água é usando-se radiotraçadores, adicionados a amostras retiradas do local, e que são em seguida lançadas na região em estudo e monitoradas, enquanto o material marcado se desloca. Dependendo do estudo a ser feito, marca-se a lama em suspensão aquosa, o próprio efluente líquido ou o material que se sedimenta no assoalho do corpo d'água. As medidas de radiação são muito sensíveis e por isso se podem usar quantidades mínimas de radiotraçadores.

Em alguns estudos se propõe a marcação do sedimento com elementos não radioativos; mais tarde, são recolhidas amostras na vizinhança do local do despejo e, por meio de técnicas nucleares, se verifica a presença do elemento marcador e sua quantidade.

Outra possibilidade é o uso de fontes seladas, emissoras de radiação que será absorvida ou espalhada pelos sedimentos, indicando suas características; as análises são não destrutivas e não interferem com o fluxo natural dos sedimentos.

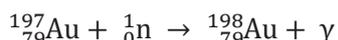
Os estudos ambientais também podem se valer das vantagens das técnicas nucleares através da observação do movimento de radioisótopos naturais ou de origem antrópica.

Radiotraçadores

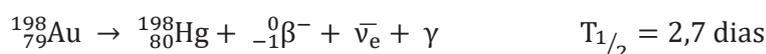
Uso do ouro como radiotraçador

Para estudos de erosão de terrenos e movimentação de sedimentos no oceano, em canais de portos ou em cursos d'água, pode-se marcar argila ou areia fina com ouro-198, elemento radioativo com meia-vida relativamente curta (2,7 dias). As partículas de uma amostra do sedimento são previamente tratadas com uma solução de ouro estável, na forma de ácido áurico, e o elemento ouro fica adsorvido nas suas superfícies. Em seguida, a amostra é irradiada, obtendo-se um radiotraçador com propriedades iguais às do sedimento a ser traçado. Quanto mais finas as partículas, maior a relação entre sua superfície e seu volume e, portanto, mais eficiente é a marcação de ouro. O material marcado é espalhado em pequenas proporções (da ordem de partes por bilhão) sobre a superfície a ser estudada e posteriormente rastreado usando-se detectores apropriados.

O ^{198}Au é obtido através do bombardeamento com nêutrons de ^{197}Au metálico:



O ^{198}Au decai em ^{198}Hg , que é estável:



A radiação β é facilmente blindada pelo material no entorno; a radiação γ mais abundante emitida no decaimento do ^{198}Au tem energia de 0,4 MeV.

A Figura IV-1 mostra um exemplo do uso de radiotraçadores para se estudar o transporte de sedimentos no leito oceânico.

Figura IV-1: Aquisição de dados sobre o transporte de sedimentos no leito do oceano



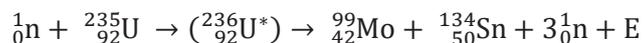
Após a inserção do radiotraçador na região em estudo, um detector é colocado no fundo do oceano e puxado por um barco; ao atingir a região onde está depositado o radiotraçador, os dados são enviados ao barco. A localização da região ativa é determinada por GPS. Baseado em documento IAEA, disponível em: <<https://gnssn.iaea.org/RTWS/general/Shared%20Documents/Radiation%20Protection/CS%20on%20Radiotracers,%2020-24%20February%202017/Review%20paper%20Radioisotope%20applications.Rev%20PB%2013%20sept%202013.pdf>>. Acesso em jan/2019.

A desvantagem no uso do ouro-198 como marcador é que a sua produção deve ser feita em reator nuclear, que nem sempre existe nas proximidades do local de utilização do traçador. Além disso, a energia de sua emissão γ é relativamente alta (400 keV) e exige cuidados no transporte e manuseio do material.

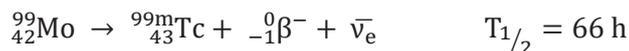
Quando a movimentação do sedimento é muito lenta, usam-se traçadores com meia-vida mais longa, por exemplo, cromo-51 ($T_{1/2} = 27$ dias) ou irídio-192 ($T_{1/2} = 73$ dias).

O tecnécio-99m usado como radiotraçador

Uma alternativa proposta para a marcação de sedimentos finos é a utilização de tecnécio-99m. Este elemento é comumente usado em exames radiológicos.¹⁰ Ele é obtido no decaimento do molibdênio-99, produto de fissão do urânio-235, que pode ser separado quimicamente de outros produtos de fissão:



O ${}^{99}\text{Mo}$ decai em ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ com meia-vida de 66 horas e pode ser transportado até o local de utilização, onde é feita a extração do tecnécio a partir da mistura Mo/Tc:



O ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ decai em ${}^{99}\text{Tc}$ com meia-vida de 6 horas, através da emissão γ com energia de 140 keV:¹¹



Como a meia-vida do molibdênio-99 é 10 vezes maior que a do tecnécio-99m, é possível se obter tecnécio para diagnósticos médicos até uma semana após o recebimento do molibdênio; após esse prazo, ele ainda será útil como traçador ambiental, pois a atividade do ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ requerida nesse caso é muito inferior à necessária para exames médicos (da ordem de 10^{-7} vezes). Isso se deve ao fato de que, nos estudos ambientais, a medida de atividade é feita com o medidor imerso na amostra (o radiotraçador ocupa todo o espaço em torno do medidor) enquanto que, nos diagnósticos médicos, a medida é feita fora do organismo emissor, e, portanto, é pontual. É possível, então, utilizarem-se fontes de ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ que não são mais úteis em clínicas médicas para o uso como radiotraçadores ambientais.

O tecnécio-99 decai em rutênio-99 por emissão β^- , com meia-vida bastante longa (211.000 anos) e, portanto, atividade muito baixa, que não trará danos ao meio ambiente:



Depois de feita a separação da mistura Mo/Tc, o tecnécio, na forma de $\text{TcO}(\text{OH})_2$ é adsorvido em uma amostra do sedimento a ser estudado.

Um exemplo da utilização do tecnécio-99m como marcador de sedimentos é o estudo feito na Lagoa da Pampulha, em Belo Horizonte, Brasil. A chamada Lagoa da Pampulha é, na realidade, uma represa, construída nos anos 1950, com o objetivo de controle de inundações, abastecimento de água e formação de uma área de lazer para a cidade. Em torno do corpo d'água foram construídos jardins e equipamentos urbanos projetados por arquitetos, paisagistas e urbanistas de renome, e hoje a área é classificada como Patrimônio da Humanidade pela Unesco. Porém a represa enfrenta problemas de assoreamento, pois o sedimento trazido pelos cursos d'água que a alimentam se depositam no fundo do espelho

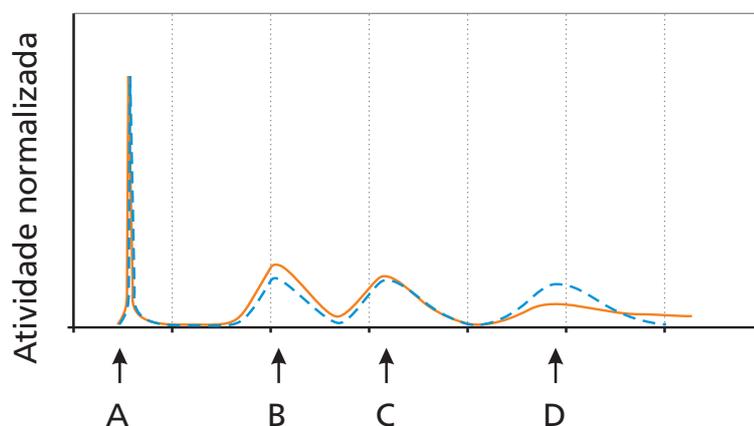
¹⁰ A produção do tecnécio-99m e sua utilização na Medicina são descritas em: R. P. de Carvalho e S. M. Velasques de Oliveira, "Aplicações da Energia Nuclear na Saúde", SBPC-IAEA (2017). Disponível em: <http://portal.sbpcnet.org.br/livro/energianuclearna_saude.pdf>. Acesso em jan/2019.

¹¹ A energia da emissão γ do tecnécio-99m é 3 vezes menor que a do ouro-198 e, portanto, são exigidos menos cuidados no manuseio e transporte do material.

d'água, não sendo levados pelos componentes da bacia hidrográfica. Seria necessário, então, dragar o fundo da lagoa e transportar os sedimentos para outra área. Como a região no entorno da represa é hoje completamente urbanizada, não há espaço disponível para o depósito dos sedimentos. Uma solução proposta é de depositá-los na saída da represa, para que sejam levados pelos cursos d'água. Esse seria o trajeto dos sedimentos, caso a represa não existisse; eles são necessários para se manter o ecossistema da bacia hidrográfica, pois carregam compostos orgânicos necessários à manutenção da vida aquática.

Foi então feito um estudo para se determinar se os sedimentos depositados na saída da barragem seriam transportados pelos cursos d'água. O traçador usado para os sedimentos foi o tecnécio-99m, enquanto que a água foi marcada com Rodamina WT (do inglês *Water Tracer*, traçador de água). A Rodamina é completamente solúvel em água e é fluorescente, podendo ser facilmente rastreada. A Figura IV-2 mostra resultados desse estudo.

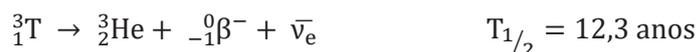
Figura IV-2: Estudo do transporte de sedimentos a partir da saída de uma represa localizada em Belo Horizonte, Brasil



No ponto A, foram injetados simultaneamente Rodamina (curva azul, pontilhada) e Tc-99m absorvido em sedimento (curva laranja, contínua). Em cada um dos pontos B, C e D, notou-se a passagem de água e sedimento marcados ao mesmo tempo. A coincidência na altura e forma das curvas mostra que o sedimento e a água se deslocam de forma semelhante. A mudança na forma das curvas indica a dispersão do material no curso d'água; o ponto D está localizado após uma zona morta, onde o sedimento foi dispersado e levou mais tempo para passar, o que modificou a forma da curva. Baseado em: J.V.Bandeira, Tese de Doutorado – Escola de Engenharia da UFMG (2004). Disponível em: <http://www.repositorio.cdn.br:8080/bitstream/123456789/927/1/Tese_JeffersonV_Bandeira.pdf>. Acesso em jan/2019.

Trítio como radiotraçador em aterros sanitários

O trítio (isótopo do hidrogênio contendo 1 próton e 2 nêutrons) pode ser usado como radiotraçador em estudos de processos ambientais.¹² Ele decai em hélio-3 (estável) com emissão β^- :



A energia da radiação β^- emitida é baixa (média de 6 keV) e para sua detecção é necessário usar um detector de cintilação líquida, que emite luz em resposta à radiação.

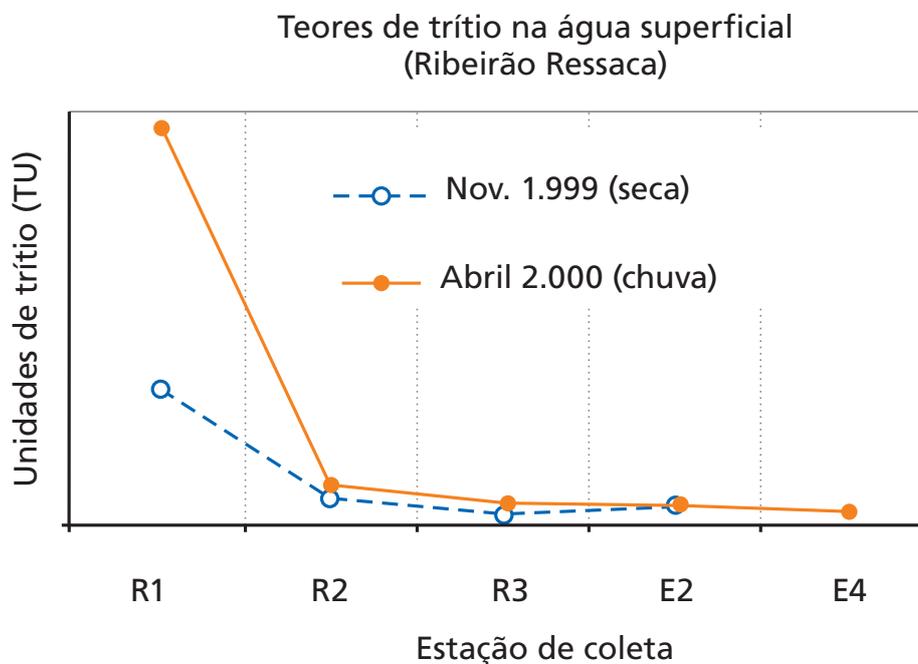
Observou-se que a concentração de trítio em chorume (líquido oriundo de aterros sanitários) é da ordem de 10^4 a 10^5 vezes a sua concentração em água de chuva. A razão da

¹² O uso do trítio como radiotraçador na indústria petrolífera foi descrito no Capítulo III: Aplicações da Energia Nuclear na Indústria.

alta concentração tem sido atribuída ao descarte nos aterros de mostradores de relógio, placas de sinalização ou de interruptores elétricos luminescentes.¹³ O chorume é danoso ao meio ambiente, pois contém microorganismos, alta concentração de metais e outros poluentes, podendo contaminar os lençóis freáticos. Assim, é importante se rastrear sua rota, sendo a alta concentração de trítio um indicador da presença de chorume.

A Figura IV-3 mostra um exemplo do uso de trítio como radiotraçador do chorume proveniente de um aterro sanitário.

Figura IV-3: Medida do teor de trítio na vizinhança de um aterro sanitário



R1: ponto de coleta no aterro sanitário; R2, R3, R4: pontos de coleta no curso d'água. A diminuição da atividade do trítio indica que o chorume foi diluído no curso d'água, porém, continua a ser transportado, provocando poluição. Baseado em: J. V. Bandeira, tese de Doutorado – Escola de Engenharia da UFMG (2004). Disponível em: <http://www.repositorio.cdtm.br:8080/bitstream/123456789/927/1/Tese_JeffersonV_Bandeira.pdf>. Acesso em jan/2019.

Traçadores ativáveis

Para a análise da movimentação de sedimentos a longo prazo, podem-se marcar amostras do sedimento com elementos estáveis, não presentes na região antes do estudo. Os sedimentos marcados são lançados em diversas posições, sendo que para cada posição se usa um marcador diferente. A intervalos de tempo determinados pela dinâmica do processo na área, recolhem-se amostras nos pontos a ser estudados. Elas são analisadas por ativação neutrônica, para se determinar a presença e quantidade dos traçadores em cada uma. Assim, pode-se saber a direção e velocidade do deslocamento do sedimento.

Na análise por ativação neutrônica, a amostra é submetida a um fluxo de nêutrons, em um reator de pesquisa. Os nêutrons são absorvidos pelos núcleos dos diversos elementos da amostra, que emitem radiação γ . A energia dessa radiação tem valores característicos de cada elemento e sua intensidade é proporcional à quantidade de núcleos ativados. Assim, pode-se reconhecer a presença do elemento e sua concentração na amostra.¹⁴

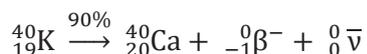
¹³ A razão para o uso do trítio nesses equipamentos é que sua emissão β pode ser transformada em luz visível por tintas fosforescentes.

¹⁴ A análise por ativação de nêutrons foi também descrita no Capítulo III – Aplicações da Energia Nuclear na Indústria, no tópico: PGNA

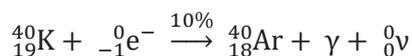
Radiotraçadores para estudo de solo

O movimento e a erosão do solo podem ser estudados através de radiotraçadores. Em geral, determina-se a presença e concentração, nas camadas superiores do solo, de radionuclídeos naturais ou dos chamados FRN (do inglês *Fallout RadioNuclides*, radionuclídeos de queda). Alguns dos FRNs são formados na alta atmosfera, pelo bombardeamento de raios cósmicos. Outros são provenientes dos testes nucleares ocorridos entre as décadas de 1940 e 1960, ou de acidentes em usinas nucleares, quando produtos de fissão/fusão se espalharam pela atmosfera em todo o globo. Com o passar do tempo, houve a queda de radioelementos que podem ser detectados e identificados através de sua atividade.

Um exemplo de **radiotraçador natural** é o potássio-40, que existe em pequena proporção na Natureza.¹⁵ Ele tem duas rotas de decaimento principais, ambas com a mesma meia-vida:

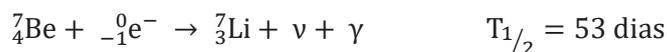


$$T_{1/2} = 1,3 \cdot 10^9 \text{ anos}$$



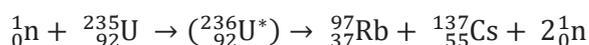
O decaimento do ${}^{40}\text{K}$ é usado na datação de rochas, examinando-se o conteúdo de ${}^{40}\text{Ar}$: no material fundido, proveniente do magma, o gás argônio formado pelo decaimento escapou; após a solidificação, esse gás ficou preso na rocha e a sua proporção, comparada com a proporção de potássio, indica o tempo decorrido desde a formação da rocha. O exame do conteúdo de ${}^{40}\text{Ca}$ é menos conveniente porque o cálcio pode ter outras origens, além do decaimento do potássio. Uma vez conhecida a idade da rocha, pode-se observar se houve erosão e transporte de sedimentos para outro local.

Um exemplo de **radionuclídeo de queda natural** é o berílio-7. Ele se origina na alta atmosfera através de choques de prótons, provenientes do vento solar, com átomos de oxigênio ou nitrogênio¹⁶ caindo sobre o solo. O ${}^7\text{Be}$ decai em ${}^7\text{Li}$ por captura eletrônica, emitindo radiação γ com energia de 480 keV:



Como o radionuclídeo penetra no máximo 2 cm no solo, é possível se determinar o valor esperado de atividade num local, devido ao seu decaimento, o que pode indicar se houve erosão recente ou se o solo é proveniente de outro local.

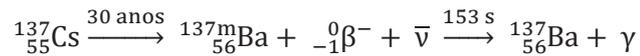
O céσιο-137 é um **radionuclídeo de queda de origem antrópica**, proveniente da fissão do urânio-235:



¹⁵ A proporção isotópica do ${}^{40}\text{K}$ é de 0,012%.

¹⁶ Esse processo se chama espalação: quando a partícula incide sobre um núcleo, arranca parte dos seus componentes na forma de núcleos menores.

O ^{137}Cs foi lançado na atmosfera durante testes nucleares ou em acidentes em reatores de fissão. O seu decaimento mais provável é:



A energia da radiação γ é 0,66 MeV.

Na Alemanha, a camada superficial do solo foi contaminada com ^{137}Cs proveniente do acidente na usina nuclear de Chernobyl, em 1986. Esse radioelemento é absorvido por plantas de raízes pouco profundas, mas árvores de raízes profundas não o absorvem. A caça de animais selvagens, como cervos, fica interdita durante o outono/inverno, pois nessa época os animais não encontram folhas de árvores e se alimentam de plantas rasteiras e cogumelos. Sua carne fica então contaminada com o césio e não pode ser consumida. No entanto, o césio não é metabolizado pelos animais e é eliminado pelas fezes. Por isso, pode haver a caça e o consumo de sua carne em outras épocas do ano.

Uso de fontes seladas

Análise por transmissão γ

A transmissão de radiação γ depende da densidade do material que ela atravessa. Esse fato permite a caracterização da camada de sedimentos em suspensão nas águas de portos, barragens ou em canais de navegação. A fonte de radiação para a medida em transmissão é geralmente o césio-137, cuja obtenção e forma de decaimento foram descritas anteriormente nesse capítulo. Sua meia-vida longa (30 anos) o torna conveniente para o uso em fontes seladas.

Retroespalhamento γ

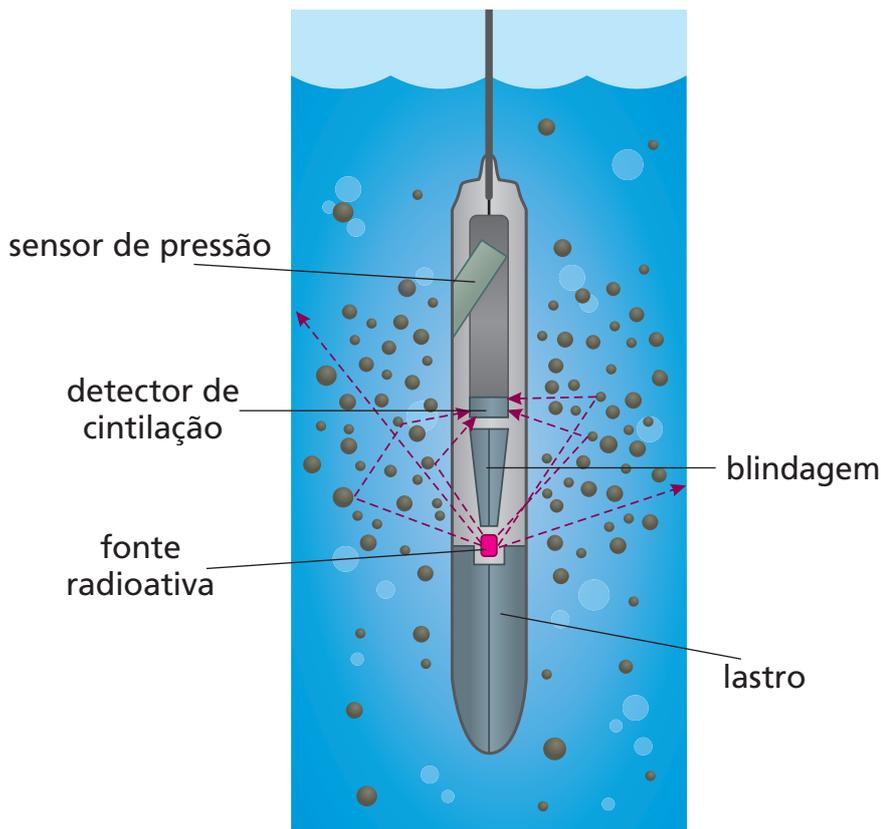
A análise de materiais usando raios γ pode ser feita em situações onde somente um dos lados do objeto de estudo está disponível; nesse caso, fonte e detector ficam lado a lado e se analisam os raios γ retroespalhados por efeito Compton.¹⁷ A intensidade do feixe retroespalhado depende da densidade e da espessura do material, além do ângulo de espalhamento.

Essa técnica é muito útil para o estudo da concentração de sedimentos em portos, rios, canais de navegação. As análises podem ser feitas em um ponto fixo, estudando-se a variação da concentração de sedimentos com o tempo, ou medindo-se o perfil vertical dessa concentração.

A Figura IV-4 mostra o esquema de uma sonda de retroespalhamento.

¹⁷ No efeito Compton, um fóton colide com o elétron de um átomo, comportando-se como partícula; a troca de energia entre eles faz com que o fóton seja espalhado com energia diferente da inicial e que depende do ângulo de espalhamento. O efeito Compton é também descrito no Capítulo I – Fundamentos.

Figura IV-4: esquema de uma sonda de retroespalhamento γ



A fonte radioativa (em geral, césio-137) emite em todas as direções; a radiação que incidiria diretamente sobre o detector é blindada por um cone de tungstênio, e somente a radiação retroespalhada pelo meio líquido consegue alcançar o detector. O lastro na parte inferior da sonda permite que esta seja colocada na altura desejada, que pode ser determinada pelo sensor de pressão.

Baseado em: A. Caillot et. al.: A New Nuclear Density Gauge to Measure Directly High Turbidities in Muddy Areas; disponível em: <<https://icce-ojs-tamu.tdl.org/icce/index.php/icce/article/view/3993/3676>>. Acesso em jan/2019.

Estudos meteorológicos

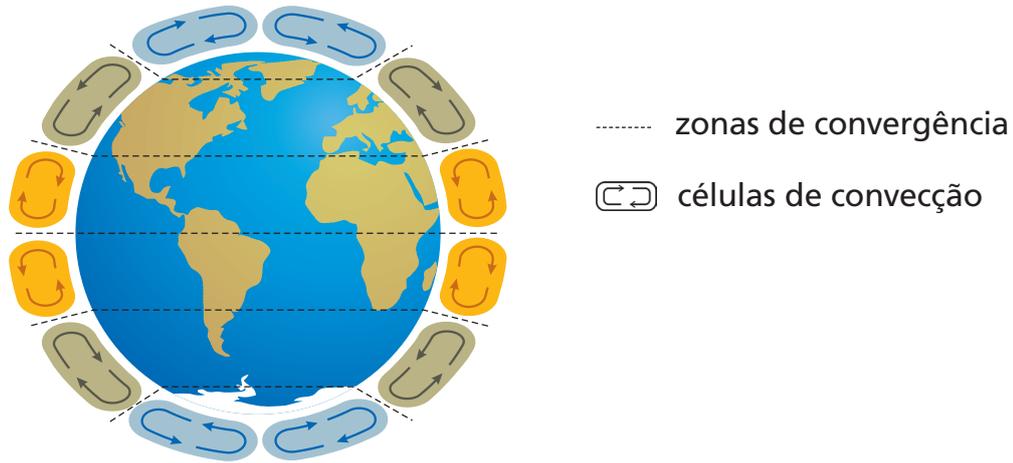
A dinâmica atmosférica pode ser estudada usando-se o berílio-7 como radiotraçador. Como foi descrito anteriormente neste capítulo, este radioelemento é formado na alta atmosfera por espalação de núcleos de oxigênio ou de nitrogênio; ele adere a partículas de aerossóis¹⁸ que são transportadas pelo vento e caem sobre o solo devido à gravidade e às chuvas. A análise da presença de ^7Be na baixa atmosfera pode dar informações sobre o movimento do ar.

O CTBTO (do inglês *Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty Organization*, Organização para o Tratado de Proibição Completa de Testes Nucleares) é um organismo da ONU que monitora explosões nucleares. Para isso, existe uma rede global de detectores que analisam a composição do ar e a ocorrência de eventos sísmicos e que pode ser usada para outros estudos e pesquisas. Os detectores indicam, entre outros fatores, a concentração de ^7Be na atmosfera.

Sabe-se que a atmosfera terrestre é formada por **células de convecção**, onde o ar quente, menos denso, sobe até a alta atmosfera, enquanto ar frio, mais denso, desce até próximo do solo (Figura IV-5). As regiões entre duas células são chamadas **zonas de convergência**. Existe uma zona de convergência próxima ao equador, duas nas zonas temperadas (uma em cada hemisfério), e duas nas regiões polares.

¹⁸ Aerossóis são partículas finíssimas, sólidas ou líquidas, que existem em suspensão em um gás.

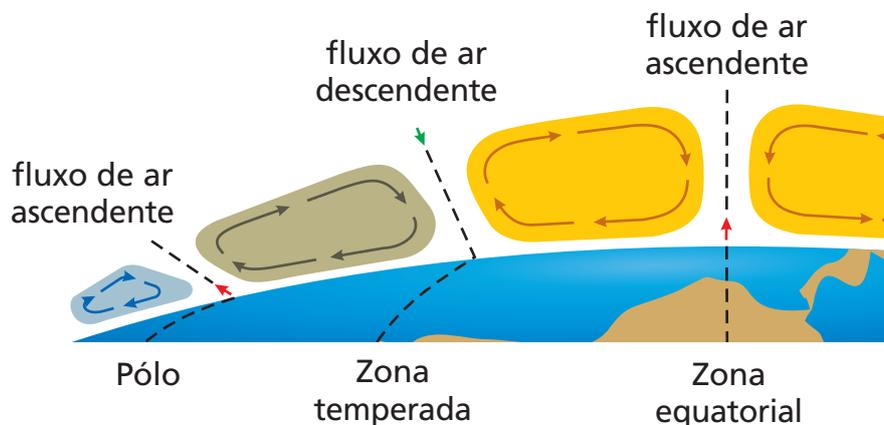
Figura IV-5: Células de convecção da atmosfera terrestre



A região entre duas células é denominada zona de convergência. Adaptado de: L. Terzi, M. Kalinowski, *Journal of Environmental Radioactivity* 178-179, pg.1-15 (2017), disponível em: <<https://prezi.com/view/t1Daf9pyHDzVF3VD6S1S/>>. Acesso em jan/2019.

Nas zonas de convergência no equador e nos polos, o sentido de circulação do ar faz com que ele suba; nas regiões temperadas, inversamente temos ar que desce (Figura IV-6). Como o ^7Be é formado na alta atmosfera, espera-se que sua concentração seja mais elevada na zona de convergência das regiões temperadas e mais baixa nas zonas de convergência do equador e dos polos, em comparação com a concentração em outras regiões.

Figura IV-6: Circulação de ar nas zonas de convergência



Adaptado de: L. Terzi, M. Kalinowski, *Journal of Environmental Radioactivity* 178-179, pg.1-15 (2017), disponível em: <<https://prezi.com/view/t1Daf9pyHDzVF3VD6S1S/>>. Acesso em jan/2019.

As zonas de convergência se deslocam com as estações do ano, situando-se ligeiramente mais ao norte ou mais ao sul. Medindo-se a variação sazonal da concentração de ^7Be , é possível se determinar a posição das zonas de convergência e seus movimentos, associando-os com características climáticas (verão, inverno, estações chuvosas ou secas, presença e intensidade do fenômeno El Niño, ocorrência de monções etc).

Agradecimentos: agradecemos a colaboração dos pesquisadores Rubens Martins Moreira e Jefferson Vianna Bandeira (CNEN, Brasil), João Alberto Osso Júnior, Patrick Brisset e Sabharwal Sunil (IAEA) na elaboração deste capítulo.

CAPÍTULO V - APLICAÇÕES DA ENERGIA NUCLEAR NA PRODUÇÃO DE ALIMENTOS



A população mundial tem crescido exponencialmente e por isso aumenta cada vez mais a demanda de alimentos. A energia nuclear pode ser usada na agricultura e na pecuária, melhorando a produção de alimentos: no estudo e preparação do solo, na escolha das melhores sementes e de espécies vegetais adaptadas a determinadas condições climáticas, na redução de pragas agrícolas, na preservação da saúde de rebanhos etc. Neste capítulo, veremos alguns exemplos de aplicações da energia nuclear.

Estudo de solos

Ao se preparar um terreno para a agricultura, é importante se conhecer se há movimento ou erosão do solo, sua umidade, a necessidade de adubação, entre outros fatores. As técnicas nucleares de estudo do solo incluem a observação de elementos radiotraçadores ou de isótopos estáveis e as sondas de nêutrons.

Os **radiotraçadores**, sejam eles naturais ou de origem antrópica, informam sobre o movimento das camadas superficiais do solo, indicando erosão ou acumulação de material vindo de outras regiões.^{19,20} Os **isótopos estáveis** de carbono e nitrogênio (^{13}C e ^{15}N), também podem ser usados para indicar movimentos do solo e erosão.

A composição isotópica de ^{15}N é usada ainda nos estudos de fertilização do solo. Sabe-se que as plantas precisam de nitrogênio para seu desenvolvimento; esse elemento é importante, por exemplo, na formação da clorofila. Elas podem absorver o nitrogênio do solo ou do ar atmosférico. Através de medidas da composição isotópica de ^{15}N na planta e no solo, é possível determinar se o elemento é proveniente do solo ou da atmosfera. Conhecendo-se as características do vegetal em estudo, pode-se decidir sobre a necessidade de aumentar a concentração de nitrogênio no solo, seja através do uso de plantas ou bactérias que fixam o elemento, seja por fertilização artificial.

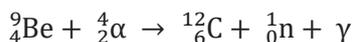
¹⁹ O uso de radiotraçadores na indústria petrolífera e no estudo de transporte de sedimentos foi descrito nos Capítulos III- Aplicações da Energia Nuclear na Indústria e IV- Estudos Ambientais

²⁰ Os isótopos estáveis e a composição isotópica de alguns elementos foram detalhados no Capítulo II – Isótopos Estáveis.

As **sondas de nêutrons** são usadas para se determinar a umidade do solo, baseando-se na interação de nêutrons rápidos com a água. A fonte de nêutrons usada nessas sondas é uma pastilha de amerício/berílio.²¹ O amerício-241 é um emissor α :



O berílio absorve a partícula α e se transforma em carbono-12, emitindo um nêutron rápido:

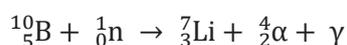


A energia dos nêutrons emitidos é da ordem de 4 MeV. As pastilhas são encapsuladas com alumínio, chumbo ou ferro, para blindar a emissão γ .

Em contato com o solo, o fluxo de nêutrons colide com os elementos do solo e troca energia com seus núcleos. Caso as massas do núcleo e do nêutron sejam semelhantes, a troca de energia é mais efetiva, e os nêutrons são termalizados, ou seja, têm sua energia reduzida a valores da ordem de $1/2$ KT.

O hidrogênio é o único elemento com baixo peso atômico encontrado em quantidades significativas nos solos típicos, estando presente nas moléculas de água. Assim, a medida de nêutrons térmicos está relacionada com a concentração de água no solo e pode determinar a quantidade de irrigação artificial necessária.

O fluxo de nêutrons lentos é medido, por exemplo, por detectores tipo *Geiger-Müller* (GM),²² usando gás BF_3 , com boro enriquecido em boro-10, que absorve nêutrons lentos e emite α e γ :



Os contadores GM determinam a intensidade mas não a energia da radiação ionizante emitida.

A vantagem das medidas feitas com sondas de nêutrons é que elas não dependem da temperatura e pressão atmosférica do local, e são pouco afetadas pela salinidade, composição química do solo ou tipo de ligação das moléculas de água com as partículas do solo. Além disso, o equipamento, composto pela fonte e pelo detector, é compacto e pode ser facilmente transportado.

Mutação induzida

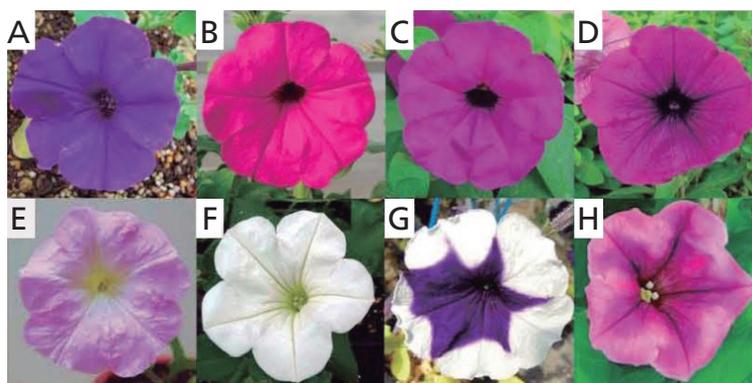
Mutação é uma modificação observada no DNA de um ser vivo. O DNA é uma fita dupla de nucleotídeos, ligados por açúcares e fosfatos. Os nucleotídeos podem ter 4 tipos de bases nitrogenadas: adenina, timina, citosina e guanina, identificadas pelas iniciais A, T, C e G. Essas bases formam pares A-T ou C-G. A parte funcional do DNA é o gene, que consiste em sequências especiais de centenas ou milhares de pares A-T ou C-G.

²¹ A fonte de Am/Be foi também descrita no Capítulo III – Aplicações da Energia Nuclear na Indústria.

²² Os detectores Geiger-Müller foram descritos no Capítulo I-Fundamentos.

A mutação pode ser pontual, quando substitui bases nitrogenadas por outras; pode inserir ou retirar bases; ou pode inverter a ordem das bases. O fenômeno foi primeiro descrito pelo botânico holandês Hugo de Vries, no início do século XX, que observou mutações em plantas de primula. A mutação induzida pode ser feita através do tratamento químico (agentes químicos) ou da irradiação (agente físico) das sementes, provocando mutações que poderiam acontecer naturalmente, porém levando mais tempo para acontecer (da ordem de milhões de anos). Ela pode ser usada para se criarem, por exemplo, espécies de plantas resistentes ao clima (seca, salinidade do solo, excesso de chuva etc.) ou mais nutritivas. Mutação induzida em plantas decorativas pode resultar em flores com cores diferentes (Figura V-1). A técnica, portanto, acelera a evolução natural das plantas. Como as mutações induzidas ocorrem numa frequência muito maior que as mutações espontâneas, elas aumentam a probabilidade de se obterem características de interesse nas plantas.

Figura V-1: Flores de cores diferentes, obtidas através de radiação iônica de sementes de petúnia



A: cor original; B-H: cores mutantes.

Fonte: Y. Hase et. al.: *Plant Biotechnology* 27, 99–103 (2010)

Como exemplo, temos o arroz: em 100 milhões de anos, a Natureza criou 140 mil genótipos²³ diferentes de arroz; usando-se radiação, é possível criar novos genótipos em menos tempo: entre o início das pesquisas e a aplicação dos resultados, decorrem em geral 10 anos.

O processo consiste em submeter sementes ou tecidos de plantas à radiação γ , X, feixes eletrônicos ou iônicos.²⁴ A taxa de mutação é baixa (geralmente, entre 1% e 10%). As plantas são cultivadas e se escolhem as que apresentarem características interessantes, para reprodução em grande escala.

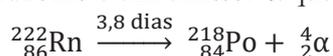
A mutação induzida foi comprovada em 1927, usando-se radônio como fonte emissora.²⁵ As primeiras aplicações da mutação induzida ocorreram em 1936, na Indonésia (tabaco), em 1949, na Holanda (tulipas) e em 1950, na Suécia (mostarda) e na Alemanha (feijão). Hoje, a técnica é usada mundialmente para se encontrar espécies convenientes para a alimentação humana ou dos rebanhos animais.

Existe uma confusão frequente entre a mutação induzida e os organismos geneticamente modificados (GMOs, do inglês *Genetically Modified Organisms*). Os GMOs são obtidos introduzindo-se em uma espécie genes de outra espécie diferente. Os estudos são recentes e

²³ O genótipo é o conjunto formado pelos genes de um indivíduo.

²⁴ Atualmente tem-se procurado usar prioritariamente raios-X ou feixes de elétrons ou íons, pois as fontes dessas radiações deixam de emitir quando desligadas, ao passo que as fontes γ emitem continuamente.

²⁵ O radônio é um emissor α que faz parte da cadeia de decaimento do urânio-238:



ainda não se tem confirmação sobre a ausência de efeitos colaterais no seu consumo. Ao lado disso, a mutação induzida provoca alterações nos genes que já existem na espécie, silenciando alguns deles e expressando outros, e assim mudam algumas características da espécie. Tem sido usada há quase um século, e não se tem relatos de problemas causados pelo seu consumo.

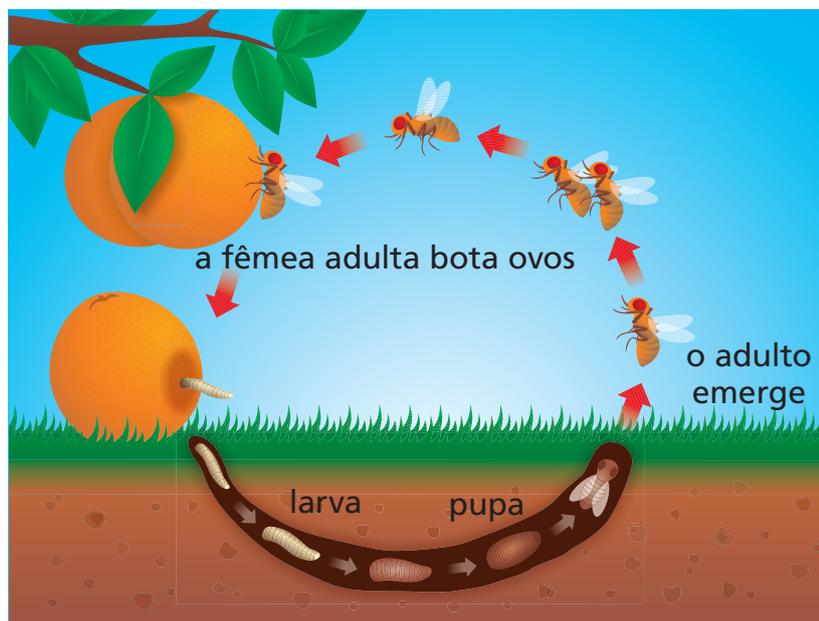
Técnica do inseto estéril

Dependendo da dose utilizada, a radiação ionizante pode provocar mutações, como descrito no item anterior, ou causar alguma modificação em seres vivos. A capacidade de esterilizar insetos com radiação é a base para a aplicação da técnica do inseto estéril (SIT, do inglês *Sterile Insect Technique*), que tem como objetivo o desenvolvimento de métodos de controle ou supressão de pragas na agricultura, e de insetos que causam doenças em humanos ou em animais. A técnica é usada há mais de 50 anos para o controle de moscas da fruta e moscas tsé-tsé.²⁶ Hoje ela é amplamente utilizada para o controle de pragas agrícolas (mosca da fruta, mosca do mediterrâneo), da pecuária (mosca do estábulo, mosca tsé-tsé, mosca da bicheira) e de mosquitos transmissores de doenças para homens e animais.

Para o uso da técnica, cria-se em laboratório grande quantidade de insetos; os machos são separados das fêmeas, geralmente na fase de pupas, e as fêmeas são descartadas. Na fase de pupa, os machos são irradiados com doses convenientes; ao atingir a fase adulta, eles se mostram estéreis, sem perder sua capacidade de acasalamento. Os insetos estéreis são liberados na natureza, onde competem com os machos selvagens; as fêmeas que se acasalam com os insetos irradiados não geram descendentes, e assim se pode controlar a população de insetos na região.

O ciclo de vida de um inseto é mostrado na Figura V-2.

Figura V-2: Ciclo de vida de um inseto



A Figura V-3 mostra o desenvolvimento da SIT para moscas da fruta. As pupas macho criadas em laboratório têm cor diferente das fêmeas (fêmeas brancas ou pretas, dependendo da espécie, e machos marrom); elas podem ser separadas por um separador óptico, descrito na Figura V-4.

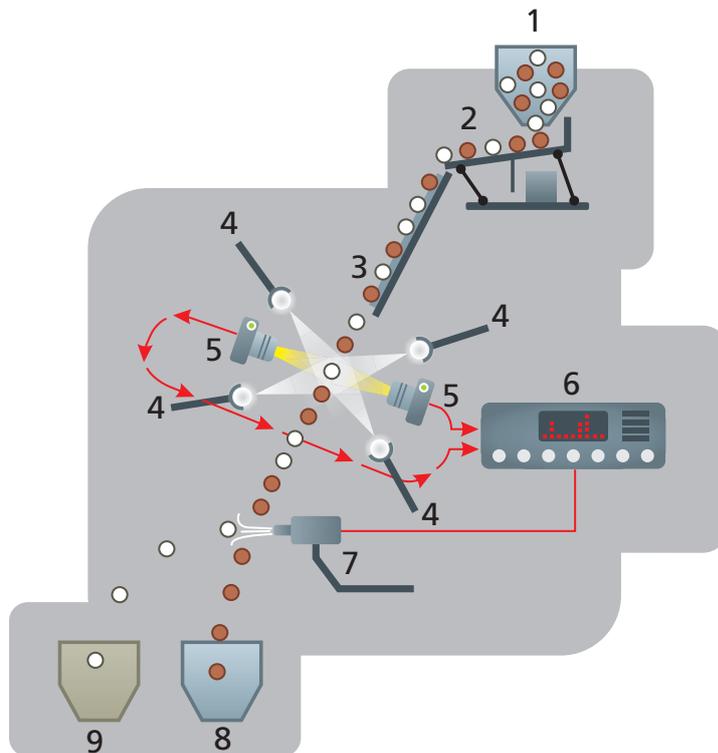
²⁶ A técnica do inseto estéril é também discutida em: R.P.de Carvalho e S.M. Velasques de Oliveira – “Aplicações da Energia Nuclear na Saúde” – SBPC, IAEA (2017) – Disponível em: <<http://portal.sbpnet.org.br/livro/energianuclearnaude.pdf>>. Acesso em jan/2019.

Figura V-3: Moscas da fruta criadas em cativeiro



A: os ovos são recolhidos em um recipiente colocado em baixo da gaiola. B: as larvas são criadas em bandejas contendo uma pasta de carboidratos e leveduras. C: as pupas macho e fêmea têm cores diferentes e podem ser separadas. Fotos feitas nos laboratórios da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA – *International Atomic Energy Agency*), em Seibersdorf, Áustria.

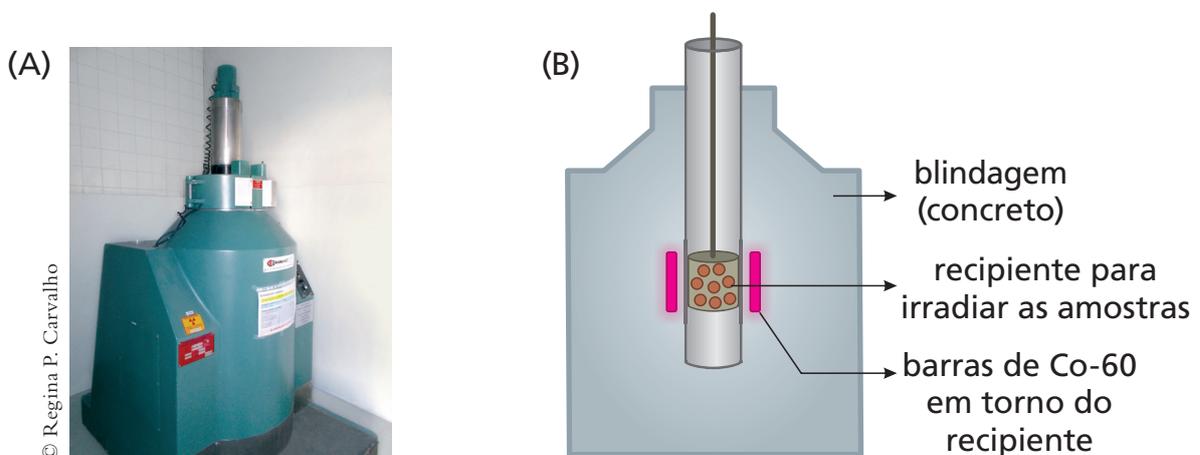
Figura V-4: O processo de separação de pupas macho e fêmea de moscas da fruta



As pupas são introduzidas no separador (1) e uma plataforma vibratória (2) faz com que o material caia em monocamada (3). Cada pupa é iluminada (4) e sua imagem é captada por câmaras (5), que enviam um sinal para o sistema de processamento (6); este foi previamente programado para reconhecer objetos brancos ou escuros. Quando uma pupa clara (fêmea) é detectada, o processador envia uma ordem para o canhão de ar comprimido (7), que desvia a trajetória da pupa para o recipiente de material rejeitado (9). As pupas escuras (machos) são recolhidas separadamente (8). Baseado em documento do Color Sorter Group – disponível em: <<http://www.colorsorter.com/>>. Acesso em jan/2019.

As pupas macho são irradiadas com cobalto-60, que é emissor γ , em uma *gammacell* (Figura V-5), e incubadas. Nos laboratórios de pesquisa, depois da eclosão dos machos, eles são colocados em contato com insetos selvagens, em ambientes controlados que simulam os ambientes naturais (Figura V-6), para se verificar a interação entre os insetos.

Figura V-5: Equipamento para irradiação γ (*gammacell*)



A: Aspecto externo; foto feita nos laboratórios da IAEA em Seibersdorf, Áustria. B: Esquema interno.

Figura V-6: Insetos machos irradiados são colocados em contato com populações selvagens, em ambientes controlados, para se verificar a interação entre eles

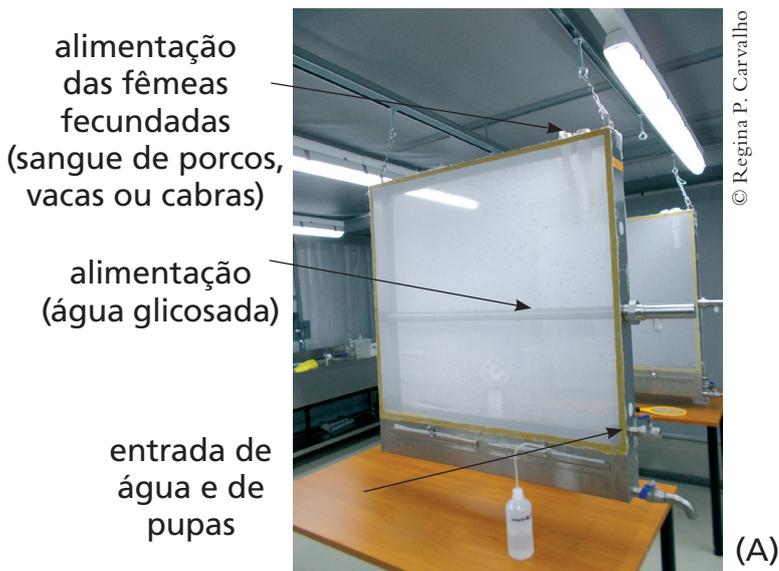


© Regina P. Carvalho

Foto feita nos laboratórios da IAEA, em Seibersdorf (Áustria).

Procedimento similar é usado no controle de mosquitos transmissores de doenças em humanos e animais (Figura V-7). Nos mosquitos, as pupas machos são menores que as fêmeas, e podem ser separadas por meios mecânicos.

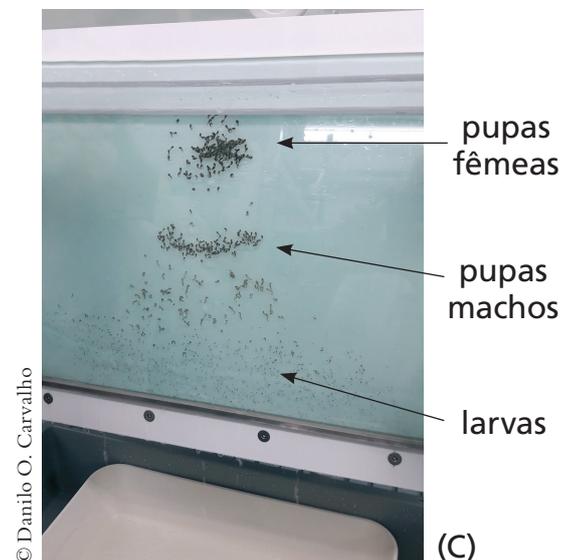
Figura V-7: Criação de *Aedes aegypti*



© Regina P. Carvalho



© Regina P. Carvalho



© Danilo O. Carvalho

A: Os mosquitos são criados nos laboratórios da IAEA, em Seibersdorf (Áustria). B: Os ovos são recolhidos na parte inferior da gaiola. C: As pupas fêmeas e machos são separadas entre duas placas que vibram.

Para outros insetos, a técnica pode ter algumas alterações, devido às características próprias de cada inseto. A separação entre machos e fêmeas das moscas do Mediterrâneo, por exemplo, é feita com elevação da temperatura até 34°C, o que mata os ovos fêmeas. Esse mecanismo é mais simples e exato, pois permite a eliminação das fêmeas na fase de ovo, simplificando o processo de criação dos insetos.

Outros insetos são muito resistentes à esterilização por radiação, como as mariposas. Porém, se a dose for muito aumentada, pode matar os insetos. Nesse caso, a irradiação com doses baixas não esteriliza o inseto, mas ele terá descendência estéril na segunda ou terceira geração.

A liberação dos adultos estéreis é feita semanalmente, em números que variam de 15 milhões a 1 bilhão de insetos por semana, dependendo do tipo de inseto, da área a ser atingida e do grau de infestação. Para uso em áreas agrícolas, os lotes de insetos são resfriados a 4°C durante o transporte, sendo conservados em estado de latência. A liberação é feita por pequenos aeroplanos e, à medida que caem, os insetos se aquecem e retomam a vitalidade. Em áreas urbanas, a liberação é feita em vias terrestres.

A SIT tem tido bastante sucesso no controle de insetos, e em geral é parte de um conjunto de técnicas usadas simultaneamente; seu sucesso depende de envolver toda a comunidade em um projeto colaborativo.

Irradiação de alimentos

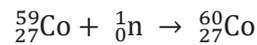
Após a cultura e colheita dos vegetais e a obtenção de produtos de origem animal, são necessários procedimentos para que eles se conservem durante a estocagem e transporte, até chegar ao consumidor. As técnicas de irradiação de alimentos têm como objetivos a descontaminação, eliminando bactérias e fungos, o controle de pragas, como insetos, que podem se instalar nos frutos e sementes, ou sua conservação por mais tempo, inibindo a brotação. Essas técnicas são aplicadas em grãos, temperos, alguns frutos e legumes ou em carnes.

A irradiação também pode ser feita em refeições preparadas, que são particularmente úteis na alimentação de astronautas, em hospitais ou no envio de alimentos a locais de emergências (terremotos, enchentes). Nesse caso, o alimento é embalado com material que não se deteriora quando sujeito à radiação; a embalagem evita que o alimento entre em contato com micro-organismos e seja novamente contaminado. As embalagens de alimentos irradiados levam um selo de uso internacional, denominado Radura (Figura V-8).

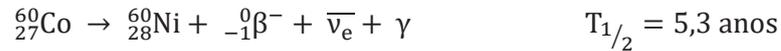
Figura V-8: Radura, o símbolo internacional usado para identificar alimentos tratados por radiação ionizante



Usualmente, a irradiação γ é feita com cobalto-60, obtido através do bombardeamento de cobalto-59 (estável) em reator nuclear:



O cobalto-60 é um emissor de γ energéticos (1,3 MeV e 1,1 MeV, em proporções iguais):



No entanto, o uso de fontes γ acarreta problemas de segurança no transporte e manuseio de radioisótopos e tem sido substituída por irradiação X ou por feixes eletrônicos, que só irradiam quando em operação. O desenvolvimento de novas tecnologias de fabricação permite que, atualmente, os equipamentos sejam menores e portáteis.

Pecuária

A produção de alimentos de origem animal (leite, carne) encontra problemas relacionados com insetos parasitas como a mosca da bicheira, mosca do gado ou mosca tsé-tsé e com doenças que atingem os rebanhos, como febre aftosa, peste bovina, peste suína. O controle de insetos parasitas pode ser feito através da técnica do inseto estéril, descrita anteriormente neste capítulo.

Um caso de sucesso na aplicação da SIT foi a erradicação de mosca da bicheira na América do Norte. Essa mosca põe seus ovos nas feridas de animais, e as larvas se alimentam do sangue e da carne dos mesmos. A infestação em rebanhos leva a uma grande perda de animais e baixa na produção de carne ou leite.

Em 1965, a técnica foi implantada na Flórida, junto com outras técnicas de eliminação de insetos e educação da população. Nos 10 anos seguintes ela foi estendida por todos os estados do Sul, até a costa oeste norte-americana. Em 1981, a mosca da bicheira foi considerada extinta nos Estados Unidos, ocorrendo apenas casos isolados em animais de estimação ou cavalos de corrida que viajaram com seus donos para a América Central e do Sul, onde foram contaminados. Em cada caso, foi feito um controle local com insetos estéreis durante 6 meses.

A partir de 1976, a técnica foi implantada no México e depois se estendeu pela América Central. Desde 2000 existe uma barreira sanitária no canal do Panamá, com liberação semanal de insetos estéreis, para evitar que haja recontaminação por insetos vindos da América do Sul.

Agradecimentos: agradecemos a colaboração dos pesquisadores Carlos E. Caceres, Danilo O. Carvalho, Jorge Hendrichs, Carl M. Blackburn, Zhihua Ye e Fatma Sarsu (IAEA) e Antonio Costa de Oliveira (Univ. Fed. de Pelotas, Brasil) na preparação deste capítulo.

CAP VI - APLICAÇÕES DA ENERGIA NUCLEAR PARA FINS CULTURAIS



As técnicas nucleares são ferramentas úteis na preservação e estudo de bens culturais. Por exemplo, a irradiação γ pode ser usada para eliminar fungos, microorganismos ou insetos em livros e obras de arte antigos. A dose pode ser calculada para eliminar os organismos indesejados, sem afetar o material a ser preservado.

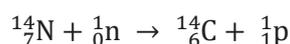
A composição de tintas, cerâmicas ou ligas metálicas usadas em épocas passadas pode ser revelada usando as técnicas de análise com nêutrons ou raios γ descritas no Capítulo III – Aplicações da Energia Nuclear na Indústria.

A gamagrafia, também descrita no mesmo capítulo, é usada para mostrar o interior de estátuas e outras obras de arte.

Além dessas, é usada a técnica de datação com carbono-14 para se conhecer a idade de fósseis; e uma nova técnica de análise não destrutiva foi proposta recentemente para o estudo de grandes edificações antigas: a muografia.

Datação com carbono-14

O ^{14}C é formado na alta atmosfera, através do bombardeamento do nitrogênio-14 por raios cósmicos, e é absorvido pelos seres vivos como CO_2 , da mesma forma que os isótopos estáveis ^{12}C e ^{13}C :



O ^{14}C é instável, e se transforma em ^{14}N por decaimento β^- :



A proporção entre os isótopos de carbono é a mesma enquanto o organismo está vivo (da ordem de 10^{12} átomos de ^{12}C para cada átomo de ^{14}C), mas a quantidade de ^{14}C começa a diminuir após a morte, pois ele decai em ^{14}N e não há mais absorção. Assim, determinando-se a proporção entre o ^{14}C e o ^{12}C , é possível inferir há quanto tempo morreu o organismo estudado. Em geral, considera-se que a proporção isotópica do carbono na atmosfera não variou ao longo do tempo.

As primeiras datações por radiocarbono foram feitas na década de 1940, através da contagem das emissões β^- do ^{14}C . Porém, devido à pequena proporção desse isótopo em uma amostra de carbono, são necessárias grandes quantidades de material e longos tempos de contagem. Por exemplo, uma amostra de carbono “atual” perfaz em média 15 emissões por minuto; para se obter uma informação precisa, seria necessário se realizar a contagem por pelo menos 12 horas. Para amostras antigas, nas quais já houve o decaimento de parte do ^{14}C , a contagem pode demorar semanas ou meses.

Atualmente, é possível utilizar-se a técnica de espectroscopia de massa, descrita no Capítulo II – Isótopos Estáveis, para se determinar a proporção de ^{14}C no carbono total de uma amostra. A análise pode ser feita rapidamente (10 a 30 minutos), e são usadas amostras muito pequenas (~ 0.1 mg), o que diminui o dano causado à peça estudada.

O carbono-14 pode, portanto, ser usado para se determinar a idade de qualquer objeto antigo contendo carbono de origem orgânica, como ossos de pessoas ou animais, conchas, restos de alimentos em vasilhame pré-histórico, papel, tecido, palha, material de origem vegetal encontrado em tijolos antigos etc.

Muografia

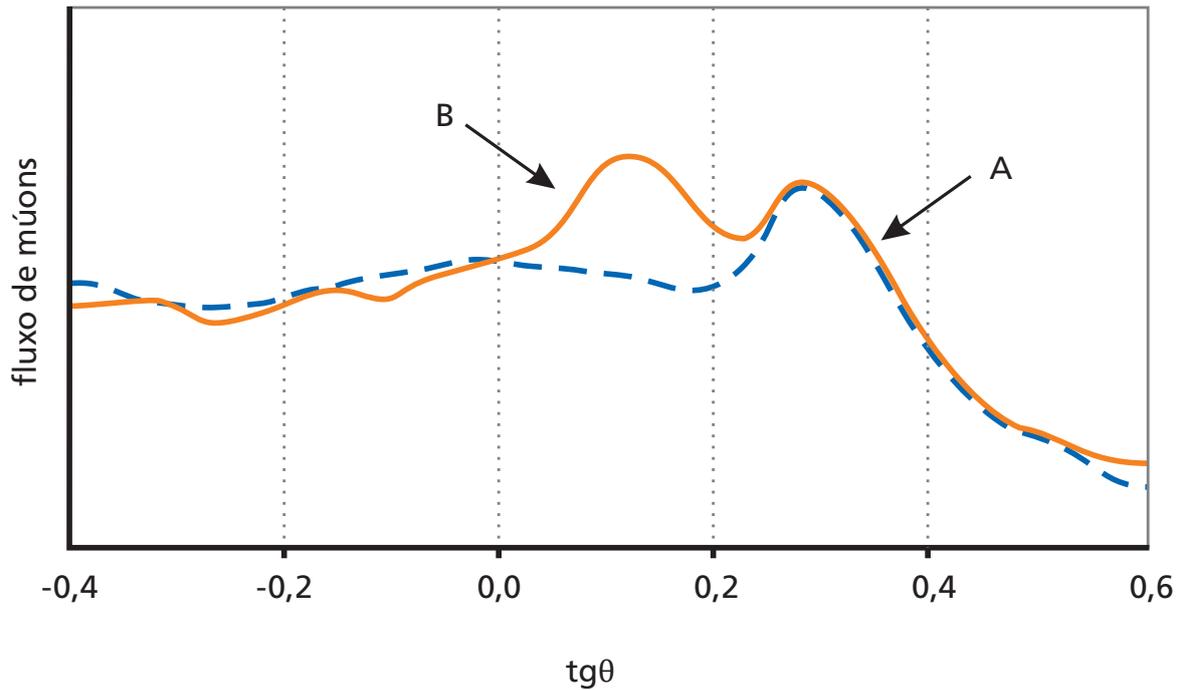
Múons (pronuncia-se ‘míons’) são partículas negativas, semelhantes aos elétrons, porém com massa cerca de 200 vezes maior que a do elétron. São formados na alta atmosfera terrestre, por choque entre os raios cósmicos e as moléculas da atmosfera. Eles interagem muito pouco com a matéria e alcançam a superfície terrestre com energias elevadas. Ao atravessar grandes volumes, perdem energia de forma proporcional à densidade do material e à distância atravessada.

Devido ao fato de que o fluxo de múons é intenso em toda a superfície do globo terrestre, eles podem ser usados para se examinar o interior de grandes estruturas (montanhas, grandes edificações etc.). A muografia é semelhante à gamagrafia ou à radiografia, com a vantagem que a fonte radioativa existe em permanência em qualquer lugar da Terra. A detecção dos múons é feita por filmes de emulsão, e pode ser confirmada com detectores cintiladores.

Um exemplo de aplicação da muografia é o estudo do interior do vulcão Vesúvio. Através das imagens obtidas se pode observar a formação de bolsões de lava e inferir a ocorrência de futuras erupções.

Em outro estudo recente, foi feita a imagem do interior da pirâmide de Khufu, no Egito. A partir das medidas, foi possível determinar a existência de um espaço vazio, até agora desconhecido, dentro da pirâmide (Figura VI-1).

Figura VI-1: Fluxo de múons incidentes, em função da posição dos detectores, na pirâmide de Khufu (Egito)



A curva contínua laranja mostra os dados experimentais. A curva azul pontilhada mostra o fluxo esperado, levando-se em conta a estrutura conhecida da pirâmide. O aumento do fluxo na região A é devido à presença de um túnel conhecido (ausência de material que poderia atenuar o fluxo). A região B apresenta um valor inesperadamente alto para o fluxo, indicando a existência de um espaço vazio, até agora desconhecido.

Baseado em: K. Morishima et. al.: NATURE , 552 (21/28), 386 (2017).

Algumas companhias estão atualmente propondo o uso da muografia para se verificar a carga transportada em caminhões fechados.

SUGESTÕES DE LEITURA

Os conceitos de Física Nuclear e suas aplicações, discutidos neste livro, podem ser encontrados em livros básicos, como, por exemplo:

CARVALHO, Regina Pinto de; OLIVEIRA, Sílvia Maria Velasques de. **Aplicações da Energia Nuclear na Saúde**. São Paulo: SBPC/IAEA, 2017.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert. **Física**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996. v. 4.

HEWITT, Paul G. **Física conceitual**. 11. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.

LUZ, Antônio Máximo Ribeiro da; ALVARENGA, Beatriz Gonçalves de. **Física**: volume único. São Paulo: Scipione, 1997.

OKUNO, Emico; YOSHIMURA, Elisabeth Mateus. **Física das radiações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

PIRES, Antônio Sérgio Teixeira; CARVALHO, Regina Pinto de. **Por dentro do átomo: física de partículas para leigos**. São Paulo: Livraria da Física, 2014.

ZAMBONI, Cibele Bugno. (Coord.). **Fundamentos da física de nêutrons**. São Paulo: Livraria da Física, 2007.

Algumas páginas da *internet* oferecem informação sobre a energia nuclear e suas aplicações:

a) Páginas em português:

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. **Material de aula**. Ana Maria Graciano Figueiredo – Material para o curso “Fundamentos em Tecnologia Nuclear – Física Nuclear e Aplicações” – Disponível em: <https://www.ipen.br/portal_por/conteudo/posgraduacao/arquivos/200703131119010-Curso2007_1.pdf>. Acesso em jan/2019.

CARDOSO, Simone Coutinho; BARROSO, Marta Feijó. **Rápida introdução à física das radiações**. Rio de Janeiro: UFRJ. Disponível em: <<http://www.if.ufrj.br/~marta/cederj/radiacoes/fr-unidade2.pdf>>. Acesso em jan/2019.

SOCIEDADE BRASILEIRA PARA O PROGRESSO DA CIÊNCIA. CARVALHO, Regina Pinto de; OLIVEIRA, Sílvia Maria Velasques de. **Aplicações da Energia Nuclear na Saúde**. Disponível em: <<http://portal.sbpcnet.org.br/livro/energianuclearnaude.pdf>>. Acesso em jan/2019.

b) Páginas em inglês:

The Periodic Table. Disponível em: <<http://periodictable.com/index.html>>. Acesso em jan/2019.

NUCLEAR SCIENCE WALL CHART. **Guide to the Nuclear Wall Chart**. Disponível em: <<http://www2.lbl.gov/abc/wallchart/guide.html>>. Acesso em jan/2019.

Radioactivity and its applications – IN2P3, France. Disponível em: <<http://www.radioactivity.eu.com/>>. Acesso em jan/2019.

Radiotracer Applications in Industry – A Guidebook – IAEA, Vienna, 2004 – Disponível em: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS423_web.pdf>. Acesso em jan/2019.

Use of Radiotracers to Study Surface Water Processes – IAEA-TECDOC-1760, Vienna, 2015. Disponível em: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1760_web.pdf>. Acesso em jan/2019.

Fundamentals of stable isotopes geochemistry – Carol Kendall, USGS (2010). Disponível em: <<https://wwwrcamnl.wr.usgs.gov/isoig/res/funda.html>>. Acesso em jan/2019.



Regina Pinto de Carvalho é professora e pesquisadora aposentada do Departamento de Física da UFMG, onde sempre procurou divulgar a Física em todos os níveis, por meio da orientação de estudantes ou treinamento de futuros professores. Essa preocupação continua até hoje, dentro e fora da Universidade, com a capacitação de professores e a publicação de livros de popularização da Física ou de apoio ao professor do ensino médio. Regina nasceu em Belo Horizonte, em 1950, onde vive atualmente, depois de ter trabalhado e estudado em outras cidades do Brasil e do exterior. Tem dois filhos e três netos.

"O livro é realmente muito bem escrito, resumido e fácil de ler! ...
Penso que é muito bom que [o autor] distribua conhecimento para todos,
especialmente porque as pessoas hoje em dia ficam assustadas [com energia nuclear].
Penso que este é um bom livro para se ter nas salas de aula."
(Gauri, estudante de Engenharia)

"[O texto é] muito agradável de ler e certamente irá ajudar
pessoas não-especialistas a olhar as técnicas nucleares e
isotópicas de uma perspectiva nova e mais positiva."
(L. Araguas, pesquisador em Geoquímica)

"É muito importante explicar [as aplicações nucleares]
numa forma fácil de ser compreendida pelo público em geral."
(J. Hendricks, pesquisador em Biologia)



MINISTÉRIO DA
**CIÊNCIA, TECNOLOGIA,
INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES**
GOVERNO FEDERAL - BRASIL