

# 6

## ATIVACÃO NEUTRÔNICA

*Cibele Bugno Zamboni*

*Frederico Antonio Genezini*

O princípio da análise por ativação está em expor o material a ser analisado a um bombardeio de partículas carregadas, fótons ou nêutrons, de modo que ocorra a formação de núcleos radioativos por meio de reações nucleares. Desta forma, a partir da medida da radiação emitida por esses núcleos radioativos é possível realizar análises qualitativa e quantitativa dos elementos químicos presentes na amostra.

As partículas carregadas usualmente empregadas no processo de ativação são prótons, dêuterons e alfas. Este tipo de feixe pode ser gerado em aceleradores de grande porte, entretanto, não são todos os tipos de materiais que podem ser expostos a feixes de partículas carregadas em função do aquecimento produzido na amostra. Na prática, para execução dessas medidas, tem-se a necessidade de refrigeração da amostra o que pode resultar em um processo oneroso e muitas vezes de difícil e sofisticado preparo.

A ativação pode ser também realizada em aceleradores de elétrons, através do efeito Bremsstrahlung o qual produz fótons de alta energia (geralmente, superior a 7 MeV) para provocar reações nucleares. Entretanto, a secção de choque para esse tipo de reação é pequena, em média da ordem de alguns milibarns, limitando a produção de núcleos radiativos a serem analisados.

No caso do emprego de nêutrons no processo de ativação, a grande vantagem vem do fato do nêutron, por não ter carga elétrica líquida e ter um momento magnético muito pequeno, ser praticamente insensível à interação coulombiana; desta forma, mesmo os nêutrons de baixa energia podem provocar diversas reações nucleares, tais como:  $(n,\gamma)$ ;  $(n,p)$ ;  $(n,\alpha)$ ;  $(n,n)$ ;  $(n,2n)$ , etc. Como essas reações dependem tanto da energia do nêutron incidente (térnico, epitérmico ou rápido) como das

características do elemento alvo (principalmente da secção de choque e da abundância isotópica) vários radioisótopos podem ser formados. Desta forma, enquanto os nêutrons térmicos e epitérmicos interagem com a matéria, de modo geral, por espalhamento elástico  $(n,n)$  ou por captura radioativa  $(n,\gamma)$ , os nêutrons rápidos interagem, principalmente, por espalhamento inelástico  $(n,n')$  ou por emissão de partículas carregadas pelo núcleo composto, via reações do tipo  $(n,p)$ ,  $(n,\alpha)$ , etc [1].

Dentre as reações com nêutrons, particularmente a do tipo  $(n,\gamma)$  é de grande interesse pois, para a grande maioria dos elementos essa é a reação mais favorável para nêutrons térmicos, embora haja exceções no caso dos elementos extremamente leves. Normalmente, os produtos dessa reação ao decaírem emitem raios gama característicos, que podem ser eficientemente detectados, permitindo além da identificação da composição da amostra sua quantificação. Além disso, as reações  $(n,\gamma)$  com isótopos estáveis, exceto  ${}^4\text{He}(n,\gamma){}^5\text{He}$ , são exoérgicas e possuem secção de choque para nêutrons (térmicos e epitérmicos) geralmente maior comparativamente às reações endoérgicas  $(n,p)$ ,  $(n,\alpha)$  ou  $(n,2n)$ . Essas propriedades, aliadas ao fato de que nêutrons de mais baixa energia são muito mais abundantes em reatores nucleares do que nêutrons rápidos, fazem da reação  $(n,\gamma)$  uma ferramenta analítica de alta sensibilidade para estudos de alvos compostos por um ou vários elementos.

A reação com nêutrons que envolve o processo de captura é ilustrada a seguir para o caso do alumínio (alvo),  ${}^{27}\text{Al} + {}^1_0\text{n} \rightarrow [{}^{28}\text{Al}]^*$ , onde  $[{}^{28}\text{Al}]^*$  representa o núcleo composto sendo os canais de reações mais prováveis:



Na prática, a partir da formação do núcleo radioativo ( ${}^{28}\text{Al}$ ,  ${}^{27}\text{Mg}$ ,  ${}^{24}\text{Na}$  e  ${}^{26}\text{Al}$ ), exceção para a reação que envolve espalhamento elástico  $(n,n)$ , é possível obter as informações quali – quantitativas do alvo a partir da medida da radiação emitida. No caso de alvos que contenham mais do que um isótopo estável, reações similares podem ocorrer para todos os isótopos.

## Fundamentos da Análise por Ativação com Nêutrons

### Energia do nêutron vs. modo de ativação

A técnica de ativação neutrônica foi proposta em 1936 por Hevesy e Levi [2] mas só passou a ser uma metodologia viável a partir do desenvolvimento de

reatores nucleares na década de 40. Posteriormente, com a disponibilidade dos detectores semicondutores, o aprimoramento da eletrônica nuclear e a utilização de computadores tornou-se uma técnica de alta sensibilidade aplicável em muitos campos da ciência e, até hoje, em função de sua característica multielementar, vem sendo continuamente aprimorada e largamente utilizada para determinação de elementos traços em materiais diversos.

São várias as fontes de nêutrons disponíveis hoje (reatores, aceleradores e radioisótopos emissores de nêutrons) mas os reatores com nêutrons gerados a partir da fissão do  $^{235}\text{U}$ , são os que fornecem feixes mais intensos e conseqüentemente são muito utilizados para ativação (~75% dos elementos podem ser ativados com nêutrons). A princípio, o método de ativação com nêutrons pode ser executado de dois modos: via raios gama prontos (PGNAA- Prompt Gamma-Ray – Neutron Activation Analysis), isto é, as medidas são feitas durante a irradiação com feixe de nêutrons extraído do núcleo do reator; ou via raios gama atrasados (DGNAA-Delayed Gamma-Ray Neutron Activation Analysis), isto é, medindo a radiação gama proveniente do decaimento do núcleo radioativo formado após ativação no reator. Na prática o procedimento mais utilizado é com raios gama atrasados pois, num processo comparativo (DGNAA<sup>1</sup> vs. PGNAA), o fluxo de nêutrons que a amostra recebe sendo submetida a irradiação dentro do reator é muito maior do que o produzido pela extração de um feixe no reator. Entretanto, cada vez mais, fontes radioativas de  $^{252}\text{Cf}$  (1 a 5 MeV) e  $\text{PuBe}$  (4 a 8 MeV) bem como geradores de nêutrons, do tipo D-D (3 MeV) e D-T (14 MeV), por exemplo, são empregados para realizar PGNAA. Como mencionado no capítulo 1, os nêutrons são classificados de acordo com sua energia cinética em térmicos, epitérmicos e rápidos. Os nêutrons térmicos (energia abaixo de 0,5 eV) estão em equilíbrio térmico com os átomos do meio moderador do reator e podem ser descritos por uma distribuição de Maxwell - Boltzmann, com energia média de 0,025 eV. Em geral, em um reator com capacidade de gerar 1 MW, a contribuição da componente térmica atinge um fluxo da ordem de  $1 \cdot 10^{13}$  neutrons/cm<sup>2</sup> · s.

Os nêutrons epitérmicos (faixa de energia 0,5 eV a 0,5 MeV) correspondem aos nêutrons parcialmente moderados e no espectro de energia apresentam comportamento que pode ser expresso pelo inverso da energia (1/E). No processo de ativação tanto o nêutron térmico como o epitérmico induzem reações do tipo  $(n,\gamma)$  nos núcleos do alvo, mas para a maioria dos elementos esta reação é favorável

---

<sup>1</sup> neste livro será abordado o método DGNAA usualmente empregado no reator IEA

para nêutrons térmicos. Entretanto, embora a componente epitérmica do fluxo seja pequena, comparativamente aos térmicos, esses nêutrons são favoráveis à ativação de alguns elementos como: Ba, Br, Mo, Rb, Sr, Ta e U, possibilitando assim uma via alternativa de análise. Na prática, quando as amostras são irradiadas dentro de cápsulas que absorvem nêutrons térmicos, por exemplo Cd, (1 mm de espessura é suficiente para absorver os nêutrons térmicos), tem-se a Análise por Ativação com Nêutrons Epitérmicos (ENAA- Epithermal Neutron Activation Analysis). Além do cádmio, outros materiais como carbonato ou nitrito de boro também podem ser utilizados como filtros de nêutrons térmicos.

Os nêutrons rápidos (energia > 0,5 MeV) correspondem à parcela de nêutrons que não sofrem moderação. São utilizados em medidas do tipo PGNAA além de serem empregados para determinação, via reação (n,p) ou (n, $\alpha$ ), dos elementos nitrogênio e oxigênio, por exemplo, utilizando feixe de nêutrons de 14 MeV produzidos em aceleradores do tipo Van de Graff, em geradores do tipo Cockroft-Walton ou utilizando fontes de nêutrons ( $^{239}\text{PuBe}$ ,  $^{241}\text{AmBe}$  ou  $^{252}\text{Cf}$ ).

## Metodologias para Realização da Ativação Neutrônica

Na prática pode-se obter a ativação neutrônica dos elementos via método Instrumental (comparativo), via método Absoluto (paramétrico) e sua variante o método semi-paramétrico ( $k_0$  *standardization*) descritos a seguir.

### Método instrumental

O método instrumental é o mais utilizado para a quantificação de radionuclídeos. Neste processo de ativação, a amostra e o padrão (com teor conhecido do elemento a ser determinado) devem ser irradiados sob a mesma intensidade do feixe; além disso o padrão precisa ser feito do mesmo material da amostra, uma vez que o freamento que a partícula sofre no alvo e no padrão está diretamente relacionado à composição química de ambos.

Neste procedimento de ativação pode-se fazer uso do padrão externo ou interno. No caso do emprego do método via padrão externo, amostra e padrão são irradiados simultaneamente, garantindo assim as mesmas condições de irradiação. A massa é então determinada a partir da relação das atividades da amostra e do padrão. A equação geral que fornece a atividade induzida por um fluxo de nêutrons é bem estabelecida na literatura [3,4] e expressa por:

$$A = \frac{N_A \phi \sigma_m f F}{M} (1 - e^{-\lambda T_i}) \quad (1)$$

onde

- $N_A$  número de Avogadro,  
 $\phi$  fluxo de nêutrons,  
 $\sigma$  secção de choque,  
 $m$  massa da amostra,  
 $f$  fração do isótopo que irá sofrer a ativação,  
 $F$  fração do elemento ativado,  
 $T_i$  tempo de irradiação,  
 $M$  massa atômica do elemento,  
 $\lambda$  constante de decaimento.

Desta forma, a razão entre as atividades (amostra e padrão) reduz-se a,

$$\frac{A_a}{A_p} = \frac{m_a}{m_p} \quad (2)$$

onde:

- $A_a$  atividade da amostra,  
 $A_p$  atividade do padrão,  
 $m_a$  massa do elemento na amostra,  
 $m_p$  massa do elemento no padrão.

Na prática, após a irradiação, amostra e padrão são submetidos à contagem utilizando o mesmo arranjo experimental, ou seja, a atividade passa a ser expressa pela taxa de contagem. Entretanto, apesar de ser um procedimento simples, em medidas que envolvam elementos de meia-vida muito curta tem-se a necessidade de dois sistemas de medidas para execução simultânea das contagens, mas este procedimento introduz várias fontes de incertezas (reprodução da geometria, eficiência de detecção, etc).

No caso do emprego do método via padrão interno o procedimento consiste em irradiar uma mistura homogênea de amostra e padrão que contenha um elemento com meia-vida próxima à meia-vida do elemento a ser analisado na amostra. Neste caso a razão entre as contagens da amostra e padrão resulta em:

$$\frac{m_a}{C_a} = \frac{f \cdot m_m}{C_m} \quad (3)$$

onde:

- $C_a$  contagem da amostra,  
 $C_m$  contagem do padrão,  
 $m_a$  massa da amostra,

$m_m$  massa do elemento tomado como padrão,  
 $f$  fator que reúne as constantes físicas dos dois elementos envolvidos (elemento a ser determinado e o padrão); este fator pode ser determinado irradiando-se previamente uma mistura de compostos conhecidos dos dois elementos envolvidos no processo.

Apesar de ser um método também simples, é destrutivo além de ser necessário o preparo de um conjunto amostra - padrão para cada elemento que se deseja determinar.

### Método paramétrico

Este método de análise é pouco utilizado na prática pois necessita do conhecimento do fluxo de nêutrons e das secções de choque envolvidas. Entretanto, trata-se de uma ferramenta muito útil e economicamente viável (pois dispensa o uso de padrões) principalmente quando o fluxo de nêutrons pode ser estabelecido com precisão como no caso do uso de fontes de nêutrons ( $^{239}\text{PuBe}$ ,  $^{241}\text{AmBe}$  ou  $^{252}\text{Cf}$ ) que, em função da meia-vida longa, geram feixe de nêutrons estável.

A medida do fluxo de nêutrons pode ser realizada utilizando detectores de ativação. A escolha do tipo de detector depende principalmente da magnitude da secção de choque, da magnitude do feixe de nêutrons, do tempo de irradiação e das propriedades de fabricação do detector de ativação. Levando em consideração que em um reator nuclear as temperaturas são elevadas, os detectores de ativação devem possuir alto ponto de fusão; devem ser confeccionados de material extremamente puro (> 99%), para evitar a interferência de reações competitivas e possuir dimensão diminuta. Dentro destas especificações utiliza-se preferencialmente detectores sólidos metálicos. Particularmente, para determinação de fluxo de nêutrons térmicos o ouro, o índio e o disprósio são utilizados, sendo o Au altamente recomendado em função da precisão dos parâmetros nucleares envolvidos [1]. Entretanto, quando esses detectores são irradiados em um fluxo de nêutrons a atividade resultante tem tanto a contribuição de nêutrons térmicos como epitérmicos, descrita por [5]:

$$A_{\text{Au}} = A_{\text{th}} + A_{\text{ep}} \quad (4)$$

onde:

$A_{\text{Au}}$  é atividade de saturação no detetor de ativação de ouro,

$A_{\text{th}}$  é a atividade de saturação devido aos nêutrons térmicos,

$A_{\text{ep}}$  é a atividade de saturação devido aos nêutrons epitérmicos.

Isto significa que tanto a contribuição de nêutrons térmicos como de epitérmicos precisam ser obtidas. Para esta finalidade, utiliza-se a técnica da Razão de cádmio,

descrita no capítulo 4, que permite a determinação do fluxo de nêutrons pela expressão:

$$\phi_n = \frac{A_{Au}M}{mN_A \sigma k_T} \left( 1 - \frac{F_{cd}}{R_{cd}} \right) \quad (5)$$

onde:

$M$  massa atômica do elemento,

$N_A$  número de Avogadro,

$F_{cd}$  fator de cádmio tabelado [6],

$R_{cd}$  razão de cádmio obtida experimentalmente pela irradiação do detector de ativação (nu e coberto com Cd),

$m$  massa da amostra,

$\sigma$  secção de choque de ativação,

$k_t$  fator de perturbação do fluxo; na prática pode-se utilizar detectores de ativação suficientemente finos de modo que os efeitos de perturbação do fluxo neutrônico sejam desprezíveis [7-9].

Considerando-se que um intervalo de tempo decorre entre o final da irradiação e o início da contagem, a atividade induzida na amostra deve ser corrigida segundo a lei do decaimento radioativo:

$$A = A_0 e^{-\lambda \cdot T_e} \quad (6)$$

onde:

$A$  é a atividade da amostra após um tempo de espera decorrido entre o término da irradiação e o início da contagem ( $T_e$ ).

Desta forma a equação (2) passa a ser expressa por:

$$A_0 = \frac{N_A \phi \sigma f F}{M} (1 - e^{-\lambda T_i}) (e^{-\lambda T_e}) \quad (7)$$

onde:

$T_e$  tempo de espera (período entre o término da irradiação e o início da contagem)

Na prática, pode-se obter a atividade de uma amostra por meio de um sistema de contagem conhecendo-se a eficiência de detecção para a energia da transição gama de interesse usando a expressão:

$$A = \frac{C_\gamma \lambda}{\epsilon_\gamma I_\gamma (1 - e^{-\lambda T_e})} \quad (8)$$

onde:

$C_\gamma$  área da transição gama discriminada

- $\epsilon_\gamma$  eficiência de detecção na energia da transição gama discriminada  
 $I_\gamma$  intensidade da transição gama discriminada  
 $T_c$  tempo de contagem

Analisando-se a equação (5) observa-se que a determinação do fluxo depende da atividade saturada. Para quantificarmos esta atividade teríamos que irradiar o detector de ativação por um período muito longo, isto é, por várias meia-vidas [1], mas na prática isto não é necessário. O procedimento consiste em irradiar o detector de ativação até um valor  $A_0$  suficiente para ser medido num sistema de detecção.

Desta forma a fração do isótopo ativado, pode ser expressa por:

$$F = \frac{\lambda M C_\gamma e^{\lambda T_c}}{m N_A \epsilon_\gamma \sigma \phi I_\gamma (1 - e^{-\lambda T_i}) (1 - e^{-\lambda T_c})} \quad (9)$$

Assim, para a determinação de elementos cujos parâmetros:  $\lambda$ ,  $M$ ,  $N_A$ ,  $\sigma$ ,  $f$  e  $I_\gamma$  são bem estabelecidos e o feixe de nêutrons conhecido o método absoluto pode ser aplicado com vantagens (em relação ao Método Comparativo) pois elimina o uso de padrão e permite a ativação e quantificação de vários elementos simultaneamente, o que nem sempre é possível pelo Método Comparativo, como no caso de amostras constituídas por elementos de meia-vida curta, tais como: Al ( $T_{1/2} \sim 2,5$  min), Mg ( $T_{1/2} \sim 10$  min), etc.

### Método semi-paramétrico ( $K_0$ standardization)

O método semi-paramétrico, ou  $K_0$ , vem sendo utilizado de forma crescente pelos laboratórios que fazem ativação neutrônica em todo o mundo. A principal vantagem deste método é eliminar as incertezas provenientes da utilização de um padrão e da utilização de parâmetros nucleares extraídos da literatura. Na determinação das concentrações a influência destes fatores é substituída pela constante  $K_0$  (determinada experimentalmente). A constante  $K_0$  é uma razão composta pela parte independente do equipamento irradiador e do sistema de detecção. Conhecendo esta razão, desde que o irradiador e o sistema de detecção sejam caracterizados, as amostras precisam apenas ser irradiadas juntamente com um comparador de Au e não com padrões para cada elemento. O parâmetro  $K_0$  é definido como:

$$K_0 = \frac{M_c \theta_a \sigma_{0,a} I_{\gamma a}}{M_a \theta_c \sigma_{0,c} I_{\gamma c}} \quad (10)$$

onde, para a amostra (a) e para o comparador (c),

- $M$  massas atômicas,  
 $\theta$  abundâncias isotópicas,

$\sigma$  secção de choque para nêutrons térmicos,  
 $I_\gamma$  intensidade da transição gama.

Os constituintes do  $K_0$  podem ser encontrados na literatura, nem sempre com boa precisão, porém os valores do  $K_0$  são determinados experimentalmente, sendo que atualmente já existem valores para 140 reações  $(n,\gamma)$  [10]. Se este método exclui as incertezas relacionadas ao uso de um padrão, por outro lado ele inclui as incertezas do  $K_0$ , que sabidamente são menores que as primeiras (não excedendo 3,5%). Outra vantagem do método é que as amostras e o detector (comparador) de Au podem ter diferentes formas e diferentes características de absorção de nêutrons e raios gama.

### Procedimento Experimental

O procedimento prático da análise por ativação neutrônica pode ser resumido em duas etapas: a irradiação com nêutrons da amostra em questão e a espectrometria gama ou seja, a obtenção e análise qualitativa e quantitativa do espectro  $\gamma$  da amostra irradiada. Na primeira etapa, as amostras devem ser acondicionadas em recipientes apropriados (usualmente frascos de geometria cilíndrica de polietileno ou de Al) e então submetidas ao fluxo de nêutrons. Se o objetivo for analisar elementos com meia-vida curta a obtenção do espectro de raios gama deve ser iniciada logo após a irradiação; para análise de elementos com meia-vida longa é recomendável esperar algum tempo, após a ativação, para que os elementos de meia-vida curta decaiam e não interfiram na análise. Como exemplo (ver na Tabela 1) para a energia do raio gama de 166 keV onde se pode ter a ativação do bário de meia-vida curta (~85 minutos) e cério de meia-vida longa (~134 dias).

A aquisição de espectro de raios gama pode ser feita em um espectrômetro constituído de um detector semicondutor, por exemplo, associado a um sistema eletrônico calibrado tanto para energia como para sua eficiência de detecção, discussão detalhada no Capítulo 3. Para que os efeitos secundários de detecção (soma e empilhamento de raios gama) sejam minimizados a amostra deve ser posicionada a uma certa distância da face do detector. A aquisição dos espectros, por sua vez, deve ser dimensionada em intervalos de tempo associados à meia-vida do elemento que se deseja medir e armazenados em microcomputador. A identificação dos elementos ativados é feita via propriedades atribuídas ao raio gama e sua quantificação pela área associada. Na Tabela 1 é apresentado um sumário que relaciona as propriedades do isótopo radioativo, gerado pela ativação com nêutrons térmicos, com as energias dos raios gama emitidos no processo de desexcitação. Por esta tabela é possível observar que, embora alguns elementos possam gerar mais de

um isótopo, tais como: bromo, cálcio, cério, índio, etc, é possível escolher o raio gama a ser utilizado através da análise de interferências entre energias.

| Elemento  | Isótopo<br>ativado | $T_{1/2}$<br>[11] | $\sigma(b)$<br>[12] | $E_{\gamma}$ (keV)<br>[11]                    |
|-----------|--------------------|-------------------|---------------------|---|
| Alumínio  | $^{28}\text{Al}$   | 2,24 min          | 0,231 (3)           | *1779   |
| Amerício  | $^{242}\text{Am}$  | 16,02 h           | 602 (9)             | *42   |
| Antimônio | $^{124}\text{Sb}$  | 60,2 d            | 3,8 (2)             | 603, 646, 723, *1691                          |
| Arsênio   | $^{76}\text{As}$   | 26,32 h           | 4,190 (20)          | *559, 563, 657,<br>1213, 1216, 1229           |
| Bário     | $^{131}\text{Ba}$  | 11,8 d            | 8,50 (30)           | 124, 216, *373, 496                           |
| Bário     | $^{139}\text{Ba}$  | 84,63 min         | 0,470 (20)          | *166  |
| Bromo     | $^{80}\text{Br}$   | 17,68 min         | 11,1 (40)           | *616  |
| Bromo     | $^{82}\text{Br}$   | 35,30 h           | 2,69 (9)            | 554, 619, 698, *777,<br>828, 1044, 1317, 1475 |
| Cádmio    | $^{109}\text{Cd}$  | 462,6 d           | 1,41 (35)           | *88   |
| Cádmio    | $^{115}\text{Cd}$  | 53,46 h           | 6,9 (7)             | 336, 492, *528                                |
| Cálcio    | $^{47}\text{Ca}$   | 4,54 d            | 0,75 (10)           | 489, 808, 1297                                |
| Cálcio    | $^{49}\text{Ca}$   | 8,718 min         | 1,09 (14)           | *3084   |
| Cério     | $^{139}\text{Ce}$  | 133,66 d          | 8,7 (61)            | *166  |
| Cério     | $^{141}\text{Ce}$  | 32,5 d            | 0,54 (4)            | *145  |
| Césio     | $^{134}\text{Cs}$  | 2,06 a            | 28,7 (7)            | 569, *605, 796                                |
| Cloro     | $^{38}\text{Cl}$   | 37,24 min         | 0,433 (6)           | *1642, 2168                                   |
| Cobalto   | $^{60}\text{Co}$   | 5,27 a            | 38,2 (7)            | *1173, 1333                                   |
| Cobre     | $^{64}\text{Cu}$   | 12,7 h            | 4,44 (26)           | 511, *1345                                    |
| Cobre     | $^{66}\text{Cu}$   | 5,09 min          | 2,170 (30)          | *1039   |
| Cromo     | $^{51}\text{Cr}$   | 27,2 d            | 15,2 (4)            | *320  |
| Disprósio | $^{165}\text{Dy}$  | 2,33 h            | 2656 (66)           | *95, 362, 545                                 |

| Elemento  | Isótopo<br>ativado  | $T_{1/2}$<br>[11] | $\sigma(b)$<br>[12] | $E_{\gamma}(keV)$<br>[11]                                   |
|-----------|---------------------|-------------------|---------------------|---|
| Enxofre   | $^{37}\text{S}$     | 5,05 min          | 0,242 (12)          | *3103   |
| Escândio  | $^{46}\text{Sc}$    | 18,75 d           | 23,4 (4)            | *143  |
| Estanho   | $^{113}\text{Sn}$   | 115,09 d          | 0,42 (8)            | *392  |
| Estrôncio | $^{87}\text{Sr}$    | 2,81 h            | 0,81 (4)            | *388  |
| Érbio     | $^{171}\text{Er}$   | 7,52 h            | 8,85 (30)           | 112, 296, *308  |
| Európio   | $^{152}\text{Eu}$   | 13,33 a           | 8790 (90)           | 122, 245, 344, 411, 443, 779<br>867, 964, 1085, 1112, *1408 |
| Ferro     | $^{59}\text{Fe}$    | 44,5472 d         | 1,03 (10)           | *1099, 1292   |
| Flúor     | $^{20}\text{F}$     | 11,03 s           | 0,01009 (70)        | *1634   |
| Gadólínio | $^{153}\text{Gd}$   | 241,6 d           | 1100 (100)          | 70, *97, 103  |
| Gálio     | $^{72}\text{Ga}$    | 14,10 h           | 4,41 (18)           | 630, *839, 2202   |
| Germânio  | $^{75}\text{Ge}$    | 82,78<br>min      | 0,143 (16)          | *265  |
| Germânio  | $^{77}\text{Ge}$    | 11,30 h           | 0,086 (9)           | *211,216, *264, 367, 416                                    |
| Háfnio    | $^{175}\text{Hf}$   | 70,0 d            | 2337 (750)          | *343  |
| Háfnio    | $^{181}\text{Hf}$   | 42,39 d           | 13,04 (30)          | 133, 346, *482  |
| Índio     | $^{114}\text{In}^m$ | 49,51 d           | 9,45 (38)           | *190, 558, 725  |
| Índio     | $^{116}\text{In}^m$ | 54,15<br>min      | 154 (9)             | 417, 819, *1097, 1294                                       |
| Iodo      | $^{128}\text{I}$    | 24,99<br>min      | 7,950 (200)         | *443, 527   |
| Írídio    | $^{192}\text{Ir}^m$ | 1,45 min          | 279 (3)             | *58   |
| Itérbio   | $^{169}\text{Yb}^m$ | 32,02 d           | 3660 (50)           | 63, 110, 131, *177, 198, 308                                |
| Ítrio     | $^{90}\text{Y}^m$   | 3,19 hd           | 1,310 (40)          | *203, 483   |

| Elemento   | Isótopo ativado     | $T_{1/2}$<br>[11]   | $\sigma(b)$<br>[12] | $E_{\gamma}$ (keV)<br>[11]                          |
|------------|---------------------|---------------------|---------------------|---|
| Lantânio   | $^{140}\text{La}$   | 40,27 h             | 9,13 (2)            | 329, 433, 487,<br>752, 816, 868,<br>920, 925, *1596 |
| Lutécio    | $^{177}\text{Lu}$   | 6,71 d              | 2100 (150)          | 113, *208   |
| Magnésio   | $^{27}\text{Mg}$    | 9,46 min            | 0,0392 (1)          | 844, *1014  |
| Manganês   | $^{56}\text{Mn}$    | 2,58h               | 13,32 (13)          | 847, *1811, 2113                                    |
| Mercúrio   | $^{203}\text{Hg}$   | 46,61 d             | 4,6 (7)             | *279  |
| Molibdênio | $^{99}\text{Mo}$    | 65,94 h             | 0,1917 (53)         | *181, 740   |
| Molibdênio | $^{101}\text{Mo}$   | 14,6 min            | 0,1888 (69)         | 192, 506, *591, 1013                                |
| Neodímio   | $^{149}\text{Nd}$   | 1,72 h              | 2,45 (14)           | 114, *211, 1181                                     |
| Nióbio     | $^{94}\text{Nb}$    | $2,03 \cdot 10^4$ a | 1,170 (20)          | *703, 871   |
| Níquel     | $^{65}\text{Ni}$    | 2,52h               | 1,60 (10)           | 366, 1115, *1482                                    |
| Ósmio      | $^{193}\text{Os}$   | 30,5 h              | 2,00 (10)           | 73, 139, 280, 322,<br>387, *461, 557                |
| Ouro       | $^{198}\text{Au}$   | 2,70 d              | 98,65 (20)          | *412, 676   |
| Oxigênio   | $^{19}\text{O}$     | 26,91 s             | 0,00016 (1)         | *197,1357   |
| Paládio    | $^{109}\text{Pd}$   | 13,7 h              | 8,5 (9)             | *88   |
| Platina    | $^{191}\text{Pt}$   | 2,96 d              | 150,2 (54)          | 82, 360, 409, *594                                  |
| Potássio   | $^{42}\text{K}$     | 12,36h              | 1,57 (17)           | *1525   |
| Prata      | $^{110}\text{Ag}^m$ | 249,76 d            | 4,13 (8)            | *658, 678, 707, 764,<br>885, 938, 1384, 1505        |
| Rênio      | $^{186}\text{Re}$   | 90,64 h             | 127 (13)            | 122, *137   |
| Ródio      | $^{104}\text{Rh}^m$ | 42,3 s              | 133 (1)             | *556  |
| Rubídio    | $^{86}\text{Rb}$    | 18,66 d             | 0,394 (18)          | *1077   |
| Rutênio    | $^{103}\text{Ru}$   | 39,26 d             | 1,23 (13)           | *497, 610   |

| Elemento   | Isótopo ativado     | $T_{1/2}$<br>[11] | $\sigma(b)$<br>[12] | $E_{\gamma}$ (keV)<br>[11]                    |
|------------|---------------------|-------------------|---------------------|---|
| Samário    | $^{153}\text{Sm}$   | 46,37 h           | 224 (7)             | *70, 103                                      |
| Selênio    | $^{75}\text{Se}$    | 119,77 d          | 51,8 (12)           | 121, 136, *265, 280, 401                      |
| Selênio    | $^{77}\text{Se}$    | 17,36 s           | 17,8 (25)           | *162  |
| Silício    | $^{31}\text{Si}$    | 2,62 h            | 0,107 (3)           | *1266   |
| Sódio      | $^{24}\text{Na}$    | 14,96h            | 0,536 (8)           | *1369, 2754                                   |
| Tântalo    | $^{182}\text{Ta}$   | 114,5 d           | 21,2 (1)            | 68, 100, 152, 222,<br>1121, 1189, *1221, 1231 |
| Tecnécio   | $^{100}\text{Tc}$   | 15,8 s            | 22,8 (18)           | *540,591                                      |
| Telúrio    | $^{123}\text{Te}^m$ | 119,70 d          | 2,7 (9)             | *159  |
| Titânio    | $^{51}\text{Ti}$    | 5,76 min          | 0,179 (3)           | *320, 929                                     |
| Tório      | $^{233}\text{Th}$   | 22,3 min          | 7,34 (9)            | 29, 87, 95, *459, 670                         |
| Tungstênio | $^{187}\text{W}$    | 23,9 h            | 39,5 (23)           | 72, 134, *480,<br>552, 618, 686, 773          |
| Urânio     | $^{235}\text{U}$    | 7,10E08 a         | 720 (15)            | 109, 144, 163, *186                           |
| Urânio     | $^{239}\text{U}$    | 23,45 min         | 7,76 (6)            | *75   |
| Vanádio    | $^{52}\text{V}$     | 3,75 min          | 4,6 (2)             | 1434  |
| Zinco      | $^{65}\text{Zn}$    | 243,9 d           | 0,715 (35)          | *1116   |
| Zinco      | $^{69}\text{Zn}^m$  | 13,76 h           | 0,072 (4)           | *439  |
| Zircônio   | $^{95}\text{Zr}$    | 64,02 d           | 0,0478 (13)         | 724, *757                                     |

**Tabela 1** Sumário que relaciona as propriedades do isótopo radioativo ( $T_{1/2}$  e  $\sigma$ ) com as energias dos raios gama ( $E_{\gamma}$ ) emitidos.

\* energia recomendada, entretanto, na prática é necessário primeiramente uma análise espectroscópica do material ativado de modo que a escolha do isótopo bem como da energia do raio gama, sejam devidamente selecionados.

## Referências

- [1] KNOLL, G.F. *Radiation detection and measurements*. New York, NY, Wiley, 1979.
- [2] HEVESY, G. & LEVI, H. Dansk Videnskab. Selsk. Math. Fys. Medd. 14, 24 (1936).
- [3] TRAVESI, A. *Analisis por activación neutrónica. Teoría, práctica y aplicaciones*. Madrid: J.E.N., 1975.
- [4] PENTEADO F<sup>0</sup>, A.C. *Irradiações no reator e cálculos de ativação*. IEA-Inf-23, São Paulo, 1972.
- [5] YORIYAZ, H.; FANARO, L.C.C.B., DINIZ, R.; JEREZ, R. Methodology for evaluation and experimental measurements of parameters of the core of research reactor IEA-R1 using the Monte Carlo method. *IAEA Report, Progress Report 2*, October, 2000.
- [6] MUECK, K. & BENSCH, F. Cadmium correction factors of several thermal neutron foil detectors. *J. Nucl. Eng.*, 27, 677-88, 1973.
- [7] MCLEROY, W.N.; BERG, S.; CROCKETT, T.; HAWKINS, R.G. *SAND II - a computer-automated interactive method for neutron flux-spectra determination by foil activation*. AFWL-TR-67-41, Sept. 1967.
- [8] PROFIO, A.E. *Experimental reactor physics*. New York, NY, Wiley, 1976.
- [9] RITCHIE, R.H. & ELDRIDGE, H.B. Thermal neutron flux depression by absorbing foils. *Nucl. Sci. Eng.*, 8, 300-11, 1960.
- [10] Atomic Nuclear Data Tables, 58, 47-67, 2003.
- [11] FIRESTONE, R. B., SHIRLEY, V. S.; BROWNE, E., *Table of Isotopes*, John Wiley & Sons, New York, 1996.
- [12] *acesso em: 30 de setembro de 2006.*  
<http://www.nndc.bnl.gov/exfor/cinda.htm>