

IEN-SEPRAD-04/86

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR

INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

ESTUDO DA ATIVAÇÃO DAS PEÇAS COMPONENTES DO CÍCLOTRON CV-28

PATRICIA WIELAND FAJARDO

IEN - SUPRAD-04/86

AGOSTO, 1986

Seção de Proteção Radiológica

RIO DE JANEIRO - BRASIL

SUMÁRIO

	Pag.
1. INTRODUÇÃO	1
2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO CÍCLOTRON	1
3. PEÇAS COMPONENTES COM POTENCIAL DE ATIVAÇÃO	4
4. POSSÍVEIS REAÇÕES NUCLEARES NAS PEÇAS COMPONENTES DO CÍCLOTRON	6
5. DADOS EXPERIMENTAIS	14
6. CONCLUSÃO	16

APÊNDICES

A. ALGUNS RADIONUCLÍDEOS FORMADOS POR ATIVAÇÃO DAS PEÇAS COMPONENTES DO CÍCLOTRON E SUAS ENERGIAS CARACTERÍSTICAS	17
---	----

REFERÊNCIAS	28
-------------------	----

1. INTRODUÇÃO

O cíclotron CV-28, isócrono, compacto, de energia variável é um acelerador de partículas carregadas e encontra aplicação em inúmeros domínios como por exemplo: produção de radioisótopos, produção de nêutrons, análise de danos por irradiação, análise por ativação, etc.

Durante a produção do feixe de partículas, as peças componentes do interior do cíclotron são irradiadas e ficam radioativas. Devido ao fato de que o cíclotron exige manutenção, o conhecimento dos radionuclídeos presentes é de primordial importância do ponto de vista da radioproteção.

Examinando-se a função excitação de uma reação nuclear, verifica-se se determinada reação pode ocorrer e assim produzir um radionuclídeo. Este estudo, então, verifica quais são os radionuclídeos formados nas peças componentes pelas partículas carregadas, baseado em literatura disponível.

2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO CÍCLOTRON

O ponto de partida para produção de um feixe acelerado de partículas é a ionização de um gás (ex: H₂, D₂, He³, He⁴) pelo "ion source", no interior de uma câmara de vácuo. O íon liberado sofre ação do campo elétrico entre eletrodos chamados "dês" e é atraído na direção do "dê" que estiver negativamente carregado. O forte campo magnético perpendicular à trajetória da partícula faz com que esta se curve num semicírculo e quando o intervalo entre os eletrodos é atingido, os potenciais elétricos são revertidos e a partícula é novamente acelerada. Esse processo continua e a partícula descreve uma órbita espiralada.

A cada instante a força eletromagnética (F) fornece a força centrípeta (F_c) necessária à trajetória circular.

$$F = qvB = F_c = \frac{mv^2}{r} \quad (2.1)$$

$$v = \frac{qBr}{m} \quad (2.2)$$

onde:

B = intensidade do campo magnético

q = carga do íon

v = velocidade da partícula

r = raio de curvatura da trajetória

O tempo para completar uma órbita circular é:

$$t = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{B} \frac{m}{q}$$

Quando se alcança energia e corrente requeridas, um defletor eletrostático submetido a uma alta tensão contínua permite desviar o feixe na direção do canal magnético. O canal magnético focaliza o feixe para saída da câmara de vácuo através da "beam valve". (Fig. 3.1)

A tabela 2.1 apresenta as partículas carregadas que podem ser aceleradas no ciclotron e os respectivos limites de energia fornecidos pelo ciclotron CV-28.

Tabela (2.1) FAIXAS DE ENERGIA FORNECIDA PELO CÍCLOTRON CV-28.

Partícula	Energia (Mev)
p	2 - 24
d	3 - 14
${}^2\text{He}^{3++}$	4 - 36
α	7 - 28

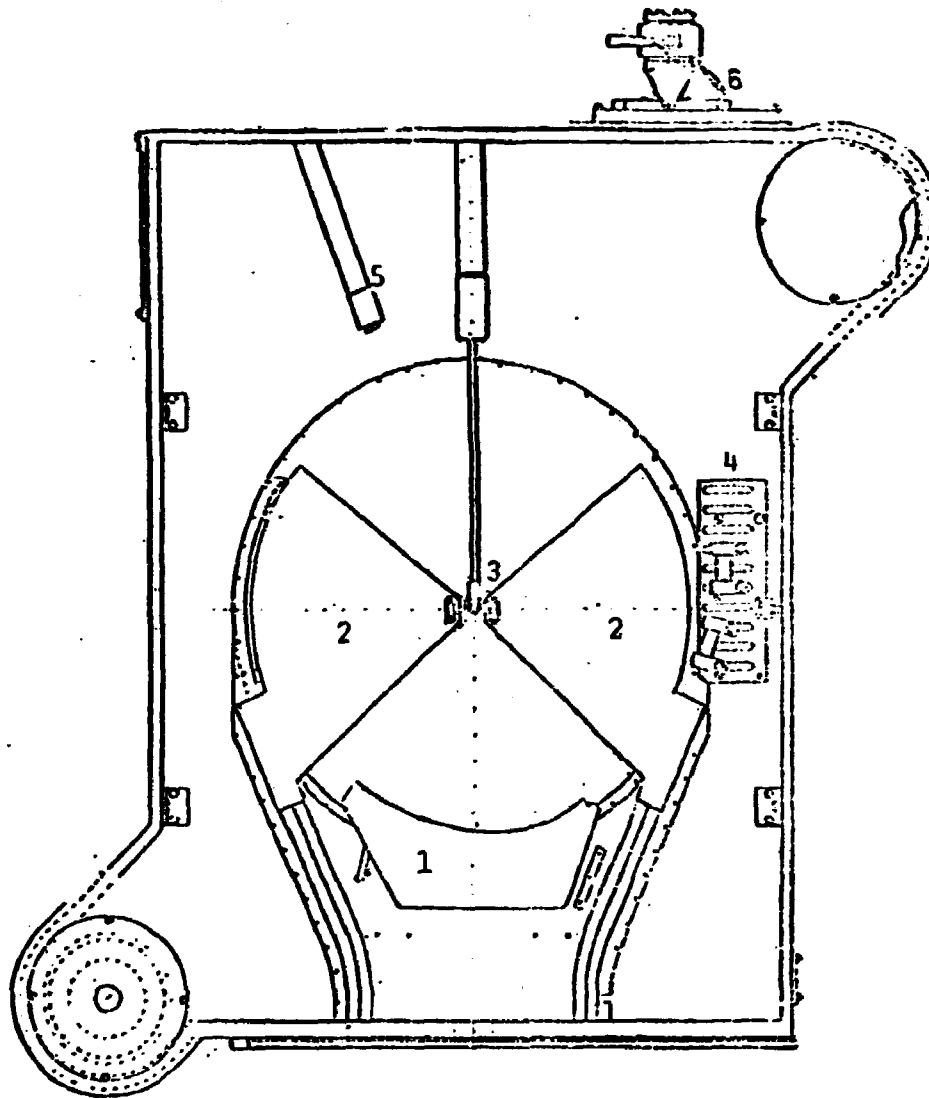


Fig.3.1. Desenho esquemático do interior do ciclotron: 1) Defletor; 2) Eletrodos; 3) Ion source; 4) Canal magnético; 5) Probe; 6) Beam valve.

3. PEÇAS COMPONENTES COM POTENCIAL DE ATIVAÇÃO

As peças com maior potencial de ativação são:

Defletor: é uma peça de Cobre composta por uma carcaça, pelo septum, pré-septum e bar. A parte que fica mais ativa é o pré-septum, onde o feixe incide diretamente. A dose na superfície¹ do pré-septum pode chegar a 800 mR/h 12 horas após operação típica. Outra parte que fica bastante ativa é o "bar", que fica no interior do defletor. Essa peça geralmente apresenta um ponto de ativação máxima². Anteriormente, usava-se algumas partes de defletor formadas de Tungstênio.

Canal Magnético: é composto essencialmente por Ferro. Foram medidas doses da ordem de 200 mR/h 12 horas após operação.

"Ion Source": é uma peça composta por uma base de aço, haste de Cobre e um catodo de Tântalo na extremidade. A parte mais ativa dessa peça é aproximadamente na metade da haste onde incide o feixe com maior raio de trajetória. Observa-se também que o catodo de Tântalo fica ligeiramente ativo.

Eletrodos: são formados de Cobre. Um pequeno desnível dessa peça poderá significar formação de ponto de ativação máxima.

1 - As taxas de exposição foram medidas com as peças no interior da máquina com o detetor GM Teletector Total 6112.
 2 - Um ponto de ativação máxima é devido a incidência localizada do feixe de partículas. Esse ponto é facilmente distinguido pois o dano observável causado à peça de metal devido ao feixe de radiação, é igual ao dano causado por um feixe intenso e colimado de calor.

Outros Materiais: outros materiais podem ser ativados pela incidência do feixe de radiação como por exemplo: latão (Zn+Cu): encontrado nas bases da cerâmica usada como isolante elétrico e também nos parafusos de fixação.
Alumínio: carcaça do cíclotron.

Os elementos naturais encontrados no cíclotron estão listados na Tabela (3.1), juntamente com a abundância isotópica.

TABELA (3.1)

Isótopo	Abundância (%)
$_{13}\text{Al}^{27}$	100
$_{26}\text{Fe}^{54}$	5,8
$_{26}\text{Fe}^{56}$	91,7
$_{26}\text{Fe}^{57}$	2,2
$_{26}\text{Fe}^{58}$	0,3
$_{29}\text{Cu}^{63}$	69,17
$_{29}\text{Cu}^{65}$	30,83
$_{30}\text{Zn}^{64}$	48,6
$_{30}\text{Zn}^{66}$	27,9
$_{30}\text{Zn}^{67}$	4,1
$_{30}\text{Zn}^{68}$	18,8
$_{30}\text{Zn}^{70}$	0,6
$_{73}\text{Ta}^{181}$	99,988
$_{74}\text{W}^{180}$	0,13
$_{74}\text{W}^{182}$	26,3
$_{74}\text{W}^{183}$	14,3
$_{74}\text{W}^{184}$	30,67
$_{74}\text{W}^{186}$	28,6

4. POSSÍVEIS REAÇÕES NUCLEARES NAS PEÇAS COMPONENTES DO CÍCLOTRON

A função excitação de uma reação nuclear relaciona energia do projétil e seção de choque do material. Um desenho esquemático da forma característica de uma função excitação para a reação nuclear $I(i,j)J$ com o projétil carregado i , um nuclídeo alvo I , partícula emitida j e nuclídeo produto J é mostrado na figura (4.1).

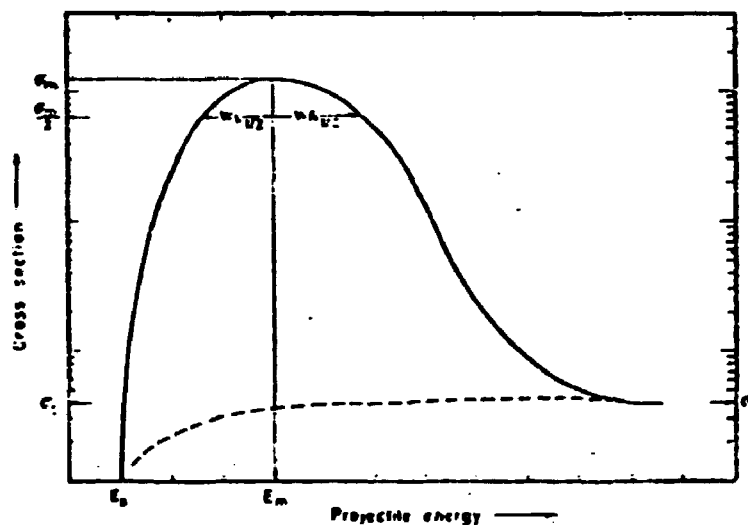


Fig. (4.1) Função Excitação Típica

As funções excitação são caracterizadas pelas seguintes quantidades:

E_s - energia de partida;

σ_m - seção de choque máxima;

E_m - energia correspondente a σ_m ;

σ_t - seção de choque da cauda;

$WR_{1/2}$ - largura à meia altura máxima ($\sigma_m/2$) direita e

$WL_{1/2}$ - largura à meia altura máxima ($\sigma_m/2$) esquerda em relação a E_m

A energia mínima do projétil requerida para iniciar uma reação é a energia de threshold. No caso não relativístico:

$$E_{thr} = \begin{cases} -Q \left[1 + (A_i / A_I) \right] & \text{se } Q < 0 \\ 0 & \text{se } Q \geq 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

onde:

A_i , A_I são os números de nucleons do projétil i e do nuclídeo alvo I respectivamente, Q é o valor Q da reação $I(i,j)J$ e é definido como:

$$Q = \left[(M_I + M_i) - (M_j + M_J) \right] c^2 \quad (4.2)$$

Onde os M 's são as massas do estado fundamental do nuclídeo alvo I , projétil i , partícula j emitida e nuclídeo produto J .

Na literatura encontra-se funções excitação determinadas experimentalmente assim como os valores de threshold da reação.

Tomando como referência o volume 5 parte b do Landolt-Börnstein⁽²⁾, foram verificadas as reações que tem probabilidade de ocorrer através da comparação do threshold com as energias das partículas fornecidas pelo ciclotron e também através da análise da seção de choque do gráfico de função excitação para cada reação possível. Exemplos de funções excitação aplicáveis ao caso do ciclotron estão na figura (4.2).

A figura (4.2a) mostra funções excitação do Cu^{63} e Cu^{65} na reação (p,n). O threshold da reação Cu^{63} (p,n) Zn^{65} é 4,2 MeV e da reação Cu^{65} (p,n) Zn^{65} é 2,2 MeV.

A figura (4.2b) mostra funções excitação do Zn^{64} , Zn^{66} , Zn^{67} na reação (p,n). Os thresholds respectivos são: 8,0 MeV, 6,0 MeV e 1,8 MeV.

O Quadro (4.1) resume as reações possíveis de ocorrer dentro da faixa de energia de cada partícula, mostrando os radionuclídeos formados. Os filhos radioativos desses radionuclídeos estão entre parênteses. Note-se que mesmo os nuclí

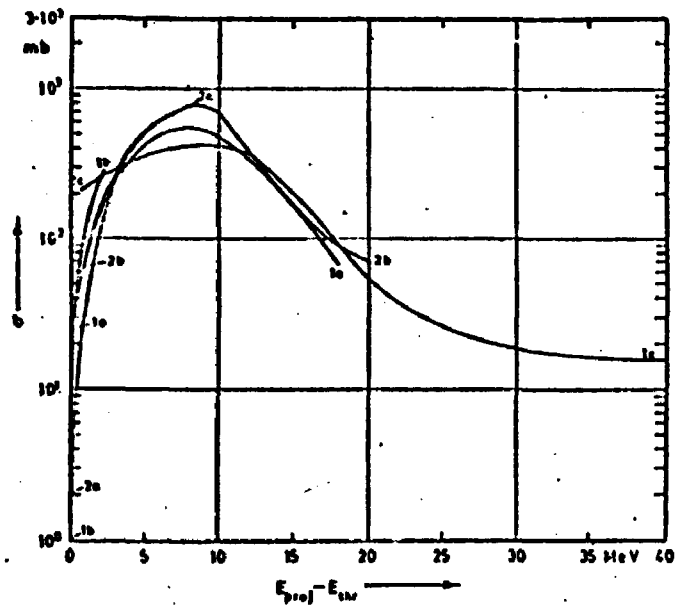
deos com pouca probabilidade de serem formados, também estão listados.

A Tabela (4.1) fornece, ordenados por número atômico, os radionuclídeos formados nas peças do ciclotron e sua respectiva meia vida.

Quadro (4.1) PRODUTOS FORMADOS DAS REAÇÕES NUCLEARES COM AS PEÇAS DO CÍCLOTRON CV-28

partícula incidente alvo	p	d	He ³	α
Al ²⁷		Al ²⁸ Fe ⁵⁷ Na ²⁴	Fe ⁵⁷ Na ²⁴ Na ²²	
Fe ⁵⁶	Fe ⁵⁷ (Th ²³²)	Co ⁵⁷ (Fe ⁵⁵) Th ^{232m} Th ^{232g}		Ni ⁵⁷ (Co ⁵⁷) Ni ⁵⁶ (Co ⁵⁶) Co ⁵⁷ Co ⁵⁶ Co ⁵⁵ (Fe ⁵⁵) Fe ⁵⁵ Fe ⁵³ (Th ²³²)
Fe ⁵⁶	Co ⁵⁶	Co ⁵⁷ Co ⁵⁶	Ni ⁵⁷ (Co ⁵⁷) Ni ⁵⁶ (Co ⁵⁶) Co ⁵⁷ Co ⁵⁶ Co ⁵⁵	Co ⁵⁸ Co ⁵⁷
Fe ⁵⁷	Co ⁵⁷			Th ²³²
Cu ⁶³	Zn ⁶³ Zn ⁶² Cu ⁶² Cu ⁶¹ Ni ⁶⁰	Zn ⁶³ Zn ⁶² (Cu ⁶²) Cu ⁶¹	Ge ⁶³ (Zn ⁶³) Zn ⁶³ Zn ⁶² Zn ⁶¹ (Cu ⁶¹) Cu ⁶⁰ Cu ⁵⁹ Cu ⁵⁸ Cu ⁵⁷ Co ⁵⁶ Co ⁵⁷ Co ⁵⁶	Co ⁶⁶ Co ⁶⁵ (Zn ⁶³) Zn ⁶⁶ Zn ⁶⁵ Cu ⁶⁷

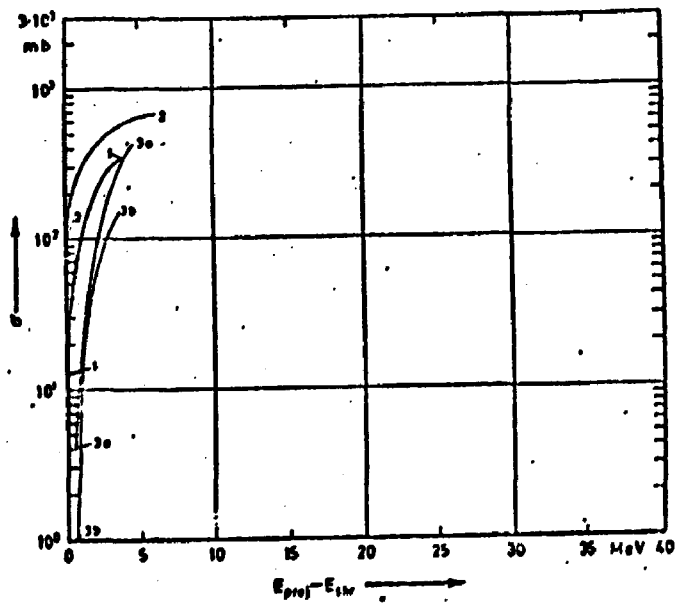
partícula incidente alvo	p	d	lle ²	a
Cu ⁶⁵	Zn ⁶⁵ Zn ⁶³ Cu ⁶⁴	Zn ⁶⁵ Cu ⁶⁴	Ga ⁶⁷ Ga ⁶⁶ Ga ⁶⁵ (Zn ⁶⁵) Zn ⁶⁵ Ni ⁶⁵ Cu ⁶⁴ Ni ⁶⁴ Co ⁶⁰ Fe ⁵⁹	Ga ⁶⁸ Ga ⁶⁷ Ga ⁶⁶ Zn ⁶⁸ Cu ⁶⁷ Cu ⁶⁶ Co ⁶¹
Zn ⁶⁴	Ga ⁶⁴ Cu ⁶³ Cu ⁶⁰	Cu ⁶⁰ Cu ⁶³		Ge ⁶⁸ (Ga ⁶⁸) Ge ⁶⁷ (Ga ⁶⁷) Ge ⁶⁶ (Ga ⁶⁶) Ga ⁶⁷ Ga ⁶⁶ Ga ⁶⁵ (Zn ⁶⁵) Zn ⁶⁵ Zn ⁶³ Zn ⁶² Cu ⁶²
Zn ⁶⁶	Ga ⁶⁶	Ga ⁶⁷ Ga ⁶⁶ Cu ⁶⁴		Ga ⁶⁹ Ga ⁶⁸
Zn ⁶⁷	Ga ⁶⁷	Cu ⁶⁷ Cu ⁶⁴		
Zn ⁶⁸	Ga ⁶⁸ Cu ⁶⁷	Ga ⁶⁸ Zn ⁶⁹ Cu ⁶⁷		Ge ⁷¹
Zn ⁷⁰				Ge ⁷³ Ga ⁷² Zn ⁷² (Ga ⁷²)
Ta ¹⁸¹	W ¹⁸¹ W ¹⁸⁰ W ¹⁷⁹ (Ta ¹⁷⁹) W ¹⁷⁸ (Ta ¹⁸⁰) Ta ^{180m} (Hf ¹⁸⁰) Ta ¹⁷⁹ (Hf ¹⁷⁹)	W ¹⁸¹ Ta ¹⁸²	Re ¹⁸³ Re ¹⁸² Re ¹⁸¹ (W ¹⁸¹) Re ¹⁸⁰ Ta ^{180m} (Hf ¹⁸⁰) Ta ^{179G}	Re ^{180G} Re ¹⁸¹ Re ¹⁸²
W ¹⁸⁰		Re ^{180G} W ¹⁸³		
W ¹⁸⁶		Os ¹⁸⁶ (Os ¹⁸⁶) W ¹⁸⁷ (Os ¹⁸⁷) (Os ¹⁸⁷)	W ¹⁸⁷ (Os ¹⁸⁷) (Os ¹⁸⁷)	



(p,n)

1a: Cu 63
 1b: Cu 63
 1c: Cu 63
 2a: Cu 65
 2b: Cu 65

Fig. (4.2a) FUNÇÕES EXCITAÇÃO DO Cu^{63} e Cu^{65} PARA REAÇÃO (p,n).



(p,n)

1 : Zn 64
 2 : Zn 66
 3a: Zn 67
 3b: Zn 67

Fig. (4.2b) FUNÇÕES EXCITAÇÃO DO Zn^{64} , Zn^{66} e Zn^{67} PARA REAÇÃO (p,n)

Tabela (4.1) RELAÇÃO DE RADIONUCLÍDEOS
FORMADOS NO CÍCLOTRON

nº	nuclídeo	meia vida ⁸
01	$_{11}\text{Na}^{22}$	2,60 a
02	$_{11}\text{Na}^{24}$	15,02 h
03	$_{12}\text{Mg}^{27}$	9,46 m
04	$_{13}\text{Al}^{28}$	2,24 m
05	$_{25}\text{Mn}^{52g}$	5,59 d
06	$_{25}\text{Mn}^{52m}$	21,1 m
07	$_{25}\text{Mn}^{53}$	$3,7 \cdot 10^6$ a
08	$_{25}\text{Mn}^{56}$	2,58 h
09	$_{26}\text{Fe}^{53g}$	8,51 m
10	$_{26}\text{Fe}^{53m}$	2,58 m
11	$_{26}\text{Fe}^{55}$	2,74 a
12	$_{26}\text{Fe}^{59}$	44,50 d
13	$_{27}\text{Co}^{55}$	17,54 h
14	$_{27}\text{Co}^{56}$	78,8 d
15	$_{27}\text{Co}^{57}$	271,8 d
16	$_{27}\text{Co}^{58g}$	70,92 d
17	$_{27}\text{Co}^{60}$	5,27 a
18	$_{27}\text{Co}^{61}$	1,65 h
19	$_{28}\text{Ni}^{56}$	6,10 d
20	$_{28}\text{Ni}^{57}$	36,1 h
21	$_{28}\text{Ni}^{63}$	100,1 a
22	$_{28}\text{Ni}^{65}$	2,52 h
23	$_{29}\text{Cu}^{60}$	23,2 m

nº	nuclídeo	meia vida
24	$_{29}\text{Cu}^{61}$	3,41 h
25	$_{29}\text{Cu}^{62}$	9,74 m
26	$_{29}\text{Cu}^{64}$	12,70 h
27	$_{29}\text{Cu}^{66}$	5,10 m
28	$_{29}\text{Cu}^{67}$	2,58 d
29	$_{30}\text{Zn}^{62}$	9,25 h
30	$_{30}\text{Zn}^{63}$	38,1 m
31	$_{30}\text{Zn}^{65}$	244,1 d
32	$_{30}\text{Zn}^{69\text{m}}$	13,76 h
33	$_{30}\text{Zn}^{72}$	46,5 h
34	$_{31}\text{Ga}^{64}$	2,63 m
35	$_{31}\text{Ga}^{65}$	15,2 m
36	$_{31}\text{Ga}^{66}$	9,40 h
37	$_{31}\text{Ga}^{67}$	3,26 d
38	$_{31}\text{Ga}^{68}$	68,1 m
39	$_{31}\text{Ga}^{72}$	14,10 h
40	$_{32}\text{Ge}^{66}$	2,27 h
41	$_{32}\text{Ge}^{67}$	1,87 m
42	$_{32}\text{Ge}^{68}$	270,8 d
43	$_{32}\text{Ge}^{69}$	39,05 h
44	$_{32}\text{Ge}^{71}$	11,8 d
45	$_{72}\text{Hf}^{179\text{m}}$	25,1 d
46	$_{72}\text{Hf}^{180\text{m}}$	5,5 h
47	$_{73}\text{Ta}^{178\text{m}}$	2,45 h
48	$_{73}\text{Ta}^{178\text{g}}$	9,31 m

nº	nuclídeo	meia vida
49	${}_{73}\text{Ta}^{179}$	1,82 a
50	${}_{73}\text{Ta}^{180m}$	$>5,6 \cdot 10^{13}$ a
51	${}_{73}\text{Ta}^{182g}$	115,0 d
52	${}_{73}\text{Ta}^{183}$	5,1 d
53	${}_{74}\text{W}^{178}$	21,7 d
54	${}_{74}\text{W}^{179}$	37,5 m
55	${}_{74}\text{W}^{181}$	121,2 d
56	${}_{74}\text{W}^{185g}$	75,1 d
57	${}_{74}\text{W}^{187}$	23,9 h
58	${}_{75}\text{Re}^{180}$	2,43 m
59	${}_{75}\text{Re}^{181}$	20, h
60	${}_{75}\text{Re}^{182g}$	2,67 d
61	${}_{75}\text{Re}^{182m}$	12,7 h
62	${}_{75}\text{Re}^{183}$	70,0 d
63	${}_{75}\text{Re}^{184g}$	38,0 d
64	${}_{75}\text{Re}^{184m}$	165 d
65	${}_{75}\text{Re}^{186g}$	3,78 d
66	${}_{75}\text{Re}^{186m}$	$2,0 \cdot 10^5$ a
67	${}_{75}\text{Re}^{187}$	$4 \cdot 10^{10}$ a
68	${}_{76}\text{Os}^{186}$	$2 \cdot 10^{15}$ a

5. DADOS EXPERIMENTAIS

Os dados experimentais referem-se a resultados de monitoração de contaminação de superfície, do ar e de efluentes líquidos realizados na sala de manutenção e na caverna do cíclotron.

5.1 ANÁLISE DE AR

A monitoração de contaminação do ar é feita coletando-se aerossóis através de um filtro de fibra de vidro "Millipore" e uma bomba de ar de alto fluxo. O filtro é analisado no sistema de contagem β -Total e, se o resultado for acima da atividade mínima detetável, determina-se os radionuclídeos e as respectivas atividades através do sistema de espectrometria γ . Conhecendo-se a vazão da bomba e o tempo de amostragem, pode-se calcular a concentração do radionuclídeo na atmosfera e esse parâmetro é comparado ao limite recomendado pela ICRP Publicação nº 30, que é a concentração no ar derivada (CAD) do radionuclídeo.

De julho/84 até março/86 foram realizadas cerca de 50 análises de ar na área do cíclotron, sendo que duas foram feitas na caverna durante manutenção no interior do cíclotron. Os resultados dessas análises ficaram abaixo do mínimo significativo.

5.2 ANÁLISE DE CONTAMINAÇÃO DE SUPERFÍCIE

A monitoração de contaminação de superfície é feita através de esfregaços em lugares críticos predeterminados, são eles: chão da caverna do cíclotron; na sala de manutenção de peças do cíclotron: chão, bancada, pia, telefone, cadeira, maçaneta; chão da sala de monitoração, bota usada na área restrita do cíclotron (sala de manutenção e caverna).

Os esfregaços são feitos com papel de filtro seco e são analisados no sistema de contagem β -Total. Se o resultado for maior que a atividade mínima detetável, analisa-se o esfregaço no sistema de espectrometria γ e determina-se os radionuclídeos contaminantes e suas respectivas atividades. Co

nhecendo-se a área de amostragem ($0,1 \text{ m}^2$ para chão e $0,03 \text{ m}^2$ para bancada e pia), calcula-se a concentração do radionuclídeo e compara-se com o limite. Adota-se como limite geral de contaminação de superfície, o limite mais restritivo. No caso do ciclotron, os contaminantes, como visto, são emissores β e o limite de contaminação de superfície é $3,7 \cdot 10^4 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$.

Foram feitos no período de julho/84 a março/86 um total de 729 esfregaços em locais onde há maior probabilidade de contaminação. Cinquenta e seis esfregaços indicaram contaminação, ou seja, 8% do total de esfregaços, destes, dezoito ultrapassaram o limite. Os radionuclídeos encontrados foram Zn-65, Ga-67 e Re-184 e as respectivas concentrações máximas encontradas foram: $8,8 \cdot 10^6 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$, $1,3 \cdot 10^7 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ e $7,0 \cdot 10^4 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$. O nível médio de contaminação ficou em torno de $10^3 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$. Os locais contaminados mais frequentemente foram a pia e a bancada da sala de manutenção.

5.3 ANÁLISE DE EFLUENTES LÍQUIDOS

O sistema de controle do efluente líquido compõe-se de uma linha de esgoto exclusiva e um sistema de tanques de retenção/liberação. Analisa-se 1 litro do efluente armazenado no tanque, no sistema de espectrometria γ e determina-se os radionuclídeos e as concentrações respectivas e compara-se então com os limites⁽⁷⁾.

A análise do efluente líquido é um dado importante, pois é decorrente do tratamento de limpeza abrasiva das peças ativadas. Tem-se encontrado principalmente Zn-65, Ga-67 e Re-182.

6. CONCLUSÃO

A maioria dos radionuclídeos formados no cíclotron tem meia vida muito curta. Do ponto de vista de Radioproteção, deve ser evitado fazer manutenção na máquina imediatamente após operação, notando que operação significa, aqui, não somente a irradiação de um alvo em uma das saídas de feixe, mas também a simples produção ou tentativa de produção do feixe requerido.

Alguns radionuclídeos têm maior probabilidade de se tornarem contaminantes. Por exemplo, as peças mais manuseadas são de Cobre, e os radionuclídeos importantes formados no Cobre são o Zn-65 e o Ga-67. Isso é confirmado pelas análises de esfregaços feitos no local e de efluentes líquidos, que indicam a presença destes radionuclídeos.

Os radionuclídeos Ta-182 e Re-182 são encontrados no cátodo de Tântalo gasto, de modo que deve-se dar especial atenção do pó que desprende no manuseio do ion source quando da troca do catodo.

Este estudo limitou-se a verificar as reações com as partículas p, d, He³⁺ e α . Sabe-se que as peças também são ativadas pelos nêutrons secundários das reações acima. A ativação das peças com nêutrons constitui escopo de futuro estudo.

APÊNDICES

A. ALGUNS RADIONUCLÍDEOS FORMADOS POR ATIVAÇÃO DAS PEÇAS COM PONENTES DO CÍCLOTRON E SUAS ENERGIAS CARACTERÍSTICAS.

Objetivo: Auxílio na análise por espectrometria γ de amostras colhidas no laboratório do Cíclotron.

Esse apêndice é composto por três tabelas que ajudarão a determinação de um radionuclídeo a partir das linhas de energia encontrada no sistema de espectrometria gama. Os radionuclídeos aqui relacionados são aqueles possíveis de serem formados por ativação de materiais componentes do Cíclotron e que têm meia vida ≥ 2 horas.

A Tabela (A.1) fornece para cada radionuclídeo, a sua meia vida, suas energias características e respectivas abundâncias⁽⁸⁾. Note-se, porém, que nem todas linhas de energia do radionuclídeo estão listados, aquelas linhas cuja energia é muito baixa e/ou abundância ínfima foram suprimidas.

Na Tabela (A.2) estão listados, por ordem crescente de energia, a energia, o radionuclídeo e a abundância.

A Tabela (A.3) é uma tabela secundária que agiliza em muito a determinação do radionuclídeo. Estão listados por ordem crescente de energia, o radionuclídeo, a energia do pico mais abundante e a abundância desse pico. Para usar essa tabela, basta, tendo o espectro de energia, procurar o fotopico mais alto. Com a energia desse fotopico, pesquisar na Tabela (A.3) a que nuclídeo pertence essa energia e depois, na Tabela (A.1), as outras energias desse radionuclídeo.

OBSERVAÇÃO: À direita do valor da energia estão alguns códigos, são eles:

- A - energia proveniente de aniquilação de pares.
- D - energia de raios γ emitidos pelo filho do radionuclídeo.
- G - abundância calculada pela relação genética na equação transiente.

X - energia proveniente de raios-X.

Números - são as incertezas no último algarismo do valor da energia.

TABELA (A.1)

NUCLÍDEO MEIA-VIDA	ENERGIA (KeV)	ABUNDÂNCIA	NUCLÍDEO MEIA-VIDA	ENERGIA (KeV)	ABUNDÂNCIA
$^{22}_{11}\text{Na}$ 2,60a	1274,5	1 99,9	$^{56}_{27}\text{Co}$ 78,8d	846,8 1037,8 1238,3 1771,4 2034,9 2598,6	1 99,9 1 14,1 1 67,0 1 15,1 1 7,78 1 16,8
$^{24}_{11}\text{Na}$ 15,02h	1368,5 2753,9	1 100, 1 99,9	$^{56}_{28}\text{Ni}$ 6,10d	158,4 269,5 480,4 750,0 811,9 1561,8	1 98,8 1 36,5 1 36,5 1 49,5 1 86,0 1 14,0
$^{52g}_{25}\text{Mn}$ 5,59d	744,2 848,2 935,5 1246,2 1333,6 1434,1	1 90,0 1 3,32 1 94,5 1 4,21 1 5,07 1 100,	$^{57}_{27}\text{Co}$ 271,8d	122,1 136,5	1 85,6 1 10,6
$^{53}_{25}\text{Mn}$ $3,7 \cdot 10^6$ a	5,4 6,0	X 22,4 X 3,02	$^{57}_{28}\text{Ni}$ 36,1h	127,2 1377,6 1757,5 1919,4	1 12,9 1 77,9 1 7,09 1 14,7
$^{55}_{26}\text{Fe}$ 2,74a	5,9 6,5	X 25,0 X 3,38	$^{58g}_{27}\text{Co}$ 70,92d	810,8	1 99,4
$^{55}_{27}\text{Co}$ 17,54h	91,8 477,2 803,8 931,5 1316,7 1370,0 1408,7	3 2,7 3 20,3 3 2,1 3 75,0 3 71 3 3,0 3 16,5	$^{59}_{26}\text{Fe}$ 44,50d	192,2 1099,3 1291,6	1 3,4 1 56,5 1 43,2
$^{56}_{25}\text{Mn}$ 2,58h	846,8 1810,7 2113,0	1 98,9 1 27,2 1 14,3	$^{60}_{27}\text{Co}$ 5,27a	1173,2 1332,5	1 99,9 1 100,

NUCLÍDEO MEIA-VIDA	ENERGIA (KeV)		ABUNDÂNCIA	NUCLÍDEO MEIA-VIDA	ENERGIA (KeV)		ABUNDÂNCIA
$^{61}_{27}\text{Co}$ 1,65h	67,4	1	86,0	$^{67}_{29}\text{Cu}$ 2,58d	93,3	1	16,1
	909,2	5	3,0		184,6	1	48,7
$^{61}_{29}\text{Cu}$ 3,41h	67,4	1	4,13	$^{67}_{31}\text{Ga}$ 3,26d	93,3	1	37,0
	283,0	1	13,1		184,6	1	20,4
	656,0	1	11,2		300,2	1	16,6
	1185,2	1	3,86	$^{68}_{32}\text{Ge}$ 270,8d	10,3	X	5,50
$^{62}_{30}\text{Zn}$ 9,25h	40,8	1	25,2		1077,4	1D	2,93
	507,6	1	14,6	$^{69\text{m}}_{30}\text{Zn}$ 13,76h	438,6	1	94,8
	548,4	1	15,2		$^{69}_{32}\text{Ge}$ 39,05h	574,1	1
	596,6	1	25,7	872,0		1	11,9
$^{64}_{29}\text{Cu}$ 12,70h	7,5	X	14,8	1106,8		1	36,0
	511,	A	35,8	$^{71}_{32}\text{Ge}$ 11,8d	9,2	X	39,1
	$^{65}_{28}\text{Ni}$ 2,52h	366,3	1		4,61	10,3	X
1115,5		1	14,8		$^{72}_{30}\text{Zn}$ 46,5h	144,7	1
1481,8	1	23,5	630,0	1D		35,5	
$^{65}_{28}\text{Zn}$ 244,1d	1115,5	1	50,7	834,0		1D	137,2
	$^{66}_{31}\text{Ga}$ 9,40h	833,6	1	6,12		2201,7	1D
1039,3		1	38,4	$^{72}_{31}\text{Ga}$ 14,10h	630,0	1	24,8
2190,0		2	5,76		834,0	1	95,6
2752,1		2	23,5		2201,7	1	25,9
$^{66}_{32}\text{Ge}$ 2,27h	43,9	1	28,6	$^{178\text{m}}_{73}\text{Ta}$ 2,45h	55,8	XG	76,3
	108,8	1	10,4		88,9	1D	62,0
	273,0	1	10,4		213,4	1D	80,9
	381,8	1	27,8		325,6	1D	93,9
$^{67}_{29}\text{Cu}$ 2,58d	93,3	1	16,1		426,4	1D	96,9
	184,6	1	48,7				
	93,3	1	37,0				
	184,6	1	20,4				
	300,2	1	16,6				
	10,3	X	5,50				

NUCLÍDEO MEIA-VIDA	ENERGIA (KeV)	ABUNDÂNCIA	NUCLÍDEO MEIA-VIDA	ENERGIA (KeV)	ABUNDÂNCIA
$^{178}_{74}\text{W}$ 21,7d	55,8 XD 57,5 X 63,2 XD	42,4 14,0 14,2		1231,0 1	11,6
$^{179}_{72}\text{Hf}$ 25,1d	55,8 X 146,1 1 192,8 2 236,6 2 362,6 2 453,7 3	56, 26,3 20,9 18,3 38,5 66,0	$^{182}_{75}\text{Re}$ 2,67d	58,0 X 59,3 X 67,2 X 365,5 3	52,0 61,0 20,6 56,4
$^{179}_{73}\text{Ta}$ 1,82a	54,6 X 55,8 X 63,2 X	16,7 29,2 9,78	$^{182}_{75}\text{Re}$ 12,7h	59,3 X 67,7 1 1121,4 2 1221,5 2	52,5 38,0 31,9 25,1
$^{180}_{72}\text{Hf}$ 5,5h	57,5 1 215,2 1 332,3 1 443,2 1	48,4 81,4 94,4 82,8	$^{183}_{73}\text{Ta}$ 5,1d	58,0 X 59,3 X 67,2 X 107,9 1G 246,1 1 354,0 1	25,3 44,0 14,9 10,8 26,7 11,4
$^{181}_{74}\text{W}$ 121,2d	56,3 X 57,5 X 65,2 X	18,2 31,8 10,7	$^{183}_{75}\text{Re}$ 70,0d	59,3 X 67,2 X 162,3 1	61,6 20,8 23,5
$^{181}_{75}\text{Re}$ 20,h	58,0 X 59,3 X 67,2 X 365,5 3	35,1 61,0 20,6 56,4	$^{184}_{75}\text{Re}$ 38,0d	59,3 X 792,1 1 903,3 1	45,1 37,4 37,8
$^{182}_{73}\text{Ta}$ 115,0d	59,3 X 67,7 1 100,1 1 1121,3 1 1221,4 1	17,5 41,3 14,1 35,0 27,4	$^{184}_{75}\text{Re}$ 165d	59,3 XG 61,1 X 67,2 XG 69,2 X	57,7 24,4 19,6 8,3
			$^{186}_{75}\text{Re}$ 3,78d	59,3 X 137,2 1	2,69 9,20

NUCLÍDEO MEIA-VIDA	ENERGIA (KeV)	ABUNDÂNCIA	NUCLÍDEO MEIA-VIDA	ENERGIA (KeV)	ABUNDÂNCIA
^{186m} 75Re	59,0 1	18,6	¹⁸⁷ 74W	61,1 X	14,0
2,0.10 ⁵ a	137,2 1D	9,20	23,9h	72,5 1	12,9
				134,2 1	10,3
				479,5 1	25,3
				685,8 1	31,6

TABELA (A,2).

ENERGIA (KeV)	NUCLÍDEO	ABUNDÂNCIA	ENERGIA (KeV)	NUCLÍDEO	ABUNDÂNCIA
5,4 X	${}_{25}\text{Mn}^{53}$	22,4	59,3 X	${}_{75}\text{Re}^{181}$	61,0
5,9 X	${}_{26}\text{Fe}^{55}$	25,0	59,3 X	${}_{73}\text{Ta}^{182g}$	17,5
6,0 X	${}_{25}\text{Mn}^{53}$	3,02	59,3 X	${}_{75}\text{Re}^{182g}$	61,0
6,5 X	${}_{26}\text{Fe}^{55}$	3,38	59,3 X	${}_{75}\text{Re}^{182m}$	52,5
7,5 X	${}_{29}\text{Cu}^{64}$	14,8	59,3 X	${}_{73}\text{Ta}^{183}$	44,0
9,2 X	${}_{32}\text{Ge}^{71}$	39,1	59,3 X	${}_{75}\text{Re}^{184g}$	45,1
10,3 X	${}_{32}\text{Ge}^{71}$	5,57	59,3 X	${}_{75}\text{Re}^{183}$	61,6
10,3 X	${}_{32}\text{Ge}^{68}$	5,50	59,3 XG	${}_{75}\text{Re}^{184m}$	57,7
40,8 1	${}_{30}\text{Zn}^{62}$	25,2	59,3 X	${}_{75}\text{Re}^{186g}$	2,69
43,9 1	${}_{32}\text{Ge}^{66}$	28,6	61,1 X	${}_{75}\text{Re}^{184m}$	24,4
54,6 X	${}_{73}\text{Ta}^{179}$	16,7	61,1 X	${}_{74}\text{W}^{187}$	14,0
55,8 X	${}_{72}\text{Hf}^{179m}$	56,	63,2 XD	${}_{74}\text{W}^{178}$	14,2
55,8 X	${}_{73}\text{Ta}^{179}$	29,2	63,2 X	${}_{73}\text{Ta}^{179}$	9,78
55,8 XD	${}_{74}\text{W}^{178}$	42,4	65,2 X	${}_{74}\text{W}^{181}$	10,7
55,8 XG	${}_{73}\text{Ta}^{178m}$	76,3	67,2 X	${}_{75}\text{Re}^{181}$	20,6
56,3 X	${}_{74}\text{W}^{181}$	18,2	67,2 X	${}_{75}\text{Re}^{182g}$	20,6
57,5 X	${}_{74}\text{W}^{178}$	14,0	67,2 X	${}_{73}\text{Ta}^{183}$	14,9
57,5 1	${}_{72}\text{Hf}^{180m}$	48,4	67,2 X	${}_{75}\text{Re}^{183}$	20,8
57,5 X	${}_{74}\text{W}^{181}$	31,8	67,2 XG	${}_{75}\text{Re}^{184m}$	19,6
58,0 X	${}_{75}\text{Re}^{181}$	35,1	67,4 1	${}_{27}\text{Co}^{61}$	86,0
58,0 X	${}_{75}\text{Re}^{182g}$	52,0	67,4 1	${}_{29}\text{Cu}^{61}$	4,13
58,0 X	${}_{73}\text{Ta}^{183}$	25,3	67,7 1	${}_{73}\text{Ta}^{182g}$	41,3
59,0 1	${}_{75}\text{Re}^{186m}$	18,6	67,7 1	${}_{75}\text{Re}^{182m}$	38,0

ENERGIA (KeV)	NUCLÍDEO	ABUNDÂNCIA	ENERGIA (KeV)	NUCLÍDEO	ABUNDÂNCIA	
69,2	X	${}_{75}\text{Re}^{184\text{m}}$	8,3			
72,5	1	${}_{74}\text{W}^{187}$	12,9			
88,9	1D	${}_{73}\text{Ta}^{178\text{m}}$	62,0			
91,8	3	${}_{27}\text{Co}^{55}$	2,7			
93,3	1	${}_{29}\text{Cu}^{67}$	16,1			
93,3	1	${}_{31}\text{Ga}^{67}$	37,0			
100,1	1	${}_{73}\text{Ta}^{182\text{g}}$	14,1			
107,9	1G	${}_{73}\text{Ta}^{183}$	10,8			
108,8	1	${}_{32}\text{Ge}^{66}$	10,4			
122,1	1	${}_{27}\text{Co}^{57}$	85,6			
127,2	1	${}_{28}\text{Ni}^{57}$	12,9			
134,2	1	${}_{74}\text{W}^{187}$	10,3			
136,5	1	${}_{27}\text{Co}^{57}$	10,6			
137,2	1	${}_{75}\text{Re}^{186\text{g}}$	9,20			
137,2	1D	${}_{75}\text{Re}^{186\text{m}}$	9,20			
144,7	1	${}_{30}\text{Zn}^{72}$	83,0			
146,1	1	${}_{72}\text{Hf}^{179\text{m}}$	26,3			
158,4	1	${}_{28}\text{Ni}^{56}$	98,8			
162,3	1	${}_{75}\text{Re}^{183}$	23,5			
184,6	1	${}_{29}\text{Cu}^{67}$	48,7			
184,6	1	${}_{31}\text{Ga}^{67}$	20,4			
192,2	1	${}_{26}\text{Fe}^{59}$	3,4			
192,8	2	${}_{72}\text{Hf}^{179\text{m}}$	20,9			
213,4	1D	${}_{73}\text{Ta}^{178\text{m}}$	80,9			
215,2	1	${}_{72}\text{Hf}^{180\text{m}}$	81,4			
236,6	2	${}_{72}\text{Hf}^{179\text{m}}$	18,3			
			246,1	1	${}_{73}\text{Ta}^{183}$	26,7
			269,5	1	${}_{28}\text{Ni}^{56}$	36,5
			273,0	1	${}_{32}\text{Ge}^{66}$	10,4
			283,0	1	${}_{29}\text{Cu}^{61}$	13,1
			300,2	1	${}_{31}\text{Ga}^{67}$	16,6
			325,6	1D	${}_{73}\text{Ta}^{178\text{m}}$	93,9
			332,3	1	${}_{72}\text{Hf}^{180\text{m}}$	94,4
			354,0	1	${}_{73}\text{Ta}^{183}$	11,4
			362,6	2	${}_{72}\text{Hf}^{179\text{m}}$	38,5
			365,5	3	${}_{75}\text{Re}^{181}$	56,4
			365,5	3	${}_{75}\text{Re}^{182\text{g}}$	56,4
			366,3	1	${}_{28}\text{Ni}^{65}$	4,61
			381,8	1	${}_{32}\text{Ge}^{66}$	27,8
			426,4	1D	${}_{73}\text{Ta}^{178\text{m}}$	96,9
			438,6	1	${}_{30}\text{Zn}^{69\text{m}}$	94,8
			443,2	1	${}_{72}\text{Hf}^{180\text{m}}$	82,8
			453,7	3	${}_{72}\text{Hf}^{179\text{m}}$	66,0
			477,2	3	${}_{27}\text{Co}^{55}$	20,3
			479,5	1	${}_{74}\text{W}^{187}$	25,3
			480,4	1	${}_{28}\text{Ni}^{56}$	36,5
			507,6	1	${}_{30}\text{Zn}^{62}$	14,6
			511,0	A	${}_{29}\text{Cu}^{64}$	35,8
			548,4	1	${}_{30}\text{Zn}^{62}$	15,2
			574,1	1	${}_{32}\text{Ge}^{69}$	13,3
			596,6	1	${}_{30}\text{Zn}^{62}$	25,7
			630,0	1	${}_{31}\text{Ga}^{72}$	24,8

ENERGIA (KeV)	NUCLÍDEO	ABUNDÂNCIA	ENERGIA (KeV)	NUCLÍDEO	ABUNDÂNCIA
630,0 1D	$_{30}\text{Zn}^{72}$	35,5	1115,5 1	$_{28}\text{Ni}^{65}$	14,8
656,0 1	$_{29}\text{Cu}^{61}$	11,2	1115,5 1	$_{30}\text{Zn}^{65}$	50,7
685,8 1	$_{74}\text{W}^{187}$	31,6	1121,3 1	$_{73}\text{Ta}^{182g}$	35,0
744,2 1	$_{25}\text{Mn}^{52g}$	90,0	1121,4 2	$_{75}\text{Re}^{182m}$	31,9
750,0 1	$_{28}\text{Ni}^{56}$	49,5	1173,2 1	$_{27}\text{Co}^{60}$	99,9
792,1 1	$_{75}\text{Re}^{184g}$	37,4	1185,2 1	$_{29}\text{Cu}^{61}$	3,86
803,8 3	$_{27}\text{Co}^{55}$	2,1	1221,4 1	$_{73}\text{Ta}^{182g}$	27,4
810,8 1	$_{27}\text{Co}^{58g}$	99,4	1221,5 2	$_{75}\text{Re}^{182m}$	25,1
811,9 1	$_{28}\text{Ni}^{56}$	86,0	1231,0 1	$_{73}\text{Ta}^{182g}$	11,6
833,6 1	$_{31}\text{Ga}^{66}$	6,12	1238,3 1	$_{27}\text{Co}^{56}$	67,0
834,0 1D	$_{30}\text{Zn}^{72}$	137,2	1246,2 1	$_{25}\text{Mn}^{52g}$	4,21
834,0 1	$_{31}\text{Ga}^{72}$	95,6	1274,5 1	$_{11}\text{Na}^{22}$	99,9
846,8 1	$_{25}\text{Mn}^{56}$	98,9	1291,6 1	$_{26}\text{Fe}^{59}$	43,2
846,8 1	$_{27}\text{Co}^{56}$	99,9	1316,7 3	$_{27}\text{Co}^{55}$	71,
848,2 1	$_{25}\text{Mn}^{52g}$	3,32	1332,5 1	$_{27}\text{Co}^{60}$	100,
872,0 1	$_{32}\text{Ge}^{69}$	11,9	1333,6 1	$_{25}\text{Mn}^{52g}$	5,07
903,3 1	$_{75}\text{Re}^{184g}$	37,8	1368,5 1	$_{11}\text{Na}^{24}$	100,
909,2 5	$_{27}\text{Co}^{61}$	3,0	1370,0 3	$_{27}\text{Co}^{55}$	3,0
931,5 3	$_{27}\text{Co}^{55}$	75,0	1377,6 1	$_{28}\text{Ni}^{57}$	77,9
935,5 1	$_{25}\text{Mn}^{52g}$	94,5	1408,7 3	$_{27}\text{Co}^{55}$	16,5
1037,8 1	$_{27}\text{Co}^{56}$	14,1	1434,1 1	$_{25}\text{Mn}^{52g}$	100,
1039,3 1	$_{31}\text{Ga}^{66}$	38,4	1481,8 1	$_{28}\text{Ni}^{65}$	23,5
1077,4 1D	$_{32}\text{Ge}^{68}$	2,93	1561,8 1	$_{28}\text{Ni}^{56}$	14,0
1099,3 1	$_{26}\text{Fe}^{59}$	56,5	1757,5 1	$_{28}\text{Ni}^{57}$	7,09
1106,8 1	$_{32}\text{Ge}^{69}$	36,0	1771,4 1	$_{27}\text{Co}^{56}$	15,1

ENERGIA (KeV)		NUCLÍDEO	ABUNDÂNCIA	ENERGIA (KeV)		NUCLÍDEO	ABUNDANCIA
1810,7	1	${}_{25}\text{Mn}^{56}$	27,2	2201,7	1D	${}_{30}\text{Zn}^{72}$	37,2
1919,4	1	${}_{28}\text{Ni}^{57}$	14,7	2201,7	1	${}_{31}\text{Ga}^{72}$	25,9
2034,9	1	${}_{27}\text{Co}^{56}$	7,78	2598,6	1	${}_{27}\text{Co}^{56}$	16,8
2113,0	1	${}_{25}\text{Mn}^{56}$	14,3	2752,1	2	${}_{31}\text{Ga}^{66}$	23,5
2190,0	2	${}_{31}\text{Ga}^{66}$	5,76	2753,9	1	${}_{11}\text{Na}^{24}$	99,9

TABELA (A.3)

NUCLÍDEO	ENERGIA DO PICO MAIS ABUND. (KeV)	ABUNDÂNCIA	NUCLÍDEO	ENERGIA DO PICO MAIS ABUND. (KeV)	ABUNDÂNCIA
^{53}Mn	5,4 X	22,4	^{61}Cu	283,0 1	13,1
^{55}Fe	5,9 X	25,0	^{180m}Hf	332,3 1	94,4
^{71}Ge	9,2 X	39,1	^{178m}Ta	426,4 1D	96,9
^{68}Ge	10,3 X	5,50	^{69m}Zn	438,6 1	91,8
^{66}Ge	43,9 1	28,6	^{179m}Hf	453,7 3	66,0
^{178}W	55,8 XD	42,4	^{64}Cu	511, A	35,8
^{179}Ta	55,8 X	29,2	^{62}Zn	596,6 1	25,7
^{181}W	57,5 X	31,8	^{187}W	685,8 1	31,6
^{186m}Re	59,0 1	18,6	^{58g}Co	810,8 1	99,4
^{182g}Re	59,3 X	61,0	^{72}Zn	834,0 1D	137,2
^{182m}Re	59,3 X	52,5	^{72}Ga	834,0 1	95,6
^{183}Re	59,3 X	61,6	^{56}Mn	846,8 1	98,9
^{184g}Re	59,3 X	45,1	^{56}Co	846,8 1	99,9
^{184m}Re	59,3 XG	57,7	^{55}Co	931,5 3	75,0
^{181}Re	59,3 X	61,0	^{66}Ga	1039,3 1	38,4
^{183}Ta	59,3 X	44,0	^{59}Fe	1099,3 1	56,5
^{61}Co	67,4 1	86,0	^{69}Ge	1106,8 1	36,0
^{182g}Ta	67,7 1	41,3	^{65}Zn	1115,5 1	50,7
^{67}Ga	93,3 1	37,0	^{22}Na	1274,5 1	99,9
^{57}Co	122,1 1	85,6	^{60}No	1332,5 1	100,
^{186g}Re	137,2 1	9,20	^{24}Na	1368,5 1	100,
^{56}Ni	168,4 1	98,6	^{52g}Mn	1434,1 1	100,
^{67}Cu	184,6 1	48,7	^{65}Ni	1481,8 1	23,5

REFERÊNCIAS

1. HELLWEGE, K-H et alii. Q-Values and excitation functions of nuclear reactions. Berlin, Springer Verlag, 1973. (Landolt-Bornstein. Numerical data and functional relationships in science and technology, new series, group 1, v.5, pt.A).
2. HELLWEGE, K-H et alii. Q-Values and excitation functions of nuclear reactions. Berlin, Springer Verlag, 1973. (Landolt-Bornstein. Numerical data and functional relationships in science and technology, new series, group 1, v.5, pt.B).
3. HELLWEGE, K-H et alii. Q-Values and excitation functions of nuclear reactions. Berlin, Springer Verlag, 1974. (Landolt-Bornstein. Numerical data and functional relationships in science and technology, new series, group 1, v.5, pt.C).
4. LEMOS JR., Orlando Ferreira - Aceleradores de partículas. CNEN/IEN/Dep. Física. Nota Informativa. 1980.
5. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna. Monitoring of radioactive contamination on surfaces. 1970. (Technical Report Series nº 120).
6. INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR, Rio de Janeiro. Informações do corpo técnico do Departamento de Física/IEN.
7. PINA, J.L.S. de & ROCHA, A.C.S. da - Critério para liberação de efluente líquido radioativo do IEN. CNEN/IEN/DISEP-01/84.
8. ATOMIC DATA AND NUCLEAR DATA TABLES - Albany, v. 29, n. 1, Sep. 1983.
9. PATTERSON, H.W. - Accelerator Health Physics. Academic Press, 1973.