

BR 4205972



**NÍVEIS DE RADIAÇÃO NA SUPERFÍCIE LIVRE
DA PISCINA DO REATOR IEA-R1**

Hertz Fasqualetto

DISSERTAÇÃO E TESE - IEA 064

JULHO/1978

**NÍVEIS DE RADIAÇÃO NA SUPERFÍCIE LIVRE
DA PISCINA DO REATOR IEA-R1**

Hertz Pasqualetto

**Dissertação para obtenção do Título de "Mestre em
Engenharia" – Orientador Prof. Dr. Roberto Y. Hukal.
Apresentada e defendida em 03 de setembro de 1978,
na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.**

APROVADA PARA PUBLICAÇÃO EM JUNHO/1977

CONSELHO DELIBERATIVO

MEMBROS

Klaus Reinach - Presidente
Roberto D'Utra Vaz
Helcio Modesto da Costa
Ivano Humbert Marchesi
Adner Cervellini

PARTICIPANTES

Regina Elisabete Azevedo Beretta
Flávio Gori

SUPERINTENDENTE

Rômulo Ribeiro de Faria

INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
Caixa Postal 11.049 (Pinheiros)
Cidade Universitária "Armando de Salles Oliveira"
SÃO PAULO - BRASIL

ÍNDICE

	Página
1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Definição do Problema	1
1.2 – Objetivos deste Trabalho	2
1.3 – Trabalhos Anteriores	2
2 – DESCRIÇÃO DO REATOR	4
2.1 – Sistema de Refrigeração do Reator	9
2.2 – Considerações sobre o Alumínio Estrutural Utilizado no Reator	12
2.3 – Blindagem Contra as Radiações Provenientes do Núcleo do Reator	16
2.4 – Considerações sobre o Tratamento da Água da Piscina	17
3 – MÓDULO TEÓRICO	20
3.1 – Identificação dos Elementos Radioativos e Análise Teórica da Atividade da Água da Piscina	20
3.2 – Atividade do Sódio-24	21
3.2.1 – Atividade da Água Dado ao ^{24}Na Proveniente da Reação de Recuo $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	21
3.2.1.1 – Determinação do "Q" da Reação	23
3.2.1.2 – Limiar de Energia para a Reação	23
3.2.1.3 – Relação entre a Energia do Nêutron Incidente e a Energia do Núcleo de Recuo	24
3.2.1.4 – Alcance dos Núcleos de Recuo nos Meios: Alumínio e Óxido de Alumínio ($\text{Al}(\text{OH})_3$) – (Alumina)	25
3.2.1.5 – Determinação do Alcance R(E) dos Núcleos de Recuo (^{24}Na) na Alumina, $\text{Al}(\text{OH})_3$	26
3.2.1.6 – Determinação do Número de Núcleos de ^{24}Na Difundidos para a Água da Piscina	30
3.2.1.7 – Cálculo da Atividade da Água da Piscina Provocado por ^{24}Na Proveniente das Reações de Recuo	36
3.3 – Cálculo da Atividade da Água Devida a Ativação do ^{23}Na Dissolvido como Impureza	39
3.3.1 – Atividade do Magnésio-27	42
3.3.2 – Atividade da Água Devida ao ^{27}Mg Proveniente da Reação de Recuo $^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$	43
3.3.2.1 – O Valor Q da Reação e o Limiar de Energia	43
3.3.2.2 – Relação entre a Energia do Nêutron Incidente e a Energia do Núcleo de Recuo	43

	Página
3.3.2.3 – Alcance dos Núcleos de Recuo no Meio: Óxido de Alumínio $Al(OH)_3$	44
3.3.2.4 – Determinação do Número de Núcleos de ^{27}Mg Difundidos para a Água da Piscina	49
3.3.2.5 – Cálculo da Atividade da Água da Piscina Devida ao ^{27}Mg Proveniente das Reações de Recuo	52
3.3.3 – Cálculo da Atividade da Água Devido a Ativação do ^{26}Mg Dissolvido como Impureza	53
3.4 – Atividade do Argônio-41	54
3.5 – Atividade do Alumínio-28	56
3.6 – Atividade da Água em Função da Potência de Operação do Reator	57
4 – MEDIDAS EXPERIMENTAIS	61
4.1 – Equipamentos Utilizados	61
4.2 – Levantamento dos Níveis de Radiação na Superfície Livre da Piscina	61
5 – ANÁLISE DOS RESULTADOS	67
5.1 – Contribuição dos Principais Elementos Radioativos sobre os níveis de Radiação na Superfície da Piscina	67
6 – REDUÇÃO DOS NÍVEIS DE RADIAÇÃO NA SUPERFÍCIE DA PISCINA	72
APÊNDICE A – Relação entre as Energias do Nêutron e do Núcleo de Recuo	80
APÊNDICE B – Níveis de Radiação Máxima Admissível em Ambientes de Trabalho	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

NÍVEIS DE RADIAÇÃO NA SUPERFÍCIE LIVRE DA PISCINA DO REATOR IEA-R1

Hertz Pasqualetto

RESUMO

Foi desenvolvida um modelo teórico para o cálculo do nível de radioatividade na superfície livre da piscina do reator de pesquisa IEA-R1.

A radioatividade é causada por radionuclídeos produzidos pela reação nuclear de nêutrons com: a) oxigênio da água; b) elementos gasosos dissolvidos na água (Ar, Ni); c) materiais estruturais e de encamisamento dos elementos combustíveis.

Os nuclídeos ^{24}Na e ^{27}Mg , que contribuem com mais de 70% da atividade total, são formados dentro da estrutura e do encamisamento de alumínio. Para as energias consideradas dos fons de recuo ^{24}Na e ^{27}Mg , foi verificado que estes são ejetados para o meio refrigerante quando formados na cobertura de $\text{Al}(\text{OH})_3$ do alumínio oxidado dentro de 0,4 cm da superfície externa.

Para o caso de ^{24}Na , a atividade calculada foi confirmada pelas medidas experimentais com erro de 6,5%.

Algumas considerações foram feitas sobre os níveis de radiação previstos após um eventual aumento da potência do reator de 2 MW para 10 MW.

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Definição do Problema

Os reatores de pesquisa tipo piscina, como o reator IEA-R1, possuem como uma de suas principais características a grande facilidade de acesso ao seu núcleo para a introdução e retirada de materiais e de equipamentos.

Desta maneira, muitas vezes, operadores do reator, ou mesmo pesquisadores, permanecem por longos períodos de tempo nas proximidades da superfície livre da piscina assim expostos a radiação ali existente.

Para que possamos avaliar os níveis de radiação em função das condições de funcionamento do reator é necessário o conhecimento tanto dos elementos radioativos responsáveis por estes níveis, como de seus processos de formação.

O principal interesse atual deste conhecimento está ligado ao projeto de acréscimo da potência e do ritmo de operação do reator IEA-R1, que poderá vir a funcionar em regime contínuo nas potências de 5 MW à 10 MW.

A blindagem na parte superior ao núcleo do reator IEA-R1 é constituída por uma camada de água com 6,7 metros, suficiente para reduzir a radiação direta do núcleo a níveis inferiores a 4 mR/h, quando o reator estiver operando na potência de 5 MW.

Os níveis de radiação na superfície livre da piscina podem ser superiores aos 4 mR/h, calculados para as condições de funcionamento em 5 MW dado a existência de elementos radioativos dissolvidos na água.

Efetivamente constatamos que, com o reator operando na potência de 2 MW em regime de 8 horas por dia, 4 a 5 dias por semana, o nível de radiação na superfície da piscina alcança o valor máximo de 8,4 mR/h, em condições normais de funcionamento.

Como se pretende em futuro próximo atingir a potência de até 10 MW em regime contínuo de funcionamento, é de se esperar que os níveis de radiação a serem atingidos sejam substancialmente superiores aos que temos atualmente.

Como veremos posteriormente, os níveis de radiação na superfície da piscina são influenciados pelos seguintes fatores:

- potência de funcionamento do reator;
- taxa de impurezas existentes na água da piscina;
- condições de circulação da água no interior da piscina.

1.2 – Objetivos deste Trabalho

O objetivo primordial deste trabalho foi o de identificar e analisar a formação dos principais elementos radioativos responsáveis pelos níveis de radiação na superfície livre da piscina. Um modelo teórico foi proposto e o seu confronto com a experiência foi realizado.

Baseado nos resultados obtidos para as condições atuais de funcionamento do reator, será feita uma previsão dos níveis de radiação que serão atingidos quando o reator operar em potências de 2 MW, 5 MW e 10 MW em regime contínuo.

Como consequência, poderemos avaliar o quanto a acessibilidade ao núcleo do reator ficará prejudicada, pois com o acréscimo dos níveis de radiação na superfície da piscina, haverá uma redução nos tempos disponíveis aos operadores para permanência em locais próximo à superfície.

Tentaremos também propor soluções para a redução dos níveis de radiação de modo que estes se tornem compatíveis com a permanência de operadores nas imediações da superfície livre da piscina.

1.3 – Trabalhos Anteriores

Garay⁽¹⁰⁾, em 1958, demonstrou que, uma das principais limitações para operação de um reator de piscina em alta potência, provém das radiações gama emitidas pelo sódio-24, existente na água de refrigeração dos reatores tipo BSR (Bulck Shielding Reactor) e M.T.R. (Material Testing Reactor).

Segundo Garay, tanto o sódio-24 como o magnésio-27 e o alumínio-28, contribuem de forma considerável para a atividade da água da piscina. Pelrine⁽²¹⁾ realizou estudos semelhantes na Universidade da Columbia. Pieroni et alii⁽²³⁾ em 1960, forneceu dados sobre os níveis de radiação que são atingidos na superfície da piscina e imediações do reator IEA-R1 (que utiliza elementos combustíveis tipo M.T.R.), quando operando em potências de até 5 MW. Observa-se pelos dados experimentais daquele trabalho que, após 4 horas de operação em 5 MW, a dose de radiação na superfície da piscina atinge o valor de 25 mR/hora. Os autores afirmaram ainda, ser difícil prever-se o que ocorreria se o reator fosse mantido em operação contínua em 5 MW, principalmente por não ter sido possível identificar os radioisótopos responsáveis pelas atividades encontradas.

A identificação e a medida quantitativa de todos os radioisótopos existentes na água de refrigeração destes reatores é um trabalho que depende exclusivamente da sensibilidade dos métodos de análise utilizados.

O interesse deste trabalho se concentra na identificação e análise quantitativa dos principais radioisótopos responsáveis pela atividade da água de refrigeração do reator IEA-R1.

A Tabela I.1 abaixo apresenta os resultados de uma pesquisa bibliográfica sobre a contribuição percentual dos principais radioisótopos identificados em condições de equilíbrio, em reatores semelhantes ao IEA-R1.

Tabela I.1

Principais Radioisótopos Encontrados em Equilíbrio na Água de Refrigeração dos Reatores Tipo Piscina

Principais Radioisótopos	(5 MW)	(10 MW)	(4 MW)	(2 MW)
	I.R.L	Siloé	Melusine	IEA-R1
Sódio-24	55%	35%	45,5%	40 %
Magnésio-27	40%	33%	36,4%	39,7%
Argônio-41	1%	16%	18,1%	14,2%
Manganês-51	1%	↓	—	↓
Outros	3%	16%	—	6,1%

Através destes dados podemos visualizar a contribuição dos elementos ^{24}Na , ^{27}Mg e ^{41}Ar na atividade da água, sendo nítida a predominância do sódio e do magnésio.

Como estes elementos podem ser originados por reações de recuo no alumínio estrutural, é de grande interesse o conhecimento de suas taxas de formação em função do ritmo de operação do reator.

Os cálculos teóricos da taxa de formação do ^{24}Na e do ^{27}Mg na água da piscina através das reações de recuo $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ e $^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$ são efetuados com base na equação que nos fornece o poder de freamento dE/dx (stopping-power) dos núcleos formados no alumínio estrutural. Os núcleos de ^{24}Na e ^{27}Mg formados com energia E em um meio material nada mais são que íons pesados se locomovendo neste meio. Fazendo-se uma associação destes íons com os fragmentos de fissão no momento em que são formados, podemos utilizar a equação de N. Bohr referente ao alcance dos núcleos de fissão em função de sua energia

$$\frac{dE}{dx} = \frac{811e^4 N}{m V_0^2} \cdot \frac{V}{V_0} \ln \frac{V}{V_0} + 411e^4 \frac{Z_0^2 \cdot Z_p^2}{M_0 V^2} \frac{M_0 + M_p}{M_p} \ln \left[\frac{\mu V^2 A}{Z_0 Z_p \cdot e^2} \right]$$

onde

$$\mu = \frac{M_0 \cdot M_p}{M_0 + M_p} \quad A = a_0 (Z_0^{2/3} + Z_p^{2/3})^{-1/2}$$

$a_0 = 5,3 \times 10^{-9} \text{ cm} = \text{raio da órbita do elétron do hidrogênio.}$

$V = \text{velocidade do núcleo de recuo.}$

$e, m = \text{carga e massa do elétron.}$

$Z_p, Z_a, M_p, M_a = \text{cargas e massas do núcleo de recuo e do átomo moderador, respectivamente.}$

$N = \text{número de átomos do moderador.}$

$V_0 = \text{velocidade do elétron do átomo de hidrogênio.}$

Estudos posteriores efetuados por Bethe e Ashkin⁽³⁾ nos fornecem a seguinte equação para o cálculo da perda de energia de núcleos pesados através da matéria.

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 N}{m V_0^2} (Z_p^{eff})^2 \cdot Z_a \cdot \log \frac{1,123 \cdot m V_0^3}{w e^2 Z_1^{eff}} + \frac{4\pi e^4}{M_p \cdot V^2} Z_a^2 Z_p^2 \log \left[\frac{\mu V^2 A}{Z_a \cdot Z_p \cdot e^2} \right],$$

onde

$$Z_p^{eff} = Z_p^{1/3} \cdot \frac{hV}{e^2} \quad w = \frac{I}{h}$$

$I = \text{potencial de excitação médio do átomo.}$

As outras variáveis já foram anteriormente definidas.

Northclife e Shilling⁽¹⁸⁾, baseados em trabalhos teóricos e experimentais existentes, determinaram através de correlações o alcance e o poder de freamento de diversos íons pesados em diversos meios materiais. Os seus resultados, por serem mais recentes (1970) e que melhor aproximam-se da realidade, serviram de base para o cálculo da taxa de difusão do Na-24 e do Mg-27, do alumínio estrutural para a água da piscina.

2 - DESCRIÇÃO DO REATOR

O reator IEA-R1 está descrito detalhadamente na Ref.⁽¹²⁾, portanto, nos limitaremos a descrevê-lo sucintamente abordando apenas os pontos de interesse para este trabalho.

O IEA-R1 é um reator de pesquisa tipo piscina que utiliza água leve como blindagem, como moderador e como fluido refrigerante. Sua piscina revestida com cerâmicas brancas encerra um volume de 272 m³. Os detalhes de construção da piscina e dos equipamentos nela existentes, podem ser vistos nas Figuras 1 e 2.

Este reator utiliza como combustível o urânio enriquecido em 93,2%. As placas dos elementos combustíveis são constituídas por uma liga de urânio e alumínio totalmente revestidas por uma camada de alumínio puro, sem nenhum tratamento, que evita o escape dos produtos de fissão, e mantém a necessária rigidez estrutural.

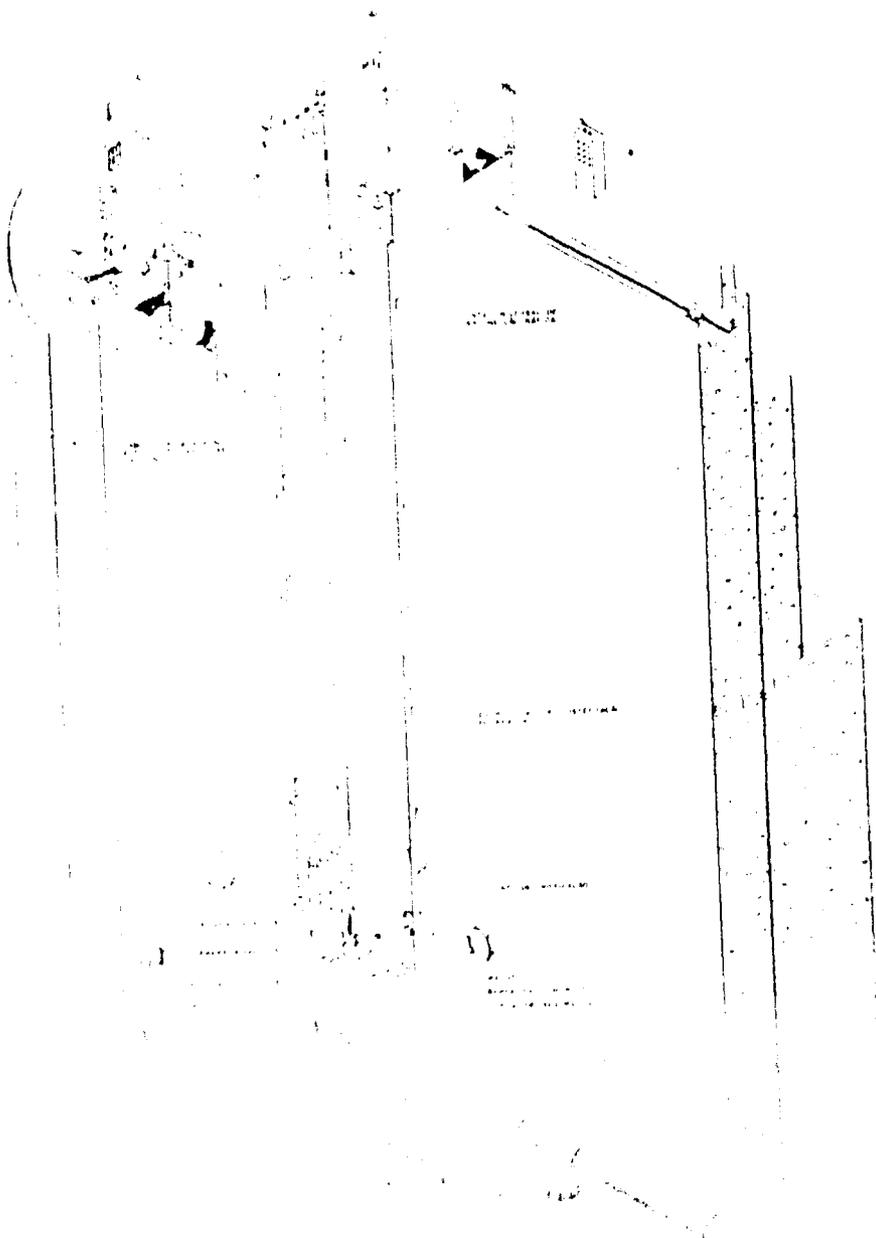
São utilizados dois tipos de elementos, denominados: elemento combustível normal (Figura 3), e elemento combustível de controle (Figura 4). A diferença fundamental é que este último possui um número de placas inferior ao do elemento combustível normal para dar lugar à introdução de barras

PLATE 10

1000
1000

1000

1000



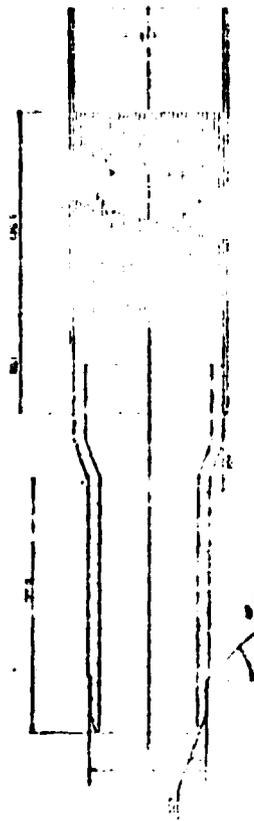
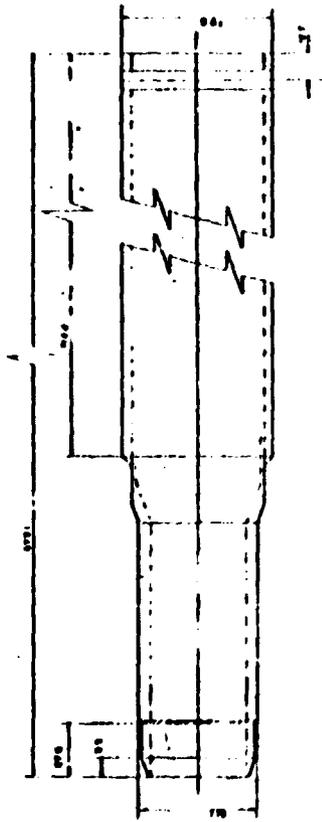
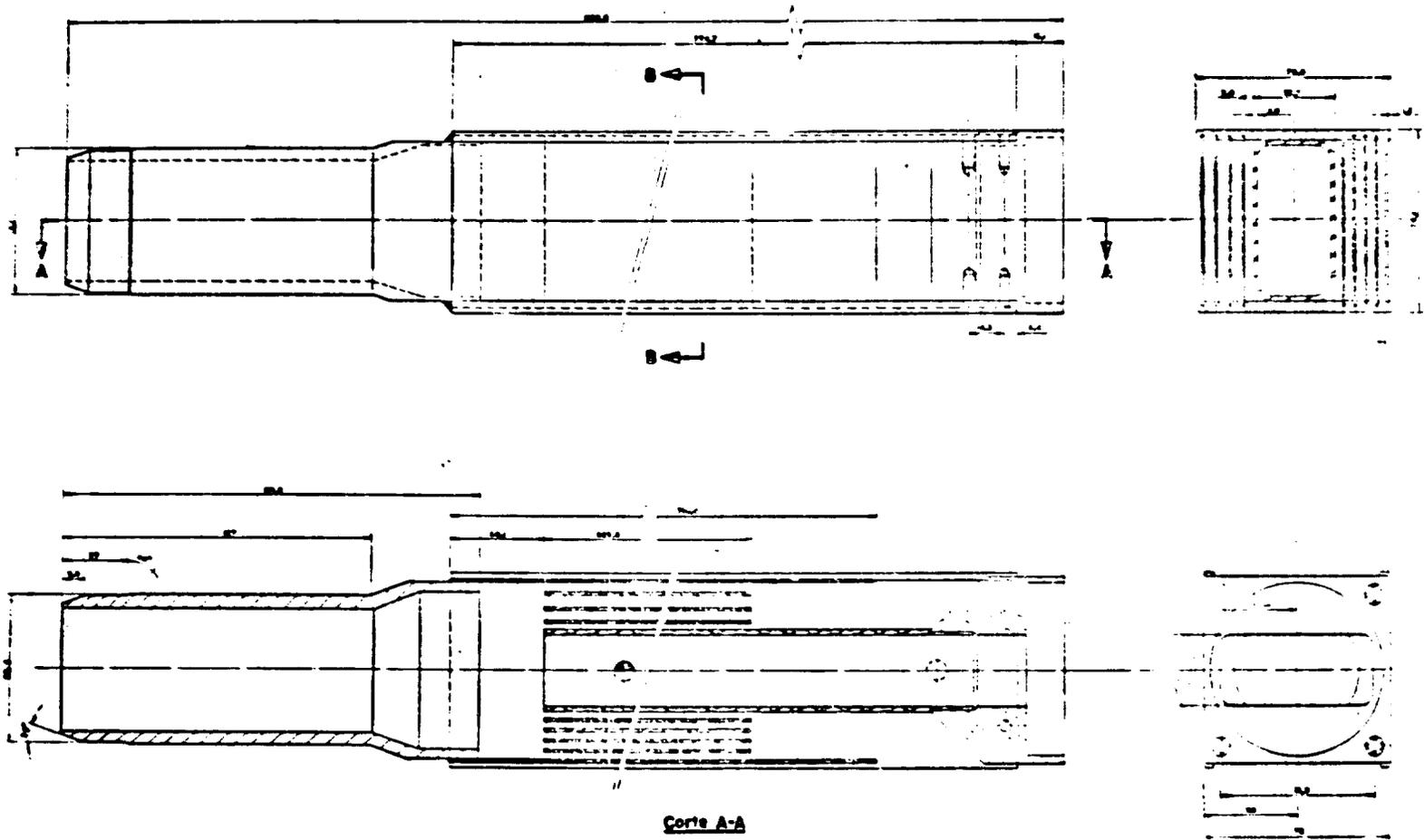


Figura 3 - Elemento Combustível Normal



Obs: Verificar em D.D.

Figura 4 - Elemento Combustível de Controle

absorvedoras de nêutrons que possibilitam o controle da reação nuclear em cadeia que se desenvolve no núcleo. Na Tabela II.1 temos as principais características dos elementos combustíveis que são de interesse.

Tabela II.1
Principais Características dos Elementos Combustíveis

	Elemento Normal	Elemento de Controle
Nº de Placas Combustíveis	18	9
Massa de ^{235}U (Elemento Novo)	185 gr	92,5 gr
Superfície de Troca Térmica	1,436 m ²	0,718 m ²
Área Total de Passagem para a Água (Entre Placas)	35 cm ²	36,6 cm ²

A determinação da área total de passagem para a água em um elemento combustível de controle foi efetuada considerando-se a obstrução causada pela barra absorvedora de nêutrons quando esta se encontra inserida no canal do elemento.

O núcleo do reator IEA-R1 nas condições atuais de funcionamento é constituído por um arranjo (5 x 5) de 25 elementos combustíveis sendo 21 elementos normais e 4 elementos de controle.

A estrutura de sustentação do núcleo é constituída por uma placa matriz, situada a 7,45 m de profundidade, provida de 80 furos (8 x 10) que servem como soquetes e suportes para os elementos combustíveis normais e de controle e ainda para os elementos refletores e elementos de irradiação de materiais no reator.

Esta placa matriz é sustentada por uma treliça de alumínio que se estende até a superfície livre da piscina, onde é acoplada a uma plataforma rolante, podendo assim ser movimentada ao longo da extensão da piscina.

Nas Figuras 1 e 2 pode-se visualizar tanto o arranjo dos elementos combustíveis como a placa matriz, a treliça de sustentação e a plataforma rolante.

2.1 – Sistema de Refrigeração do Reator

Este sistema tem como função retirar a energia térmica gerada no núcleo do reator por fissões nucleares, e dissipá-las na atmosfera.

A refrigeração do núcleo do reator é realizada pelo "Circuito Primário de Refrigeração".

Neste circuito, a água da piscina é forçada pela sucção de bombas hidráulicas, a passar entre as placas dos elementos combustíveis e de suas paredes laterais, sendo o fluxo dirigido de cima para baixo.

Após sua passagem pelo núcleo, a água entra na tubulação do circuito primário onde é refrigerada em um trocador de calor, retornando então à piscina através de um "difusor".

O difusor é constituído por três braços de tubos de alumínio com diâmetro de 22,4 cm cada um. Estes tubos contém furos na sua porção inferior (180°) voltada para o fundo da piscina. A

distribuição destes furos é de 416 + 416 + 156 para cada braço, respectivamente, totalizando 988 furos com diâmetro de 2,54 cm, sendo portanto a área total de saída da água de 0,486 m². Um dos tubos constituintes do difusor contém apenas 156 furos dado o fato de ser o seu comprimento menor que os outros dois como pode ser verificado na Figura 2.

Na parte intermediária do circuito primário encontra-se o trocador de calor onde a energia térmica gerada no núcleo do reator é transferida para o "Circuito Secundário de Refrigeração" que possui torres de refrigeração onde a energia térmica é finalmente dissipada na atmosfera.

Tanto o circuito primário como o circuito secundário possuem equipamentos em duplicata, tendo em conjunto uma capacidade de dissipação térmica de 10 MW. O fluxograma do sistema de refrigeração do reator IEA-R1 pode ser visto na Figura 5.

Quando o reator operar em potências inferiores a 200 KW, os circuitos primário e secundário podem ser desligados, sendo a refrigeração do núcleo realizada apenas por convecção natural da água da piscina.

O circuito primário é composto basicamente pelos elementos enumerados na Tabela II.2.

Tabela II.2

Elementos Constituintes do Circuito Primário

Elemento	Volume (m ³)
- Piscina: compartimento de operação.....	159,2
compartimento de estocagem.....	112,8
SUB-TOTAL.....	272,0
- Tanque de Decaimento.....	27,2
- Trocadores de Calor, Bombas e Tubulações.....	6,0
TOTAL.....	305,2 m ³

O circuito primário de refrigeração apesar de funcionar em circuito fechado apresenta perdas de água através,

- a) da evaporação na superfície da piscina
- b) de infiltrações nas paredes da piscina
- c) de vazamentos nas gaxetas das bombas hidráulicas e das válvulas.

Para repor a água perdida, ou mesmo encher a piscina quando necessário, existe um sistema de tratamento onde a água de abastecimento, antes de ser enviada à piscina, passa através de um sistema de filtros e trocadores iônicos.

Além deste sistema de reposição existe um outro sistema que tem por finalidade realizar um retratamento contínuo da água. Este sistema consegue manter a água da piscina com um índice de impurezas de 2 p.p.m, que é equivalente a 2 miligramas de impurezas por litro de água.

Este alto grau de pureza é necessário tendo em vista a possibilidade das impurezas serem ativadas ao passarem pelo núcleo do reator. Elas podem, então, ser levadas à superfície da piscina pelas correntes hidráulicas existentes durante a circulação forçada ou mesmo por convecção natural da água.

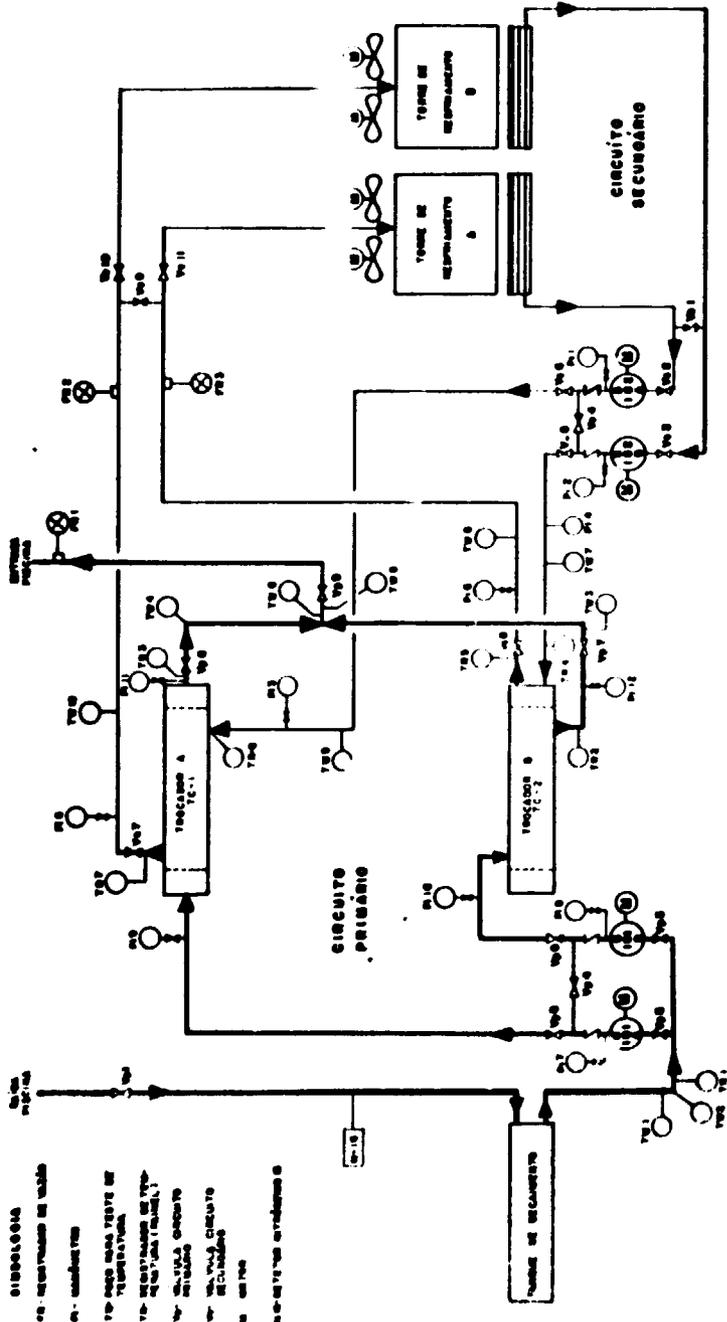


Figura 5 - Fluxograma Esquemático do Sistema de Refrigeração do Reator IEA-R1

Maiores detalhes sobre o sistema de reposição e de retratamento da água são encontrados na Seção 2.4.

2.2 – Considerações sobre o Alumínio Estrutural Utilizado no Reator

O alumínio é o principal elemento estrutural utilizado no reator IEA-R1, e como veremos posteriormente, é nele que se originam os principais elementos radioativos existentes na água da piscina.

O alumínio utilizado na construção dos elementos combustíveis pertence à série 1100 segundo a classificação da A.S.T.M. (American Society of Testing Materials) ou, 2S, segundo a classificação da ALCAN – Alumínios do Brasil S/A.

O restante das estruturas, a saber, a placa matriz, a treliça de sustentação etc., utilizam outros tipos de alumínio de maior resistência mecânica.

Na Tabela II.3 fornecemos os principais tipos de alumínio e sua composição em peso utilizados no reator IEA-R1.

Tabela II.3
Composição Química dos Tipos de Alumínio Utilizados no Reator IEA-R1 em Percentagem Atômica

Tipo	Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Cr	Outros
1100	99	0,20	*	**	0,05	1,0	**	0,10	**	0,15
3003	restante	0,20	0,7	**	1,0 1,5	0,6	**	0,10	**	0,15
5052	restante	0,10	*	2,2 2,8	0,10	0,45	**	0,10	0,15 0,35	0,15
5154	restante	0,10	*	3,1 3,9	0,10	0,45	0,20	0,20	0,15 0,35	0,15
6061	restante	0,15 0,40	0,7	0,8 0,2	0,15	0,40 0,80	0,15	0,25	0,15 0,35	0,15

* – não temos a porcentagem em Fe porém a do Si, nestes casos, é a soma dos dois (Fe + Si).

** – Quantidades desprezíveis.

Sabe-se Ref. (7,16) que as placas de alumínio 2S quando mergulhadas na água da piscina tem sua massa aumentada pela formação de uma camada de óxido de alumínio tri-hidratado, denominado de Alumina, $Al(OH)_3$, ou $Al_2O_3 + 3H_2O$, desde que a temperatura a que estão submetidas seja inferior a 90 C.

A Figura 4 mostra o aumento de massa em função do tempo para quatro corpos de prova mergulhados na água da piscina do reator IEA-R1 (16), cada um deles possuindo uma superfície de 24,5 cm². Desta figura podemos concluir que o processo de formação da camada de óxido, a qual se traduz em um acréscimo de massa, estabiliza-se após 40 dias.

Nas condições em que são submetidas as placas de alumínio dos elementos combustíveis, a

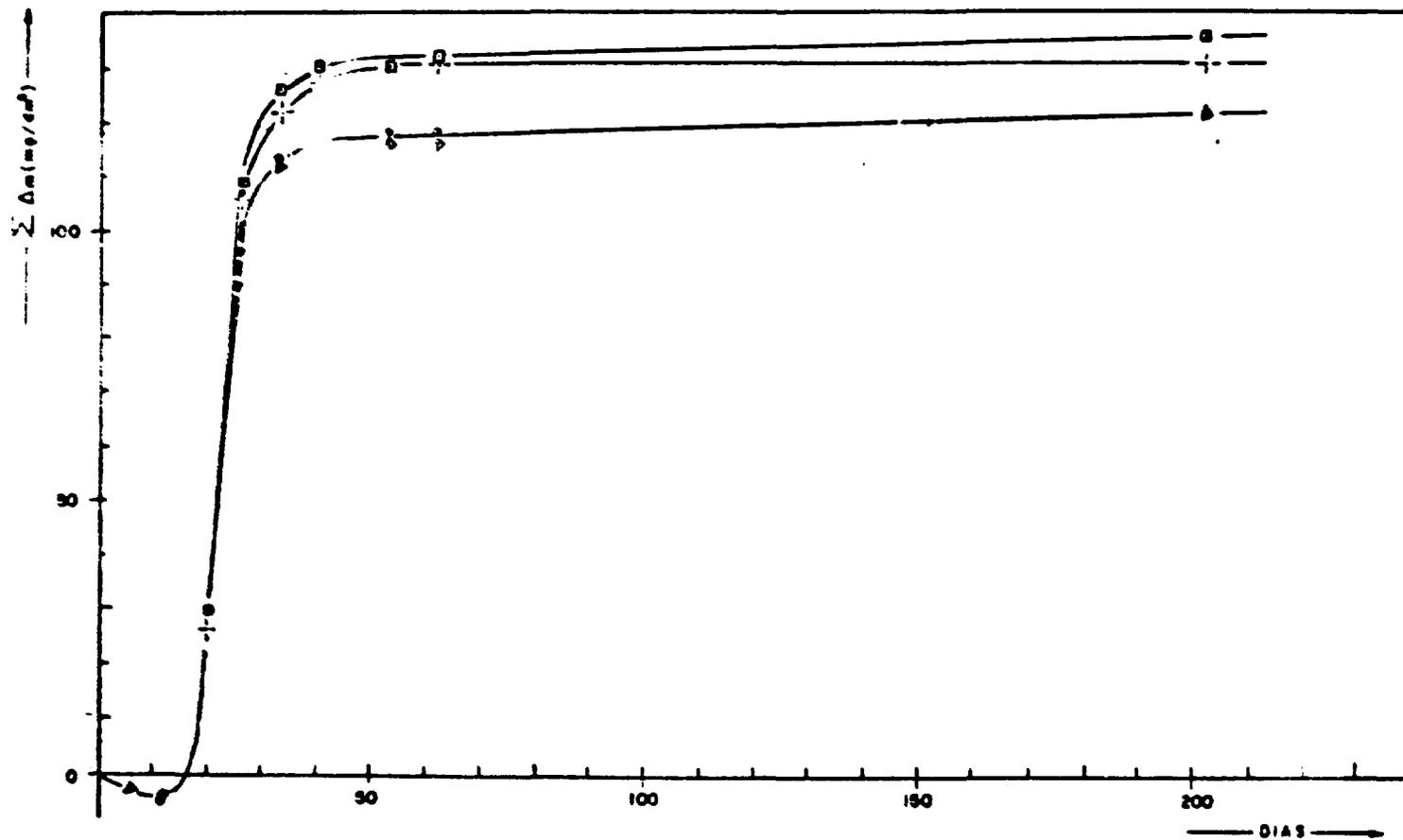


Figura 6 - Acréscimos de Massa em Placas de "Al" Tipo 2S Mergulhadas na Água da Piscina

camada de óxido de alumínio é constantemente formada e destruída, destruição esta dada pela taxa de corrosão.

Os principais fatores que influenciam a taxa de corrosão, são em ordem de importância:

- pH da água
- temperatura a que está submetida a placa
- gases dissolvidos na água
- velocidade de passagem da água de refrigeração.

Reproduzimos na Figura 7 a variação da taxa de corrosão em função destes fatores⁽⁷⁾.

Para as condições de funcionamento a que ficam submetidas as placas de Al dos elementos combustíveis do reator IEA-R1 podemos dizer que a taxa de corrosão varia entre 0,02 mg/dm²/dia à 0,2 mg/dm²/dia.

A composição de óxido formado nas placas de alumínio irá depender da temperatura a que a mesma está submetida. Abaixo de 90°C ocorre a formação de óxido de alumínio tri-hidratado (Al₂O₃ . 3H₂O), e acima de 100°C tem-se (Al₂O₃ . H₂O).

Como nas condições atuais de funcionamento do IEA-R1 a temperatura superficial das placas combustíveis é em média inferior a 90°C⁽¹³⁾ adotaremos como produto formado pela oxidação o Al₂O₃ . 3H₂O ou Al(OH)₃ (Alumina).

Nos trabalhos de Griess⁽¹¹⁾, encontramos uma equação para o cálculo da espessura da camada de óxido nas placas dos elementos combustíveis de reatores semelhantes ao IEA-R1. Esta equação foi obtida para condições de operação mais severas do que as encontradas no IEA-R1 e é dada por:

$$x = 1200 \cdot 10^{0,778} \cdot \exp. \left| - \frac{4600}{k} \right| \text{ (milésimos de polegadas (1) válidas para as seguintes condições:}$$

- pH = 5,3 a 7,0
- velocidade de escoamento da água = 25 a 45 ft/s
- fluxo térmico nas placas dos elementos combustíveis = 1 a 2 x 10⁶ BTU/ft².hr.

Enquanto que no IEA-R1 as condições de operação serão⁽¹³⁾:

Potência (MW)	Vazão (GPM)	Velocidade de Escoamento (ft/s)	Fluxo Térmico Máximo (BTU/ft ² . hora)
2	2600	6,12	1,12 x 10 ⁶
5	3600	8,47	2,68 x 10 ⁶
10	5800	13,65	5,65 x 10 ⁶

Sendo: pH = 6,3.

Área de passagem da água para a configuração básica de 25 elementos: 881,4 (cm²).

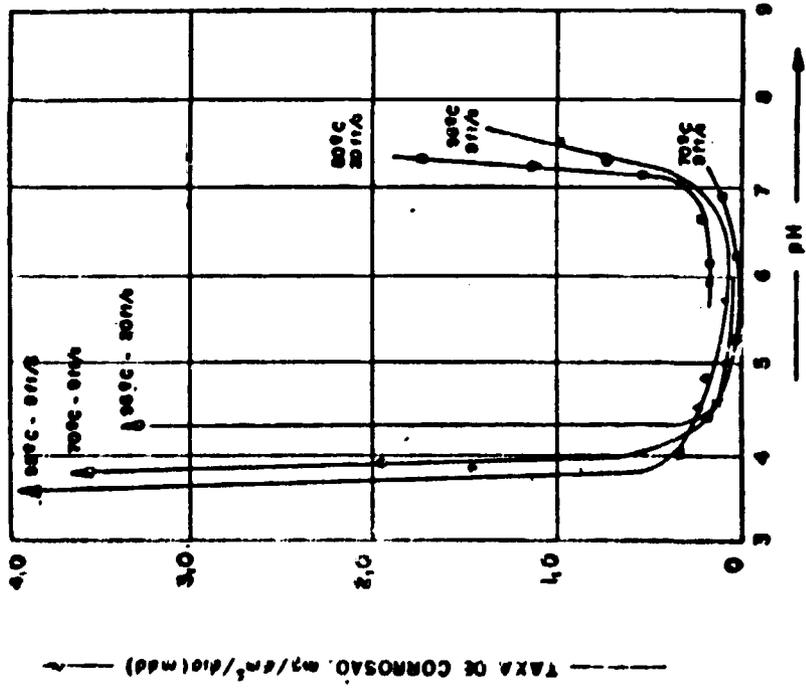


Fig. VII - (a)

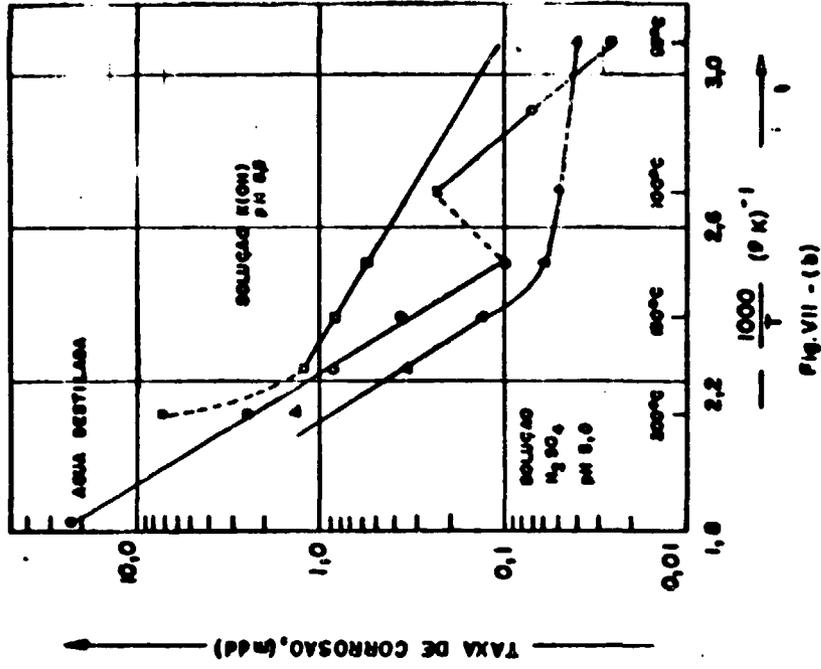


Fig. VII - (b)

Figuras 7(a) e 7(b) - Efeito do pH da Temperatura e Outras Variáveis sobre a Corrosão do Al "2S" Mergulhado em Água Saturada com Ar Atmosférico

Dada a falta de outra equação mais adequada, apesar destes valores estarem abaixo dos adotados por Griess (a menos do pH), iremos utilizar a Eq. 1 para o cálculo da espessura da camada de óxido existente nas placas dos elementos combustíveis do IEA-R1. Como podemos verificar pela Figura 7 na faixa de pH entre 5,3 a 7 a taxa de corrosão aumenta com a velocidade de escoamento da água e com a temperatura reduzindo-se desta maneira a camada de óxido. É de se esperar portanto, que se tenha nas placas dos elementos combustíveis do IEA-R1 uma camada de óxido superior a calculada.

2.3 – Blindagem Contra as Radiações Provenientes do Núcleo do Reator

A blindagem do Reator IEA-R1 foi dimensionada de maneira que em operação contínua na potência de 5 MW, existissem condições de trabalho nas diferentes áreas do edifício do reator.

Esta blindagem é constituída por água leve, concreto pesado (com barita) e concreto comum. Na parte inferior e laterais do núcleo do reator, a blindagem é constituída por camadas de água e de concreto com espessuras suficientes para que nas superfícies externas à blindagem os níveis de radiação sejam inferiores a 4mR/h⁽²³⁾.

Na parte superior do núcleo, a blindagem é constituída por uma camada de 6,7 m de água suficiente para reduzir a radiação direta proveniente do núcleo a níveis também inferiores a 4 mR/h quando o reator estiver operando em potência de 5 MW.

Para o cálculo dos níveis de radiação, acima referidos, as seguintes condições foram supostas:

- a) Água da piscina é desmineralizada.
- b) Não existe produtos de fissão na água.
- c) Não existe contaminação da água proveniente dos materiais irradiados no núcleo.
- d) Não existem falhas no concreto ou nos tubos de colimadores que tangenciam o núcleo do reator e atingem a superfície externa da parede da piscina.

Caso não haja o preenchimento das três primeiras condições acima citadas, teremos como consequência um aumento nos níveis de radiação na superfície livre da piscina. Entretanto estes níveis podem aumentar significativamente em decorrência do aparecimento de elementos radioativos dissolvidos na água da piscina quando o reator estiver em operação.

A atividade da água após sua passagem pelo núcleo do reator é resultante dos seguintes fatores^(5,26):

- Ativação da própria água e de gases nela dissolvidos.
- Ativação de impurezas dissolvidas na água proveniente da própria água de alimentação e da corrosão de materiais mergulhados na piscina.
- Reações nucleares de recuo nos materiais que se encontram no núcleo do reator e que são submetidos a um fluxo de nêutrons rápidos.
- Elementos provenientes de desprendimentos por corrosão de radionuclídeos já formados nos materiais constituintes do núcleo.
- Produtos de fissão provenientes dos elementos combustíveis através de processos de difusão.

Entre os elementos radioativos existentes na água da piscina, os de maior importância em reatores semelhantes ao IEA-R1^(6,17,21,1.5.26), estão representados na Tabela II.3.1 juntamente com suas características mais importantes.

Tabela II.3.1

Principais Elementos Radioativos Existentes na Água da
Piscina de Reatores Semelhantes ao IEA-R1

Elemento Radioativo	Origem de formação	Reação de formação	Limiar da Reação (MeV)	Secção de choque da reação	Gamma Emitidos (MeV)	Meia Vida (T1/a)
^{16}N	Oxigênio da água	$^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$	11 MeV	$\bar{\sigma} = 18.5\mu\text{b}$	6,14(68%) 7,11(5 %) 8,87(1 %)	7,35(s)
^{16}N	^{15}N dissolvido na água	$^{15}\text{N}(n,\gamma)^{16}\text{N}$	—	$\sigma = 13\mu\text{b}$	idem	idem
^{41}Ar	^{40}Ar dissolvido na água	$^{40}\text{Ar}(n,\gamma)^{41}\text{Ar}$	—	$\sigma = 0,53\text{ b}$	1,29(99,3%)	1,82(h)
^{24}Na	^{27}Al Estrutural	$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	3,2 MeV	$\sigma = 0,6\text{ mb}$	1,37(100%) 2,75(100%)	15(h)
^{24}Na	^{23}Na Impurezas	$^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$	—	$\sigma = 0,56\text{ b}$	idem	idem
^{27}Mg	^{27}Al Estrutural	$^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$	1,93 MeV	$\bar{\sigma} = 2,8\text{ mb}$	0,84(70%) 1,01(29%)	9,45 (mim)
^{27}Mg	^{26}Mg Impurezas	$^{26}\text{Mg}(n,\gamma)^{27}\text{Mg}$	—	$\sigma = 0,05\text{ b}$	idem	idem
^{28}Al	^{27}Al Impurezas	$^{27}\text{Al}(n,\gamma)^{28}\text{Al}$	—	$\sigma = 0,21\text{ b}$	1,79(100%)	2,3 (min)

2.4 – Considerações sobre o Tratamento da Água da Piscina

O sistema de tratamento da água da piscina do reator IEA-R1 é dividido em dois circuitos que funcionam em bases de resinas trocadoras de íons⁽¹⁶⁾.

1 – Circuito não-radioativo (tratamento da água de abastecimento da piscina).

2 – Circuito radioativo (retratamento da água da piscina).

O Circuito Não Radioativo

É o circuito responsável pelo abastecimento da piscina quando for necessário completar o seu nível normal de água reduzido através de processos já descritos na Secção 2.1.

Este circuito recebe água proveniente da rede normal de abastecimento da Cidade Universitária onde se localiza o IEA. É constituído inicialmente por um filtro tipo "Cuno" que retém partículas sólidas em suspensão com dimensões superiores a 25 microns. A água segue então para um tanque "amolecedor", ficando aí retidos o Ca e o Mg. Este tanque contém trocadores iônicos tipo ácido sulfúrico. Após o amolecedor, existe um filtro de carvão ativado cuja finalidade é a retenção de gases dissolvidos na água, não sendo eficiente porém para o Argônio.

Em seguida existem dois trocadores iônicos de leito misto contendo resinas catiônicas e aniônicas. Um destes trocadores iônicos permanece em reserva sendo colocado em uso quando o outro necessitar "regeneração" em suas resinas.

A capacidade deste sistema é de 15 litros/minuto, e a água assim desmineralizada é fornecida à piscina com um índice de impurezas correspondente a 1 p.p.m. de substâncias solúveis.

O Circuito Radioativo

Este circuito é responsável pelo tratamento contínuo da água da piscina.

Ele é constituído por duas unidades cada uma delas possuindo a capacidade de retratar 75 litros/minuto.

Cada unidade é constituída por um filtro de carvão ativado seguido por um trocador de íons de leito misto contendo resinas catiônicas e aniônicas.

Uma das unidades é mantida em reserva, entrando em funcionamento quando for necessário regenerar as resinas da unidade em uso. Este circuito funciona ininterruptamente.

O grau de impurezas da água da piscina é mantido desta maneira no entorno de 2 p.p.m. de substâncias solúveis.

A própria superfície livre da piscina, paredes laterais e os materiais estruturais e de irradiação existentes, contribuem para a elevação do grau de impurezas da água.

Na Figura 8 temos o esquema dos circuitos de tratamento e retratamento da água da piscina.

Uma análise típica da água da piscina Ref.⁽¹⁶⁾, nos revela as seguintes impurezas dadas na Tabela II.4.

Tabela II.4

Análise Típica da Água da Piscina

Al	= 0,020 p.p.m	Fe	= 0,010 p.p.m
Cl	= 0,002 p.p.m	Na	= 0,400 p.p.m
SiO ₂	= 1,000 p.p.m	Ca + Mg	= 0,600 p.p.m
Resistividade	= 0,8 MOhm/cm ² /cm.		
pH	= 6,3		

Na determinação do (Ca + Mg) tem-se a relação Mg/Ca igual a 1/5

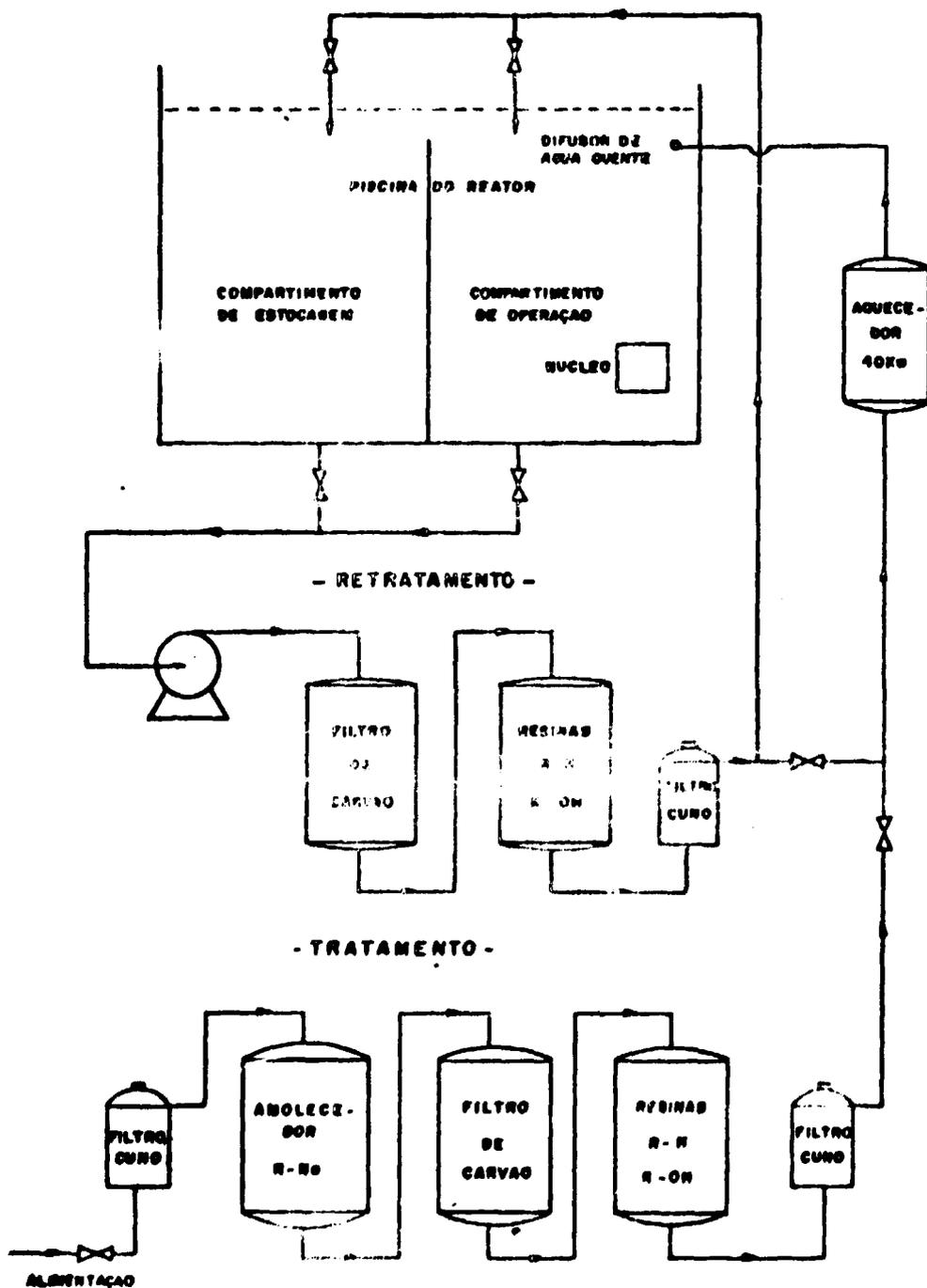


Figura 8 - Fluxograma do sistema de Tratamento e de Retratamento da Água da Piscina do Reator IEA-R1.

3 – MÓDULO TEÓRICO

3.1 – Identificação dos Elementos Radioativos e Análise Teórica da Atividade da Água da Piscina

Como já foi citado no Capítulo 2, os principais elementos radioativos encontrados em reatores do tipo piscina como o IEA-R1 são: ^{16}N , ^{41}Ar , ^{24}Na , ^{27}Mg e ^{28}Al . As características desses elementos e a contribuição dos mesmos na atividade observada na superfície da piscina são descritas a seguir.

Nitrogênio-16 – É o elemento que mais contribui para a atividade da água após sua passagem pelo núcleo do reator, 99% segundo Tiberghian⁽²⁶⁾.

Ele é formado pela reação do oxigênio da água com nêutrons rápidos com energia superior a 11 MeV.

Porém, o decaimento deste radioisótopo é muito rápido, com meia-vida, $T_{1/2}$, muito curta ($T_{1/2} = 7,35$ s.).

O processo normalmente adotado para diminuir a ação do ^{16}N é o de reter a água de refrigeração em um ambiente blindado, por um tempo relativamente grande, dando assim condições para que haja um decaimento substancial de sua atividade.

Com este objetivo existe no circuito de refrigeração do IEA-R1 um "tanque de decaimento" com um volume de $27,2\text{ m}^3$, que retém a água de refrigeração por um período de tempo nunca inferior a 74(s), antes que a mesma retorne à piscina.

Este tempo, equivalente a 10 vezes a meia-vida do ^{16}N , é suficiente para reduzir praticamente a zero as radiações provenientes deste radioisótopo na superfície livre da piscina.

Argônio-41 – Este radioisótopo tem sua origem na reação dos nêutrons térmicos com o Argônio-40 existente no ar atmosférico dissolvido na água, $^{40}\text{Ar}(n,\gamma)^{41}\text{Ar}$.

Este elemento contribui sensivelmente nos níveis de radiação na superfície, além de possuir como agravante o fato de desprender-se continuamente para o ambiente.

Sua influência pode ser reduzida tanto através de degaseificadores colocados no circuito de refrigeração, como pela colocação de exaustores em pontos estratégicos junto a superfície da piscina. Este último processo é o adotado no IEA-R1.

Sódio-24 e Magnésio-27 – Estes elementos são, como veremos posteriormente, os principais responsáveis pelos níveis de radiação na superfície livre da piscina. Eles podem ser formados através de dois processos bem distintos.

- a) Pela ativação com nêutrons térmicos dos elementos ^{23}Na e do ^{26}Mg , existentes como impurezas na água da piscina.
- b) Através de reações de recuo $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ e $^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$ que ocorrem no alumínio estrutural dos elementos combustíveis.

Estes radioisótopos, formados no interior das placas de alumínio, podem ser difundidos para a água da piscina entrando em circulação e tendo assim condições de atingir a superfície livre da piscina através das correntes hidráulicas.

Alumínio-28 – É formado pela reação do Alumínio-27, com nêutrons térmicos. Apesar deste último elemento ser predominante no núcleo do reator a quantidade de Al-28 radioativo existente na água não é muito elevada dado principalmente, aos seguintes motivos:

1) a meia-vida do ^{28}Al é relativamente pequena ($T_{1/2} = 2,3 \text{ min}$).

Como consequência, a detecção deste radioisótopo na superfície da piscina, somente será possível quando a sua formação e seu desprendimento, através da corrosão ou arraste mecânico, forem praticamente simultâneos.

2) Nas condições de operação a que está submetido o alumínio estrutural no REA-R1, as taxas de corrosão são mantidas em valores mínimos.

O ^{28}Al é formado predominantemente pelo alumínio existente na parte estrutural do reator, mas também, pode ser formado pela reação de nêutrons térmicos com:

- a) Alumínio existente como impurezas na água de alimentação do reator.
- b) Alumínio formado pelo decaimento β^- do ^{27}Mg .

Na Figura 9 apresentamos o espectro típico das radiações gama emitidas por amostras de água da piscina. Neste espectro podemos constatar a predominância de contagens referentes às radiações características dos radioisótopos acima descritos.

Constatamos também um pico de contagem cuja energia $E = 0,511 \text{ MeV}$, não é característica destes radioisótopos. Não nos foi possível determinar qual o elemento responsável pelo mesmo. Segundo o decaimento das contagens a meia-vida do(s) elemento(s) responsável(is), (que são emissores β^-), está compreendida entre 10 a 20 minutos.

A não definição da meia-vida nos leva a concluir que não se trata somente da energia de escape resultante da interação das radiações γ de alta energia no interior do detector, como inicialmente poderíamos imaginar.

Apresentaremos a seguir um cálculo teórico da taxa de formação destes elementos radioativos identificados na água da piscina e que são responsáveis pelos níveis de radiação observados na superfície livre da piscina. Tentaremos portanto, determinar qual será a contribuição de cada um destes elementos na atividade específica total da água, já que a mesma está diretamente ligada aos níveis de radiação.

Iniciaremos por determinar a atividade do ^{24}Na .

3.2 – Atividade do Sódio-24

O ^{24}Na provém principalmente das reações de recuo $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$, que ocorrem nas placas dos elementos combustíveis, e também da ativação do ^{24}Na que se encontra dissolvido na água como impureza pela reação $^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$.

Sendo dois processos distintos de formação, iremos determinar a concentração de atividade de cada um deles separadamente começando pela reação de recuo $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$.

3.2.1 – Atividade da Água Dado ao ^{24}Na Proveniente da Reação de Recuo $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$

Para se determinar a atividade de ^{24}Na devemos calcular, primeiramente:

- O valor do "Q" da reação;
- O valor da energia limiar E_{Tr} que o nêutron deverá possuir para poder causar esta reação;
- A relação entre a energia do nêutron incidente e a energia do núcleo de recuo (^{24}Na).

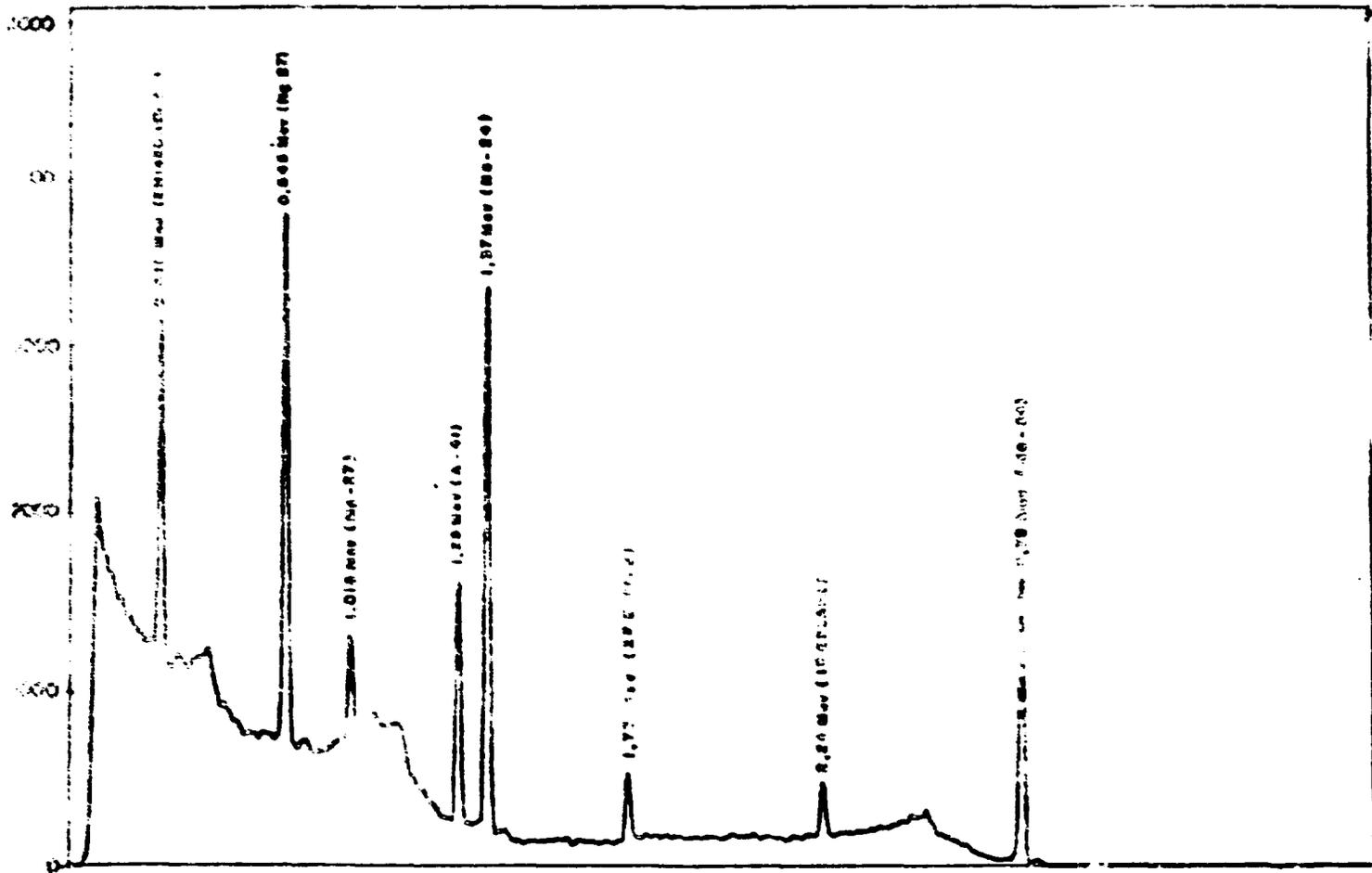


Figura 9 - Espectro Típico da Água da Piscina do Reator IEA-R1

Em segundo lugar, devemos determinar o alcance dos núcleos de recuo, tanto no alumínio estrutural como no óxido de alumínio $\text{Al}(\text{OH})_3$, em função da energia cinética inicial do núcleo de recuo.

Este cálculo será necessário para se constatar que os núcleos de recuo existentes na água são formados unicamente na camada de óxido e no alumínio puro das placas dos elementos combustíveis.

Em terceiro lugar, determinaremos o número de núcleos de sódio-24 que alcançam a água, em função da sua energia inicial, após a sua formação. Faremos esses cálculos para intervalos de energia de 1 MeV para então integrarmos estes valores na faixa de energia compreendida desde E_{Th} até o valor de 10^8 e onde praticamente o espectro de nêutrons cai a zero.

Finalmente a partir do número total de núcleos de ^{24}Na assim difundidos para a água, calculamos a sua concentração e atividade específica na água da piscina.

3.2.1.1 – Determinação do "Q" da Reação

Para a determinação do "Q" da reação $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ utilizamos a Eq.1 Ref.(8).

$$Q = E_4 + E_3 + E_1 = [(M_2 + M_1) - (M_4 + M_3)] \cdot C^2 \quad (\text{Eq. 1})$$

onde:

M_1, E_1 – massa e energia da partícula incidente (Nêutron)

M_2, E_2 – massa e energia do alvo (Alumínio)

M_3, E_3 – massa e energia da partícula emergente (partícula α)

M_4, E_4 – massa e energia do núcleo de recuo (^{24}Na)

C – velocidade da luz no vácuo.

Sendo:

$$M_1 = 1,00896 \text{ u.a.m}$$

$$M_3 = 4,00388 \text{ u.a.m}$$

$$M_2 = 26,98990 \text{ u.a.m}$$

$$M_4 = 23,99831 \text{ u.a.m}$$

Substituindo estes valores na Eq.1, encontramos:

$$Q = 3,1 \text{ MeV}$$

3.2.1.2 – Limiar de Energia para a Reação

Como os produtos da reação, pela lei da conservação da quantidade de movimento, não podem ter energia cinética nula, é necessário que se faça uma correção no valor de "Q" para que possamos obter o valor da energia mínima que deverá possuir a partícula incidente (nêutron) para causar a reação $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$. (8)

$$E_{Th} = Q \left(\frac{M_2 + M_1}{M_2} \right) = 3,2 \text{ MeV}$$

3.2.1.3 – Relação Entre a Energia do Nêutron Incidente e a Energia do Núcleo de Recuo

Esta relação é obtida pela solução da Eq.II (Veja dedução no Apêndice A).

$\rho^2 - 2A + B = 0$, (Eq. II), cuja solução é dada por

$$\rho = A + \sqrt{A^2 - B} \quad (\text{Eq. III})$$

onde: $\rho = E_4$

$$A = \frac{\sqrt{M_1 \cdot M_4 \cdot E_1}}{M_1 + M_4} \cos \psi$$

$$B = \frac{M_1 \cdot Q + (M_1 - M_1) \cdot E_1}{M_1 + M_4}$$

Substituindo os valores já conhecidos, poderemos determinar A e B em função de E_1 .

$$A^2 = 0,0306 \cdot E_1 \cdot \cos^2 \psi$$

$$B = 0,457 - 0,107 \cdot E_1$$

Para a determinação da energia inicial (E_4) do núcleo de recuo em função da energia (E_1) do nêutron incidente, adotaremos a hipótese simplificativa na qual todos os núcleos de recuo quando formados, máxima energia possível. Portanto, o ângulo de emissão considerado será $\psi = 0$.

Tabela III.1

Relação entre a Energia do Nêutron Incidente (E_1) e a Energia Inicial (E_4) do Núcleo de Recuo (^{24}Na) para $\psi = 0$

E_1 (MeV)	E_4 (MeV)	E_1 (MeV)	E_4 (MeV)
4,0	0,429	10,0	2,285
5,0	0,759	11,0	2,585
6,0	1,071	12,0	2,885
7,0	1,379	13,0	3,182
8,0	1,682	14,0	3,483
9,0	1,984	15,0	3,783

3.2.1.4 – Alcance dos Núcleos de Recuo nos Meios: Alumínio Puro e Óxido de Alumínio (Al(OH)₃)

Para a determinação do alcance dos núcleos de recuo em função de suas energias iniciais, foram utilizados dados de Northcliffe e Shilling⁽¹⁸⁾, onde dispomos de valores tabelados do alcance e da função de moderação ($-dE/dX$) para íons pesados em diversos meios materiais.

O alcance dos íons pesados, é obtido por integração numérica dos valores inversos da função de moderação, em relação a sua energia.

$$R(E) = \int_0^E \left(-\frac{dE}{dX} \right)^{-1} dE$$

Para valores de energia inferiores a 0,0125 MeV/u.a.m, a determinação do alcance é efetuado por integração analítica considerando que a função de moderação tem por expressão:

$$-\frac{dE}{dX} = K \cdot E^{1/2} \text{ para } : 0 \leq E \leq 0,0125 \text{ (MeV/u.a.m)}$$

K é obtido utilizando-se o valor da função de moderação relativa a $E = 0,0125$ MeV/u.a.m., para o íon considerado (L. S. D. Theory,⁽¹⁸⁾). Os valores da função de moderação para um dado íon com energia E , e com número de massa "A" são válidos para qualquer isótopo deste íon.

Entretanto, neste caso, os valores da energia E' do isótopo de número de massa A' , deve ser obtida por meio da multiplicação de E pela reação $\frac{m'}{m} \approx \frac{A'}{A}$ ou seja:

$$E' = E \cdot \frac{m'}{m} \approx E \cdot \frac{A'}{A}$$

Quando o meio onde o íon atravessa é um meio composto de diversos elementos, a função de moderação pode ser expressa pela regra de adição de Bragg⁽¹⁸⁾, sendo:

$$\left(\frac{dE}{dX} \right)_{\text{composto}} = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^n N_i A_i \left(\frac{dE}{dX} \right)_i$$

onde

$\left(\frac{dE}{dX} \right)_i$ – é a função de moderação para cada elemento do composto.

M – peso molecular do composto.

N_i – número de átomos de peso atômico A_i de cada elemento formador do composto.

Para o caso da alumina Al(OH)₃, a função de moderação será, portanto:

$$\left(\frac{dE}{dX} \right)_{\text{Al(OH)}_3} = \frac{1}{78} \left[1 \times 27 \left(\frac{dE}{dX} \right)_{\text{Al}} + 3 \times 16 \left(\frac{dE}{dX} \right)_{\text{O}} + 3 \times 1 \left(\frac{dE}{dX} \right)_{\text{H}} \right]$$

Deste modo, possuindo os valores do alcance e das funções de moderação do íon ^{23}Na no Al, O e H, poderemos determinar seus valores correspondentes para o íon ^{24}Na como:

$$m(^{23}\text{Na}) = 22,997139 \text{ u.m.a.}$$

$$m(^{24}\text{Na}) = 23,998651 \text{ u.m.a.}$$

Temos que: $\frac{m'}{m} = 1,043549$

Sendo a densidade de $\text{Al(OH)}_3 = \rho = 2,55 \text{ (gr/cm}^3\text{)}$ poderemos determinar o alcance dos núcleos de recuo (em cm).

Na Figura 11, temos a curva do alcance (em mg/cm^2) dos núcleos de ^{24}Na no alumínio, em função de sua energia.

Tabela III.2

Determinação do Alcance do Núcleo de Recuo Na-24 no Alumínio, em Função de sua Energia Inicial (E_0)

E (MeV) Na-23	Alcance ($\frac{\text{mg}}{\text{cm}^2}$) no Al	$E' = E$ (MeV) Na 24	Alcance mg/cm^2 no Al	Alcance no Al em microns
0,2874	0,125	0,2990	0,1394	0,483
0,3678	0,153	0,3838	0,1596	0,590
0,4598	0,182	0,4798	0,1899	0,703
0,5747	0,216	0,5997	0,2254	0,835
0,7357	0,259	0,7677	0,2702	1,000
0,9196	0,304	0,9596	0,3172	1,175
1,1495	0,354	1,1995	0,3674	1,368
1,3794	0,400	1,4394	0,4174	1,545
1,6093	0,443	1,6793	0,4623	1,712
1,8392	0,483	1,9192	0,5040	1,866
2,0691	0,520	2,1592	0,5426	2,009
2,2990	0,557	2,3991	0,5812	2,152
2,8738	0,642	2,9989	0,6699	2,481
3,6784	0,749	3,8385	0,7816	2,894
4,5980	0,862	4,7982	0,8995	3,331

3.2.1.5 – Determinação do Alcance R(E) dos Núcleos de Recuo (^{24}Na) na Alumina, Al(OH)_3 ,

Como verificamos anteriormente, a determinação do alcance para energias até 0,0125 MeV/u.m.a. pode ser feita analiticamente por meio de expressão:

$$R(E) = \int_0^E \left(\frac{dE}{dX} \right)^{-1} dE \quad \text{onde:} \quad \frac{dE}{dX} = K E^{1/2}$$

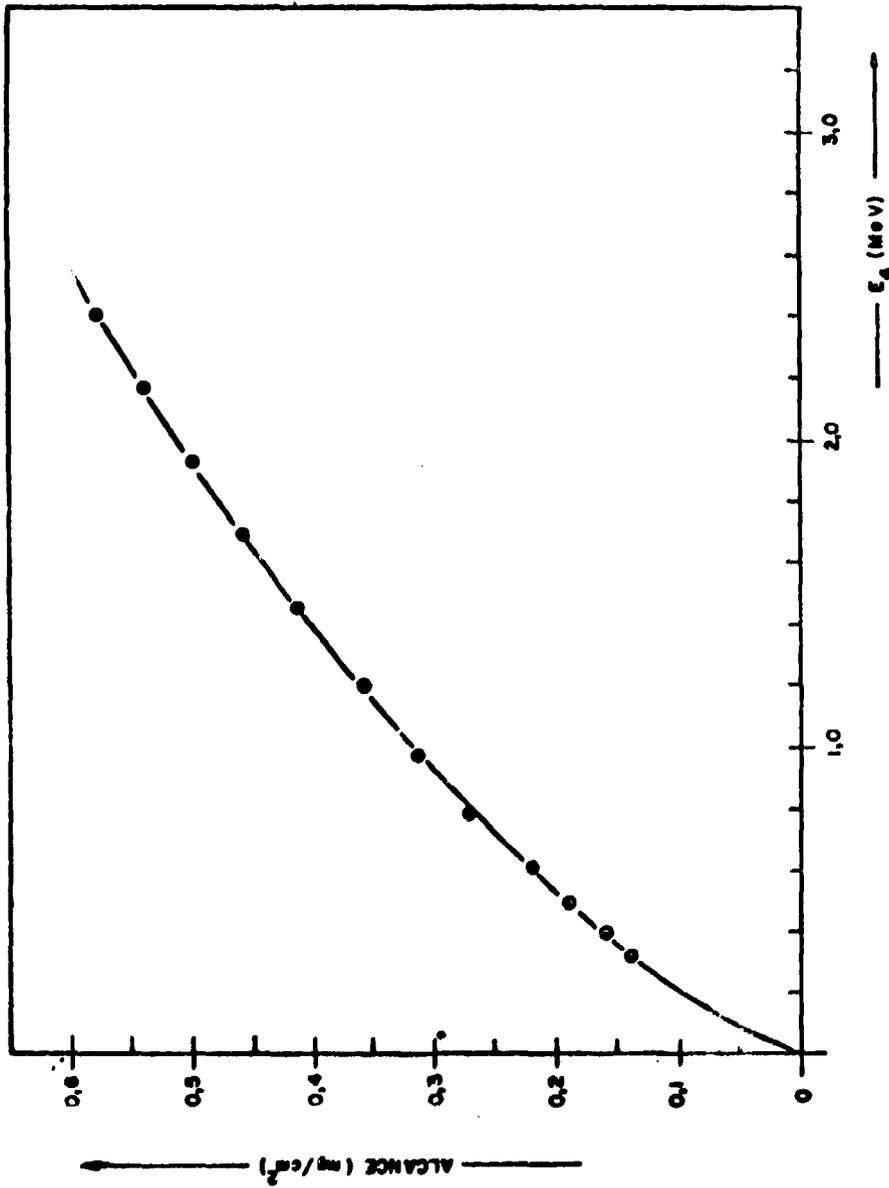


Figura 11 - Alcance dos Núcleos de Na-24 no Alumínio

A energia equivalente a 0,0125 MeV/u.m.a. para o núcleo de ^{24}Na é de $E' = 0,2999$ (MeV).

Dos valores tabelados da função de moderação (Tabela III.3) obtém-se:

$$\left(\frac{dE}{dX}\right)_{0,2999 \text{ MeV}} = 2,537 \left(\frac{\text{MeV}}{\text{mg/cm}^2}\right)$$

portanto:

$$K = \frac{2,5376}{\sqrt{0,2999}} = 4,6337$$

$$R(E) = \frac{1}{K} \int_0^E E^{-1/2} dE = \frac{2}{K} |E^{1/2}|_0^{0,2999}$$

$$R(E)_{E = 0,2999 \text{ (MeV)}} = 0,23636 \text{ (mg/cm}^2\text{)}$$

A partir da energia $E = 0,2999$ MeV, podemos tabelar as funções de moderação do ^{24}Na nos diferentes materiais constituintes da alumina, e consequentemente determinar a função de moderação do ^{24}Na na $\text{Al}(\text{OH})_3$.

$$\left(\frac{dE}{dX}\right)_{\text{Al}(\text{OH})_3} = \frac{1}{78} \left[27 \left(\frac{dE}{dX}\right)_{\text{Al}} + 48 \left(\frac{dE}{dX}\right)_{\text{O}} + 3 \left(\frac{dE}{dX}\right)_{\text{H}} \right]$$

Tabela III.3

Determinação da Função de Moderação (dE/dX) dos Núcleos de Na no $(\text{OH})_3$ em Função de sua Energia (E_4)

E_4 (MeV)	Funções de Moderação (MeV/mg/cm ²)				$\frac{(dX/dE)_{\text{Al}(\text{OH})_3}}{\text{(mg/cm}^2\text{/MeV)}}$
	$(dE/dX)_{\text{Al}}$	$(dE/dX)_{\text{O}}$	$(dE/dX)_{\text{H}}$	$(dE/dX)_{\text{Al}(\text{OH})_3}$	
0,2999	2,300	2,291	8,627	2,537	0,394
0,3838	2,603	2,553	9,578	2,840	0,352
0,4778	2,910	2,788	10,417	3,123	0,320
0,5897	3,253	3,042	11,322	3,433	0,291
0,7677	3,681	3,361	12,786	3,825	0,261
0,9596	4,115	3,686	13,786	4,228	0,236
1,1995	4,601	4,113	15,229	4,709	0,212
1,4394	5,035	5,511	16,816	5,165	0,193
1,6793	5,427	4,955	18,398	5,635	0,177
1,9192	5,786	5,404	20,076	6,100	0,163
2,1592	6,115	5,870	21,708	6,563	0,152
2,3991	6,419	6,329	23,494	7,020	0,142
2,9989	7,085	7,475	28,129	8,134	0,123
3,8385	7,835	9,151	34,709	9,678	0,103
4,7882	8,489	10,883	41,680	11,238	0,089

Colocando em gráfico os valores inversos da função (dX/dE) $\text{mg/cm}^2/\text{MeV}$ poderemos obter, através da integração gráfica, o alcance dos núcleos de ^{24}Na em função de sua energia inicial E_4 . (Veja Figura 12).

$$R(E) = \int_0^{0,2999\text{MeV}} \frac{dX}{dE} dE + \int_{0,2999\text{MeV}}^{E_4} \frac{dX}{dE} dE.$$

Na Tabela III.4 mostramos os valores do alcance dos núcleos de ^{24}Na na Al(OH)_3 em função da energia inicial do núcleo e em função das energias dos nêutrons causadores da reação.

Tabela III.4

Alcance $R(E_4)$ dos Núcleos de ^{24}Na no Al(OH)_3 em Função de sua Energia E_4 ou da Energia E_1 do Nêutron Causador da Reação

E_1 (MeV)	E_4 (MeV)	$R(E_4)$ (mg/cm^2)	$R(E_4)$ (microns)
4,0	0,429	0,2833	1,11
5,0	0,759	0,3808	1,50
6,0	1,070	0,4559	1,80
7,0	1,379	0,5208	2,05
8,0	1,682	0,5778	2,28
9,0	1,980	0,6280	2,48
10,0	2,285	0,6740	2,66
11,0	2,585	0,7162	2,83
12,0	2,885	0,7554	2,98
13,0	3,182	0,7917	3,12
14,0	3,483	0,8260	3,26
15,0	3,783	0,8581	3,39

Podemos verificar pelas Tabelas III.2 e III.4, que o alcance máximo dos núcleos de ^{24}Na produzidos pela reação (n, α) tanto no alumínio puro como na alumina, Al(OH)_3 , não ultrapassa 4 microns.

Aplicando a equação fornecida nos trabalhos de Griess⁽¹¹⁾, dada no Item 2.2, referente a formação de camada de óxido de alumínio nas placas dos elementos combustíveis, para condições de funcionamento que temos atualmente no IEA-R1, poderemos calcular o tempo de funcionamento do reator para que a camada de óxido atinja a espessura de 4 microns igual 0,1574 milésimos de polegada.

Para tanto, vamos considerar a temperatura média superficial das placas dos elementos combustíveis como sendo de $90^{\circ(13)}$.

As condições de funcionamento do reator IEA-R1 são:

Potência: 2 MW; Vazão do circuito primário: $590,4 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right)$.

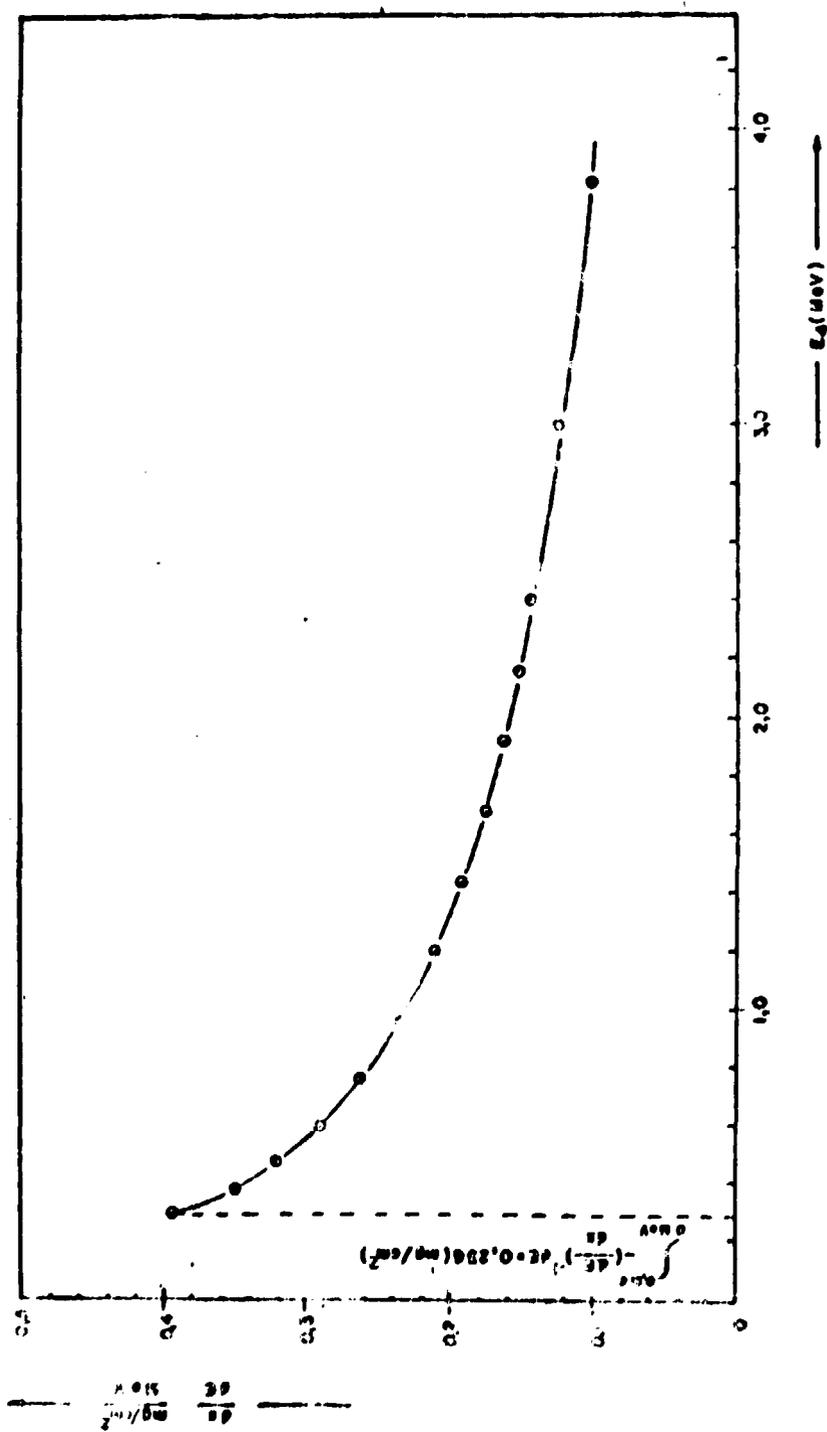


Figura 12 - Alcance dos Núcleos de Na-24 no Al(OH)_3

$$0,1574 = 12000 \cdot \theta^{0,778} \times \exp\left\{ \frac{4640}{363 \cdot \theta} \right\}$$

portanto:

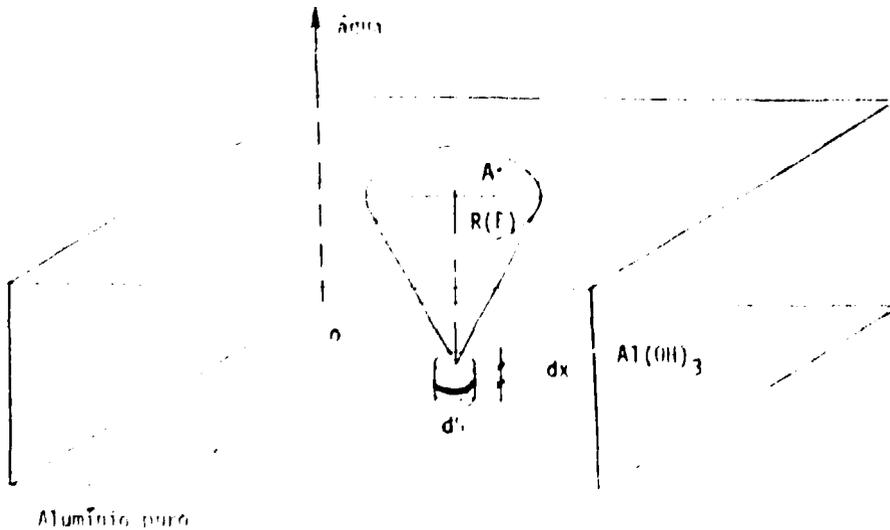
$$\theta = 121 \text{ (horas)}$$

O tempo de operação encontrado, de 121 horas, é totalizado em 3 semanas de operação do reator para o ritmo atual de funcionamento. Sendo o tempo médio de utilização de um elemento combustível no núcleo do reator de 2400 horas, podemos considerar que todas as placas dos elementos combustíveis estão recobertas com uma camada de óxido superior a 4 microns.

Podemos concluir assim que todos os núcleos de ^{24}Na que se difundem para a água da piscina provêm de reações que se processam na camada de óxido de alumínio.

3.2.1.6 – Determinação do Número de Núcleos de ^{24}Na Difundidos para a Água da Piscina

Vamos considerar um elemento superficial de uma placa combustível submetida a um fluxo de nêutrons rápidos, onde $R(E_1)$ é o percurso dos núcleos de ^{24}Na com energia E_1 , formados na camada de $\text{Al}(\text{OH})_3$ existente na superfície desta placa. Vamos considerar também que estes núcleos atravessam a superfície de separação S entre a camada de óxido e a água logo que os mesmos cheguem à S com uma energia superior a energia de agitação térmica do meio.



É necessário considerar que a quantidade total de núcleos de ^{24}Na que se difundem para a água é uma função tanto da posição como da energia com que o núcleo é formado.

Denominando-se de " P " a taxa de núcleos que se difundem para a água, teremos:

$$P = \int_{\Delta E} P(E) dE = \int_{\Delta E} \int_V P(\vec{r}, E) d\vec{r} dE$$

Sendo $\sigma(E)$ a secção de choque para a reacção e $\phi(E)$, o fluxo de nêutrons, a taxa de núcleos de ^{24}Na originados por reacções do alumínio com nêutron de energia E será dada por:

$$N \cdot \sigma(E) \cdot \phi(E) \cdot dS \cdot dx$$

onde, N é o número de átomos de ^{27}Al existentes por cm^3 no $\text{Al}(\text{OH})_3$, e dS e dx dimensões do cilindro elementar onde ocorrem as reacções (Figura 13).

Tendo em vista a geometria dos elementos combustíveis utilizados (Figuras 3 e 4), podemos considerar esta reacção como sendo isotrópica pois a superfície de qualquer placa combustível fica submetida a um fluxo de nêutrons rápidos que são provenientes tanto do interior da própria placa como do interior das placas adjacentes. Por outro lado, o espectro de nêutrons rápidos, utilizado nos cálculos, nos fornece os valores médios do fluxo para cada intervalo de energia. Assim, considerando esta reacção como sendo isotrópica, o número de núcleos de ^{24}Na que se dirigem para a água será dado pelos íons cuja direcção de emissão ficar no ângulo sólido $2\pi(1 - \frac{x}{R(E)})$ do cone representado na Figura 13.

O número de íons provenientes do elemento $dV = dS \cdot dx$, que se difundem para a água por unidade de tempo será de:

$$\frac{2\pi(1 - \frac{x}{R(E)})}{4\pi} N \cdot \sigma(E) \cdot \phi(E) \cdot dS \cdot dx$$

Integrando-se este valor em toda a superfície e sobre a espessura $R(E_4)$, obteremos o número total de núcleos formados por nêutrons com energia E que se difundem da camada de óxido com espessura $R(E)$ para a água da piscina.

$$P(E) = \frac{1}{2} N \cdot \sigma(E) \cdot \phi(E) \cdot \int_0^{R(E_4)} [1 - \frac{x}{R(E_4)}] dx \int dS$$

$$P(E) = \frac{1}{4} \cdot N \cdot \sigma(E) \cdot \phi(E) \cdot R(E) \cdot S \left(\frac{\text{núcleos}}{S} \right)$$

a) O valor de " N " poderá ser determinado pela composição da camada de óxido $\text{Al}(\text{OH})_3$.

$$N_{\text{Al}} = 1,95 \times 10^{22} \left(\frac{\text{átomos de Al}}{\text{cm}^3} \right)$$

- b) Os valores de secção de choque $[\sigma(E)]$ para a reacção $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$, podem ser obtidos da Ref. ⁽²⁴⁾.
- c) O calor de "S" vem a ser a superfície de alumínio em contato com a água e que está sujeita a um fluxo de nêutrons rápidos. "S" será considerado como sendo igual a superfície total das placas dos elementos combustíveis $[H = 62,6(\text{cm}); L = 7(\text{cm})]$ somada a superfície das placas estruturais destes mesmos elementos.

Sendo o arranjo do núcleo do reator constituído por 21 elementos combustíveis normais e 4 de controle, a superfície de alumínio em contato com a água é sujeita a um fluxo de nêutrons rápidos será, segundo dados da Tabela I do capítulo 1.1:

$$s_1 = 21 \times 1,727 (\text{m}^2) = 36,26 (\text{m}^2)$$

$$s_2 = 4 \times 1,113 (\text{m}^2) = 4,45 (\text{m}^2)$$

$$S = s_1 + s_2 = 4,07 \times 10^5 (\text{cm}^2)$$

- d) A distribuição do fluxo de nêutrons rápidos $\phi(E)$ está representada na Figura 14 e foi obtida utilizando-se os programas de cálculo:

- HAMMER (teoria de transporte) e
- EXTERMINATOR (teoria da difusão) para uma configuração básica do núcleo do reator (Figura 15), onde as barras de segurança e de controle foram consideradas como estando totalmente retiradas. Ref. ⁽¹⁹⁾.

Com estes dados, poderemos determinar os valores de $P(E)$ em função dos intervalos de energia (ΔE) considerados (Tabela III.5)

A integração gráfica desta função $[O(E) \times E]$ nos fornecerá o número total "P" de núcleos de ^{24}Na que se difundem para a água por unidade de tempo, quando o reator estiver funcionando na potência de 10 MW.

Para potências diferentes de 10 MW, o valor de "P" sofrerá variações proporcionais. Como pode ser verificado pela expressão de $P(E)$, uma variação na potência do reator apenas modificará os valores do fluxo de nêutrons proporcionalmente.

Os valores da função $[P(E)/\Delta E]$ versus E, estão mostrados no gráfico da Figura 16, por integração numérica, podemos obter o número total de núcleos de ^{24}Na que são difundidos por segundo para a água da piscina do reator IEA R1 quando estiver funcionando na potência de 10 MW.

Portanto

$$(P)_{10 \text{ MW}} = \int_{3,2 \text{ MeV}}^{11 \text{ MeV}} P(E) dE = 9,056 \times 10^{10} \left(\frac{\text{Nucleos de } ^{24}\text{Na}}{\text{s}} \right)$$

Para a potência de 2 MW, temos: proporcionalmente

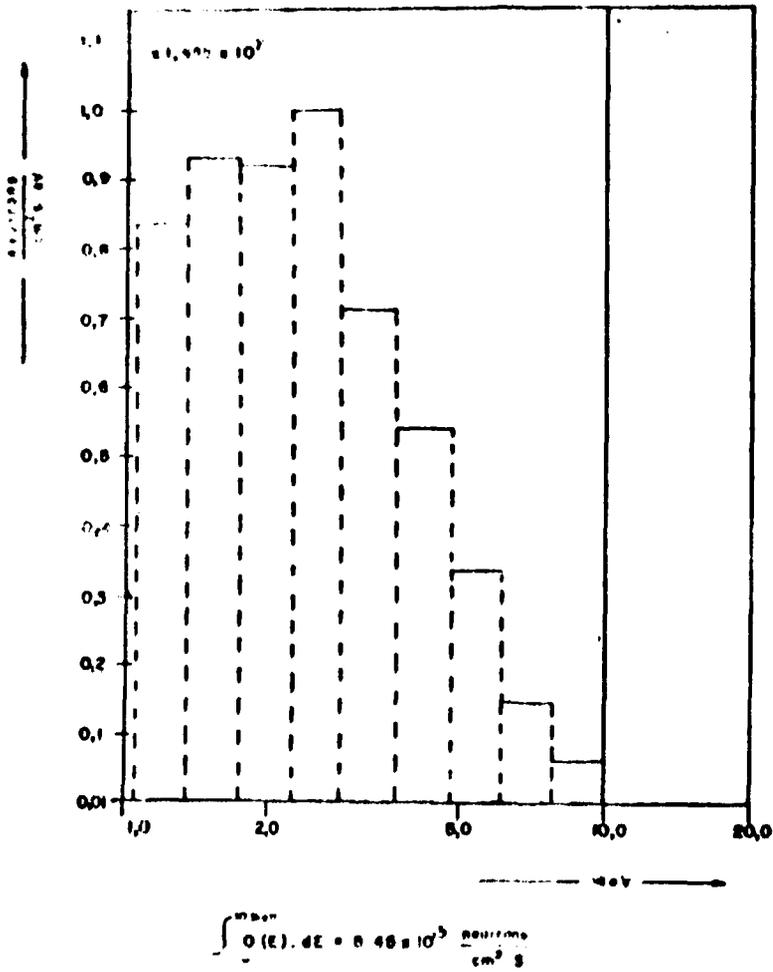
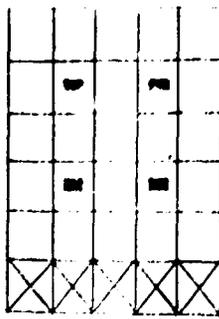


Figura 14 -- Distribuição do Fluxo de Nêutrons Rápidos no Interior do Núcleo do Reator IEA-R1 Operando em 10 MW.



Onde:

- Elemento combustível normal
- Elemento combustível de controle
- Elemento refletor (grafite)

Figura 15 Configuração Básica do Núcleo do IEA-R1

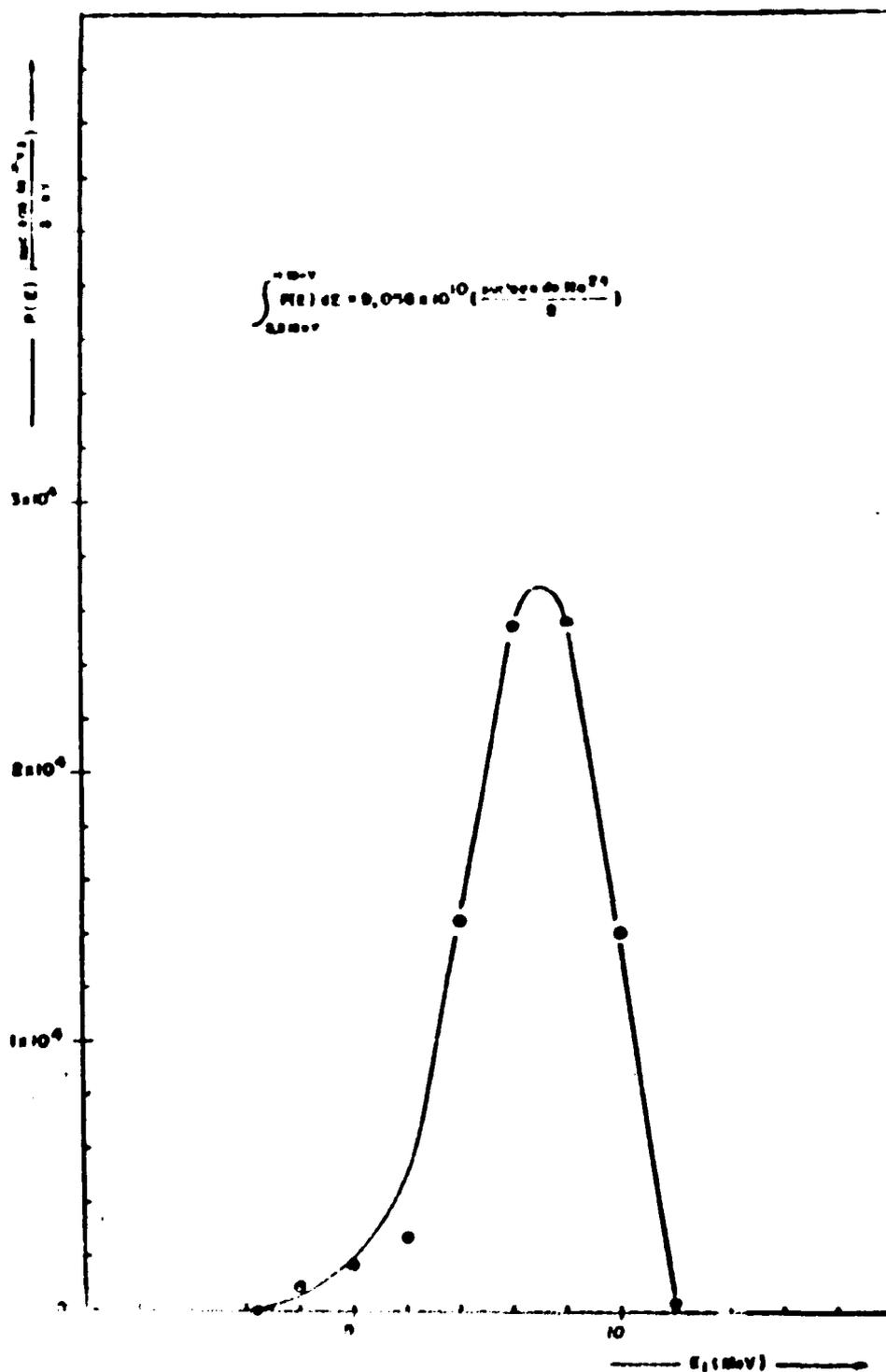


Figura 16 Taxa de Produção de Núcleos de Na 24 em Função da Energia dos Nêutrons Causados pela Reação $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$.

Tabela III.5

Determinação do Número de Núcleos de ^{24}Na Difundidos para a Água da Piscina, por Intervalos de Energia $|P(E)/\Delta E|$ (Núcleos de $^{24}\text{Na}/\text{e.V.s}$)

E (MeV) Neutron	E_4 (MeV) ^{24}Na	R(E_4) (cm)	$\sigma(E)$ (cm^2)	$\phi(E)$	P(E)
				Nêutrons $\text{cm}^2 \cdot \text{s.eV}$	Núcleos de ^{24}Na s.eV
4,0	0,429	$1,11 \times 10^{-4}$	$0,5 \times 10^{-27}$	$8,316 \times 10^6$	$0,091 \times 10^4$
5,0	0,759	$1,50 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-27}$	$5,643 \times 10^6$	$0,168 \times 10^4$
6,0	1,070	$1,80 \times 10^{-4}$	$2,0 \times 10^{-27}$	$3,712 \times 10^6$	$0,265 \times 10^4$
7,0	1,379	$2,05 \times 10^{-4}$	$16,0 \times 10^{-27}$	$2,227 \times 10^6$	$1,449 \times 10^4$
8,0	1,682	$2,28 \times 10^{-4}$	$42,0 \times 10^{-27}$	$1,336 \times 10^6$	$2,538 \times 10^4$
9,0	1,980	$2,48 \times 10^{-4}$	$70,0 \times 10^{-27}$	$0,742 \times 10^6$	$2,555 \times 10^4$
10,0	2,285	$2,66 \times 10^{-4}$	$90,0 \times 10^{-27}$	$0,297 \times 10^6$	$1,410 \times 10^4$
11,0	2,585	$2,83 \times 10^{-4}$	$108,0 \times 10^{-27}$	$0,0005 \times 10^6$	$0,030 \times 10^4$
12,0	2,885	$2,98 \times 10^{-4}$	$122,0 \times 10^{-27}$	—	—

Tabela III.6

Taxa de Difusão de Núcleos de ^{24}Na para a Água da Piscina do IEA-R1 Operando em 10 MW

E (MeV) Nêutron	E_4 (MeV) ^{24}Na	$\Delta E = (E - E_{Th})$ (MeV)	$P = P(E) \times \Delta E$ (Núcleos $^{24}\text{Na}/\text{s}$)
4,0	0,429	$4 - 3,2 = 0,8$	$0,08 \times 10^9$
5,0	0,759	$5 - 3,2 = 1,8$	$0,74 \times 10^9$
6,0	1,070	$6 - 3,2 = 2,8$	$2,34 \times 10^9$
7,0	1,379	$7 - 3,2 = 3,8$	$11,03 \times 10^9$
8,0	1,682	$8 - 3,2 = 4,8$	$31,14 \times 10^9$
9,0	1,980	$9 - 3,2 = 5,8$	$63,80 \times 10^9$
10,0	2,285	$10 - 3,2 = 6,8$	$83,49 \times 10^9$
11,0	2,585	$11 - 3,2 = 7,8$	$90,56 \times 10^9$

$$(P)_{2 \text{ MW}} = 1,81 \times 10^{10} \left(\frac{\text{Núcleos de } ^{24}\text{Na}}{\text{s}} \right)$$

3.2.1.7 – Cálculo da Atividade da Água da Piscina Provocado por ^{24}Na Provenientes das Reações de Recuo

O tempo teórico (t_1) para que o volume de água contido no compartimento principal de operação do reator, circule através do núcleo do reator (tanque de decaimento, trocador de calor e tubulações), nas condições atuais de funcionamento é de

$$t_1 = \frac{\text{volume considerado do circuito primário}}{\text{vazão do circuito primário (G)}}$$

$$t_1 = \frac{192,4 \text{ (m}^3\text{)}}{590 \text{ (m}^3\text{/h)}} = 0,325 \text{ h} = 1173,17 \text{ s}$$

O volume do compartimento de estocagem da piscina foi considerado isolado através da colocação das comportas que o separa do compartimento de operação. Nosso objetivo, com este procedimento, foi o de obter uma perfeita homogeneização dos produtos radioativos dissolvidos na água contida no compartimento de operação pois é neste compartimento que existe a saída e o retorno da água de refrigeração e, conseqüentemente, as correntes hidráulicas mais intensas.

Para uma configuração básica de 25 elementos combustíveis o volume de água existente entre as placas dos elementos e demais canais de refrigeração "Vn" é de 0,0537 (m³).

Deste modo o tempo (t_1) de permanência da água de refrigeração no interior do núcleo será de:

$$t_1 = \frac{V_n}{\text{Vazão Circ. Primário}} = \frac{V_n}{G} = 0,327 \text{ (s)}$$

Um determinado volume de água ao passar pelo núcleo do reator receberá ($P \times t_1$) núcleos de ^{24}Na . Portanto, a quantidade destes núcleos que é recebida por unidade de volume de água será de:

$$N_0 = \frac{P \cdot t_1}{V_n} \text{ (núcleos de } ^{24}\text{Na/cm}^3\text{)}$$

podemos verificar no entanto que $\frac{t_1}{V_n} = \frac{1}{G}$, desta forma, o número de núcleos de ^{24}Na recebidos por cm³ de água ao passar pelo núcleo do reator será

$$N_0 = \frac{P}{G} \text{ (núcleos de } ^{24}\text{Na/cm}^3\text{)}$$

Sendo de "Y" (Núcleos/cm³) a quantidade de núcleos de ²⁴Na existente na água quando esta penetra no núcleo, iremos ter (Y+P/G) (Núcleos/cm³) na saída do mesmo, pois podemos desprezar totalmente o decaimento do ²⁴Na durante o tempo de passagem da água pelo núcleo.

No caso deste processo ser efetuado em regime permanente a atividade do ²⁴Na entrará em equilíbrio após um determinado tempo de operação, i.e. o número de núcleos ganhos pela formação será igual ao número de núcleos "perdidos" por decaimento.

Quando o equilíbrio for alcançado a quantidade de ²⁴Na que entra através do núcleo do reator será dada por:

$$Y = \alpha (Y + P/G) \cdot e^{-\lambda t_3}$$

onde,

λ = é a constante de decaimento do ²⁴Na.

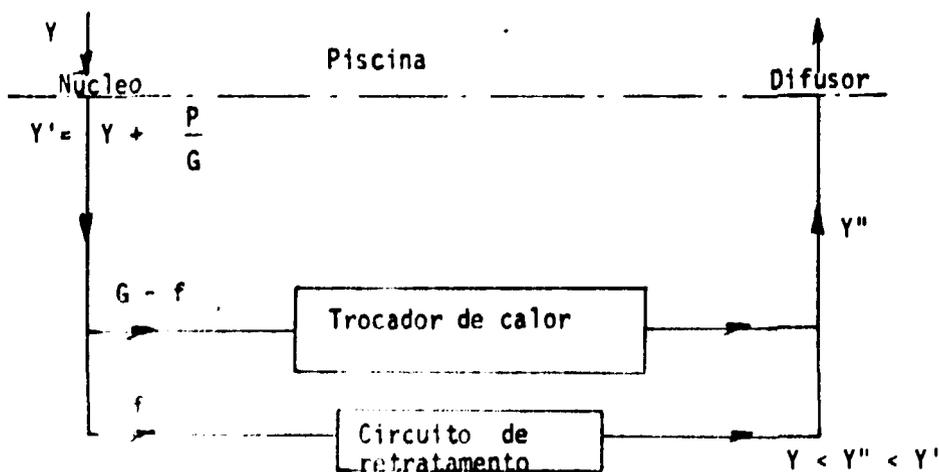
α = é a fração da água de refrigeração que não passa pelo sistema de retratamento da água da piscina e, portanto, $\alpha = (G - f)/G$, sendo f a vazão do circuito de retratamento = 4,54 (m³/h).

$$\alpha = \frac{590,4 - 5,54}{590,4} \approx 1$$

portanto

$$Y = \left(Y + \frac{P}{G} \right) \cdot e^{-\lambda t_3} = \frac{\frac{P}{G} \cdot e^{-\lambda t_3}}{1 - e^{-\lambda t_3}} \left(\frac{\text{Núcleos de } ^{24}\text{Na}}{\text{cm}^3} \right)$$

Esquematizando este processo temos:



Esquema de formação e decaimento do ²⁴Na no circuito de refrigeração.

Na saída do núcleo, a quantidade de ^{24}Na será:

$Y' = Y + P/G$ substituindo-se o valor de Y obtido anteriormente temos:

$$Y' = \frac{P/G \cdot e^{-\lambda t_1}}{1 - e^{-\lambda t_1}} + \frac{P}{G} = \frac{P/G}{1 - e^{-\lambda t_1}} + \frac{P/G}{1 - e^{-\lambda t_1}}$$

Sendo " t_2 " o tempo que a água de refrigeração permanece fora da piscina ou seja, desde sua entrada pelo núcleo até a sua reentrada na piscina através do difusor, poderemos determinar a quantidade de núcleos de ^{24}Na existente na água quando esta retorna à piscina (Y'').

$$Y'' = \frac{P/G}{1 - e^{-\lambda t_1}} \cdot e^{-\lambda t_2} \quad (\text{Eq. IV})$$

O volume de água considerado para o cálculo de t_2 que compreende o núcleo do reator, tubulações, trocador de calor e tanque de decaimento, é de $33,2 \text{ m}^3$ V_1 , portanto:

$$t_2 = \frac{V_1}{G} = 202,4 \text{ (s)}$$

A constante de decaimento para o ^{24}Na é dada por

$$\lambda = \frac{0,693}{15 \times 3600} = 1,283 \times 10^{-5} \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

$$e^{-\lambda t_2} = 0,9974 \approx 1$$

Como, $\lambda t_1 = 0,0238$, pode-se tornar $(1 - e^{-\lambda t_1}) = \lambda t_1$

Desta maneira a Equação (IV) fica simplificada para

$$Y'' = \frac{1}{\lambda t_1} \cdot \frac{P}{G} \left(\frac{\text{núcleos de } ^{24}\text{Na}}{\text{cm}^3} \right)$$

Lembrando que " λ " é definido como sendo a fração do número total de núcleos ativos que se desintegram por unidade de tempo, ao multiplicarmos a equação acima por esta constante obtemos o número de desintegrações por unidade de tempo e por centímetro cúbico que ocorrem na piscina. Este valor é, portanto, a atividade específica da água provocada pelo ^{24}Na .

$$A = \frac{1}{t_1} \cdot \frac{P}{G} \left(\frac{\text{desintegrações}}{\text{cm}^3 \cdot \text{s}} \right)$$

sendo

$$t_1 = 1173 \text{ (s)}$$

$$P = 1,81 \times 10^{10} \text{ (n\u00facleos de } ^{24}\text{Na/s)}$$

$$G = 590,4 \text{ (m}^3\text{/h)} = 1,164 \times 10^5 \text{ (cm}^3\text{/s)}$$

obtemos

$$A = 94 \left(\frac{\text{desintegra\u00e7\u00f5es}}{\text{cm}^3 \cdot \text{s}} \right) = 2,56 \times 10^{-3} \text{ (\u00b5Ci/cm}^3\text{)}$$

Denominaremos esta atividade como

A_1 = atividade da \u00e1gua da piscina ao ^{24}Na proveniente da rea\u00e7\u00e3o de recuo.

$$A_1 = 2,56 \times 10^{-3} \text{ (\u00b5Ci/cm}^3\text{)}$$

onde:

$$1 \mu\text{Ci} = 3,7 \cdot 3,7 \times 10^4 \text{ (desintegra\u00e7\u00f5es /s.)}$$

3.3 – C\u00e1lculo da Atividade da \u00c1gua Devida a Ativa\u00e7\u00e3o do ^{23}Na Dissolvido como Impureza

Como foi verificado no Cap\u00edtulo 2.4, a an\u00e1lise qu\u00edmica da \u00e1gua da piscina nos fornece⁽¹⁶⁾ um \u00edndice de 0,4 ppm de s\u00f3dio dissolvido na mesma como impureza. Esta determina\u00e7\u00e3o foi realizada atrav\u00e9s de an\u00e1lise por ativa\u00e7\u00e3o de amostras de \u00e1gua coletada na piscina.

Deste modo, \u00e9 determinado tanto o ^{24}Na j\u00e1 existente bem como o ^{23}Na que \u00e9 ativado no processo da an\u00e1lise (rea\u00e7\u00e3o $^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$).

Para determinarmos unicamente o ^{24}Na existente na \u00e1gua da piscina como impureza, foi coletada uma amostra de \u00e1gua que foi armazenada durante um per\u00edodo de 168 horas, tempo suficiente para que houvesse um total decaimento do ^{24}Na . O decaimento do ^{24}Na passa a formar o ^{23}Si , n\u00e3o existindo assim possibilidades para que haja uma reativa\u00e7\u00e3o deste s\u00f3dio.

Esta amostra foi submetida ent\u00e3o \u00e0 an\u00e1lise por ativa\u00e7\u00e3o efetuada normalmente⁽¹⁶⁾.

O c\u00e1lculo da quantidade de ^{23}Na existente na \u00e1gua da piscina foi feita da seguinte forma:

Dados:

M_A = massa da amostra.

M_p = massa de pureza

A_A – atividade da amostra.

A_p – atividade do padrão, temos que

$$M_A = \frac{A_A}{A_p} \times M_p = \frac{13.778 \text{ cpm}}{68.694 \text{ cpm}} \times 2 \text{ mg/100 ml} = 0,04 \text{ ppm}$$

Comparando com a Tabela II.5 do Capítulo 2.4 vemos que apenas 10% do sódio existente na água da piscina é formado pelo ^{23}Na .

Neste trabalho vamos admitir que o sistema de retratamento de água mantenha constante a taxa de ^{23}Na em todo o volume do circuito primário para o cálculo da atividade do sódio existente como impureza pelo reator.

Denominando-se por " N_0 " o número de átomos de ^{23}Na por cm^3 existentes na água, o número de núcleos de ^{24}Na formados neste mesmo volume, por unidade de tempo, será dado por $N_0 \cdot \sigma \cdot \phi$ onde:

σ = seção de choque para reação $^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$

ϕ_{Th} = Fluxo médio de nêutrons térmicos

Então durante o tempo " t_1 ", tempo de passagem da água pelo núcleo, o número de núcleos de ^{24}Na formados será dado por:

$$N_0 \cdot \sigma \cdot \phi_{Th} \cdot t_1 \quad (\text{átomos de } ^{24}\text{Na})$$

Podemos assim calcular o número de átomos de ^{24}Na que são formados em cada cm^3 de água da piscina, quando o processo de formação e decaimento atinge um regime de equilíbrio permanente. Como já foi citado no item 3.1.1.7, se na entrada do núcleo a taxa de ^{24}Na for de " Y ", teremos na saída do núcleo a taxa de " Y' ", sendo

$$Y' = Y + N_0 \cdot \sigma \cdot \phi_{Th} \cdot t_1 \cdot \left(\frac{\text{átomos de } ^{24}\text{Na}}{\text{cm}^3} \right) \quad (\text{Eq. V})$$

Após o volume de controle (1 cm^3) ter percorrido todo o circuito primário retornando assim à entrada do núcleo, o número de átomos de ^{24}Na deverá ser de,

$$Y = (Y + N_0 \cdot \sigma \cdot \phi_{Th} \cdot t_1) e^{-\lambda t_1}$$

$$Y = \frac{N_0 \cdot \sigma \cdot \phi_{Th} \cdot t_1}{1 - e^{-\lambda t_1}} e^{-\lambda t_1} \quad \left(\frac{\text{átomos } ^{24}\text{Na}}{\text{cm}^3} \right)$$

Substituindo-se o valor de Y na Eq. V acima, ficamos com,

$$Y' = \frac{N_o \cdot \sigma \cdot \bar{\phi}_{Th} \cdot t_1}{1 - e^{-\lambda t_3}} \left(\frac{\text{átomos de } ^{24}\text{Na}}{\text{cm}^3} \right)$$

que vem a ser a taxa de ^{24}Na existente na água na saída do núcleo quando o reator operar em regime permanente de equilíbrio.

Considerando novamente t_2 como sendo o tempo de permanência da água fora da piscina, a taxa de ^{24}Na , quando a água retorna através do difusor, será de:

$$Y'' = Y' \cdot e^{-\lambda t_2} = \frac{N_o \cdot \sigma \cdot \bar{\phi}_{Th} \cdot t_1}{1 - e^{-\lambda t_3}} e^{-\lambda t_2} \left(\frac{\text{átomos de } ^{24}\text{Na}}{\text{cm}^3} \right)$$

como para as condições atuais $t_2 = 202,4$ s podemos considerar:

$$e^{-\lambda t_2} = e^{-2,596 \times 10^{-3}} = 0,997 \approx 1$$

e, portanto,

$$Y'' = \frac{N_o \cdot \sigma \cdot \bar{\phi}_{Th} \cdot t_1}{1 - e^{-\lambda t_3}} \left(\frac{\text{átomos de } ^{24}\text{Na}}{\text{cm}^3} \right)$$

como $\lambda t_3 = 0,0238$, podemos considerar $(1 - e^{-\lambda t_3}) = \lambda t_3$, e a atividade por este processo será dada pela equação

$$A_2 = \lambda Y'' = \frac{N_o \cdot \bar{\phi}_{Th} \cdot t_1}{t_3} \left(\frac{\text{desintegrações}}{\text{cm}^3 \cdot \text{s.}} \right)$$

A_2 = atividade da água da piscina devida ao ^{24}Na formado pelo ^{23}Na existente como impureza.

Aplicando-se para as condições atuais de funcionamento do reator e considerando-se que o volume de água do compartimento de estocagem da piscina não entra no processo, teremos para:

$$N_o = \frac{6,02 \times 10^{23} \times 0,04 \times 10^{-6}}{23} = 1,046 \times 10^{15} \left(\frac{\text{átomos de } ^{23}\text{Na}}{\text{cm}^3} \right)$$

$$\sigma = 0,56 \text{ barns} = 0,56 \times 10^{-24} (\text{cm}^2)^{(15)}$$

$\bar{\phi}_{Th}$ = fluxo médio de nêutron térmico (em 2 MW)

$$\bar{\phi}_{Th} = 5,9 \times 10^{12} (\text{nêutrons/cm}^2 \cdot \text{s})^{(13)}$$

$$t_2 = 0,327 (\text{s})$$

$$t_3 = 1173 (\text{s})$$

$$A_2 = 0,964 \text{ (desintegrações/cm}^3 \cdot \text{s / ou)}$$

$$A_2 = \frac{0,964}{3,7 \times 10^4} = 0,026 \times 10^{-3} \text{ } (\mu\text{Ci/cm}^3)$$

Portanto, a atividade total calculada da água devido ao ^{24}Na será de:

$$A(^{24}\text{Na}) = A_1 + A_2 = 2,56 \times 10^{-3} + 0,026 \times 10^{-3}$$

$$A(^{24}\text{Na}) = 2,58 \times 10^{-3} \text{ } \mu\text{Ci/cm}^3 \text{ .}$$

Verificamos desta forma que a formação do ^{24}Na pelo processo de ativação do ^{23}Na é desprezível quando comparada com a do ^{24}Na proveniente das reações de recuo.

A atividade calculada do ^{24}Na foi comparada com o resultado de uma medida da atividade da água da piscina devido ao ^{24}Na , utilizando-se para isto de um detetor tipo poço, modelo 8-F.8 da "Harshaw", cuja eficiência de contagem para as energias do sódio-24, são conhecidas.

A medida de atividade em questão foi efetuada com amostras de água coletadas no centro do compartimento de operação no final de um ciclo de 5 dias de operação do reator.

O resultado obtido foi de:

$$A' = 1,26 \cdot 10^{-3} \text{ } (\mu\text{Ci/cm}^3)$$

Porém, no ritmo de operação atual do reator não se consegue o equilíbrio entre a formação e o decaimento do ^{24}Na , ou seja sua atividade infinita A_{∞} . Portanto, como nos cálculos teóricos foi considerado o equilíbrio é necessário que se faça uma correção desta atividade para que possamos compará-la com os resultados experimentais.

A relação entre a atividade obtida após 5 dias de irradiações intermitentes de 8 horas/dia e a atividade infinita A_{∞} , para o caso do ^{24}Na , é de $A_5/A_{\infty} = 0,46$, portanto:⁽²²⁾

$$A_{\infty} = \frac{A_5}{0,46} = \frac{1,26 \times 10^{-3}}{0,46} = 2,74 \times 10^{-3} \text{ } (\mu\text{Ci/cm}^3)$$

enquanto que a atividade calculada foi de $2,58 \times 10^{-3} \text{ } (\mu\text{Ci/cm}^3)$.

Portanto, o modelo de cálculo utilizado pode ser considerado satisfatório.

3.3.1 -- Atividade de Magnésio-27

Analogamente ao caso do sódio-24, o ^{27}Mg provém principalmente das reações de recuo que ocorrem nas placas dos elementos combustíveis via reação $^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$.

Também poderá ser formado pela ativação do ^{26}Mg dissolvido na água como impureza pela reação $^{26}\text{Mg}(n,p)^{27}\text{Mg}$.

Como são duas reações distintas, analisaremos a concentração da atividade de cada um deles separadamente começando pela reação de recuo (n_r, p).

3.3.2 – Atividade da Água Devida ao ^{27}Mg Proveniente da Reação de Recuo $^{27}\text{Al}(n_r, p)^{27}\text{Mg}$

Este cálculo segue a mesma orientação adotada para o caso do ^{24}Na , razão pela qual apresentaremos seus resultados sem os detalhes efetuados no item 3.1.

3.3.2.1 – O Valor Q da Reação e o Limiar de Energia

O valor Q foi calculado e é igual a -1,87 MeV.

A energia mínima que o nêutron incidente deverá possuir para causar esta reação (Threshold Energy) será de:

$$E_{Th} = Q \left(1 + \frac{M_1}{M_2} \right) = 1,93 \text{ (MeV)}$$

3.3.2.2 – Relação entre a Energia do Nêutron Incidente e a Energia do Núcleo de Recuo

Esta relação é dada pela equação $\rho = A \pm \sqrt{A^2 + B}$

onde

$$\rho = \sqrt{E_4} \qquad A = \frac{\sqrt{M_3 \cdot M_4 \cdot E_1}}{M_3 + M_4} \cos \psi$$

$$B = - \frac{M_3 \cdot Q + (M_3 - M_1) E_1}{M_3 + M_4}$$

Como neste caso $M_3 = M_1$

$$B = \frac{M_3 \cdot Q}{M_3 + M_4}$$

Para a condição em que $\psi = 0$, teremos

$$\sqrt{E_4} = \sqrt{0,0344 \cdot E_1} \pm \sqrt{0,0344 \cdot E_1 - 0,0655}$$

Os cálculos nos mostram que para $E_1 = 2$ (MeV), o sinal (+) é sempre possível. Do ponto de vista físico isto significa que na direção $\psi = 0$ (sistema Laboratório), existem dois grupos de núcleos de recuo, um deles com energia muito pequena e outro fortemente energético. Cada um destes grupos corresponde no sistema "Centro de Massa", respectivamente, a um núcleo de recuo emitido com $\psi = 0$ e outro emitido com $\psi = 180^\circ$. A Tabela III.7 mostra as duas energias para cada energia do nêutron incidente.

Iremos considerar para efeito de cálculo apenas o grupo de núcleos de recuo fortemente energético, i. é., aqueles cuja direção de emissão é dada por $\psi = 0$. Os íons emitidos em $\psi = 180^\circ$, darão a

sua energia ser muito pequena, precisarão ser produzidos praticamente na superfície da estrutura de alumínio para alcançarem o refrigerante e, portanto, contribuirão pouco para a atividade total comparado aos íons mais energéticos.

Tabela III.7

Relação entre a Energia do Nêutron Incidente (E_1) e a Energia Inicial (E_4) do Núcleo de Recuo (^{27}Mg), para $\psi = 0$

E_1 (MeV)	E_4 (MeV)	E_1 (MeV)	E_4 (MeV)
2,0	0,0956 0,0473	9,0	1,1105 0,0040
3,0	0,2646 0,0171	10,0	1,2497 0,0036
4,0	0,4095 0,0110	11,0	1,3889 0,0032
5,0	0,5511 0,0082	12,0	1,5280 0,0029
6,0	0,6916 0,0065	13,0	1,6670 0,0027
7,0	0,8315 0,0054	14,0	1,8060 0,0025
8,0	0,9711 0,0046	15,0	1,9450 0,0023

3.3.2.3 – Alcance dos Núcleos de Recuo no Meio: Óxido de Alumínio $\text{Al}(\text{OH})_3$

O alcance do ^{27}Mg no alumínio puro pode ser determinado por meio de dados fornecidos no trabalho de Northclife and Shillington⁽¹⁸⁾, para o alcance do isótopo ^{24}Mg .

O fator de correção para este último caso será dado por:

$$\frac{M_1 \text{ (nº de massa do isótopo } ^{27}\text{Mg)}}{M_2 \text{ (nº de massa do } ^{24}\text{Mg)}} = \frac{26,992946}{23,992696} = 1,125$$

Na Tabela III.8 apresentamos alguns valores do alcance do núcleo de recuo ^{27}Mg no alumínio.

Na Figura 17 podemos observar a variação do alcance dos núcleos de ^{27}Mg no alumínio em função de sua energia.

O alcance $R(E)$ dos núcleos de ^{27}Mg no óxido de alumínio - $\text{Al}(\text{OH})_3$ é dado por:

Tabela III.8

Alcance do Núcleo de Recuo ^{27}Mg no Alumínio, em Função de sua Energia Inicial (E_4)

E (MeV) Mg-24	Alcance ($\frac{\text{mg}}{\text{cm}^2}$) no Al	$E' = E_4$ (MeV) Mg-27	Alcance (mg/cm^2) no Al	Alcance (em microns) no Al
0,2998	0,121	0,3372	0,136	0,537
0,3838	0,148	0,4317	0,166	0,656
0,4797	0,176	0,5396	0,198	0,782
0,5996	0,209	0,6745	0,235	0,928
0,7675	0,251	0,8634	0,282	1,114
0,9594	0,295	1,0793	0,331	1,308
1,1997	0,344	1,3491	0,387	1,529
1,4391	0,390	1,6189	0,438	1,731
1,6789	0,432	1,8887	0,486	1,920
1,9188	0,471	2,1586	0,529	2,909
2,1586	0,508	2,4284	0,571	2,256
2,3985	0,543	2,6983	0,610	2,411

No intervalo de energia: $0 \leq E \leq 0,0125 \left(\frac{\text{MeV}}{\text{u.a.m}} \right)$

$$R(E) = \int_0^E \left(\frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE$$

onde:

$$-\frac{dE}{dx} = K \cdot E^{1/2}$$

K é obtido utilizando-se o valor tabelado de $\left(\frac{dE}{dx} \right)$ para $E = 0,0125 \text{ (MeV/u.a.m)}$.

A energia equivalente a $0,0125 \text{ MeV/u.a.m}$ para o núcleo de ^{27}Mg é de

$$E' = E \frac{M'}{M} = 0,2998 \times 1,125 = 0,3372 \text{ (MeV)}$$

Dos valores tabelados da função de moderação (Tabela III.9) obtém-se que

$$\left(\frac{dE}{dx} \right)_{0,3372 \text{ (MeV)}} = 2,6816 \left(\frac{\text{MeV}}{\text{mg}/\text{cm}^2} \right)$$

portanto:

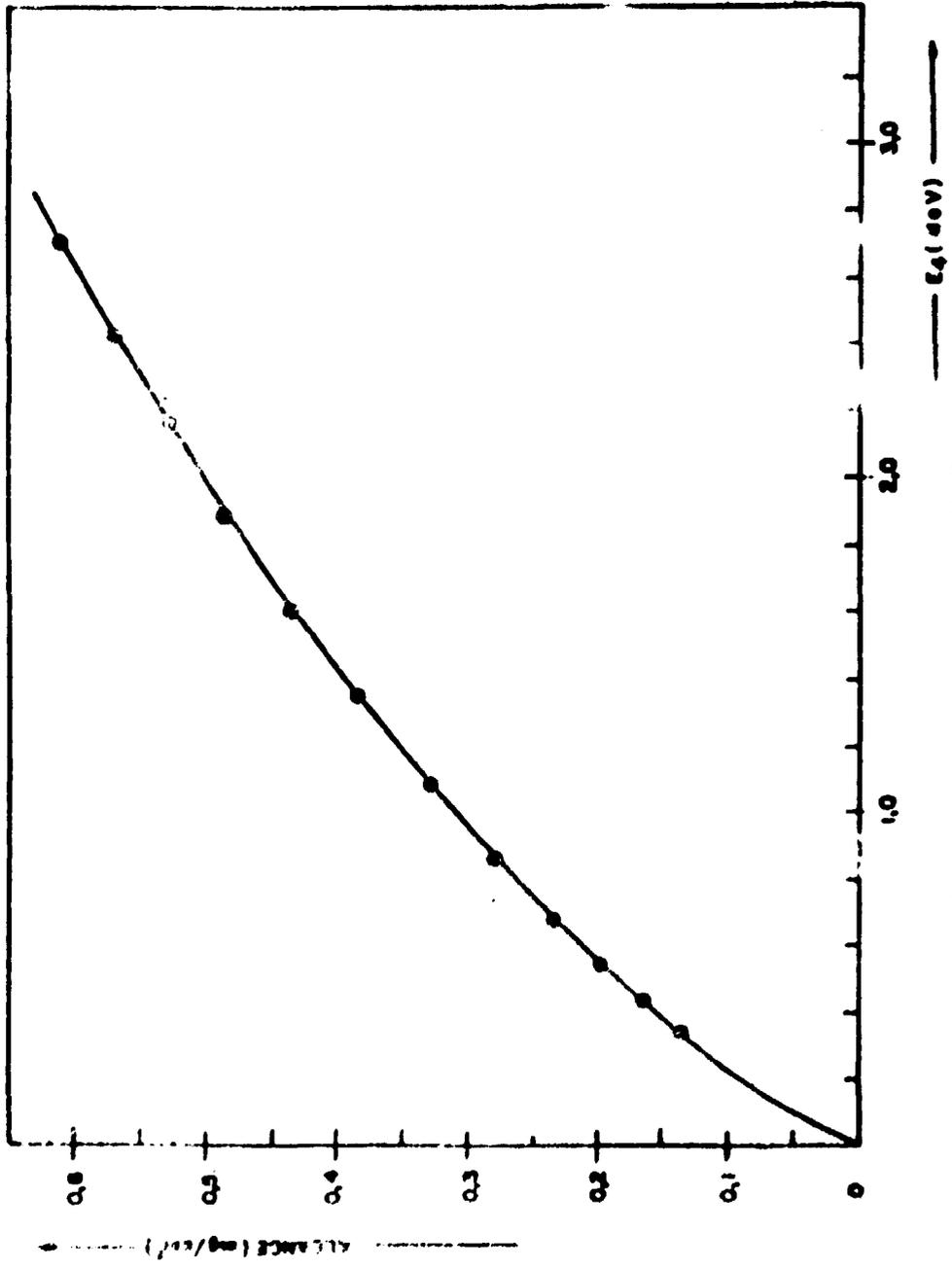


Figura 17 - Alcance dos Núcleos de Mg-27 no Al. início

$$K = \frac{2,6816}{\sqrt{0,3372}} = 4,6179$$

e,

$$R(E) = \frac{1}{K} \int_0^E E^{-1/2} dE = \frac{2}{K} |E^{1/2}|_0^{0,3372}$$

A partir da energia $E = 0,3372$ (MeV) podemos tabular as funções de moderação do ^{27}Mg nos diferentes materiais constituintes da alumina e conseqüentemente determinar a função de moderação do ^{27}Mg no $\text{Al}(\text{OH})_3$.

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Al}(\text{OH})_3} = \frac{1}{78} \left[27 \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Al}} + 48 \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{O}} + 3 \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{H}} \right]$$

Tabela III.9

Valor da Função de Moderação $\left(\frac{dE}{dx}\right)$ dos Núcleos de ^{27}Mg no $\text{Al}(\text{OH})_3$ em Função de sua Energia (E_4)

E_4 (MeV)	Funções de Moderação (MeV/mg·cm ²)				$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Al}(\text{OH})_3}$ mg/cm ² /MeV
	$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Al}}$	$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{O}}$	$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{H}}$	$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Al}(\text{OH})_3}$	
0,3372	2,431	2,421	9,115	2,6816	0,3729
0,4317	2,750	2,698	10,120	3,0014	0,3331
0,5396	3,075	2,945	11,007	3,3000	0,3030
0,6745	3,437	4,214	11,962	3,6274	0,2756
0,8634	3,889	3,551	13,261	4,0403	0,2475
1,0793	4,348	3,905	14,566	4,4682	0,2238
1,3491	4,861	4,346	16,091	4,9757	0,2009
1,6189	5,325	4,771	17,786	5,4630	0,1830
1,8887	5,749	5,249	19,489	5,9696	0,1675
2,1586	6,138	5,733	21,298	6,4678	0,1546
2,4284	6,497	6,237	23,063	6,9738	0,1434
2,6983	6,829	6,733	24,992	7,4683	0,1339

Colocando-se em gráfico os valores inversos (dx/dE) da função de moderação, poderemos obter através da integração numérica o alcance dos núcleos de ^{27}Mg em função da sua energia inicial, E_4 , (Veja Figura 18)

$$R(E) = \int_0^{0,3372 \text{ MeV}} \frac{dx}{dE} dE + \int_{0,3372 \text{ MeV}}^{E_4} \frac{dx}{dE} dE$$

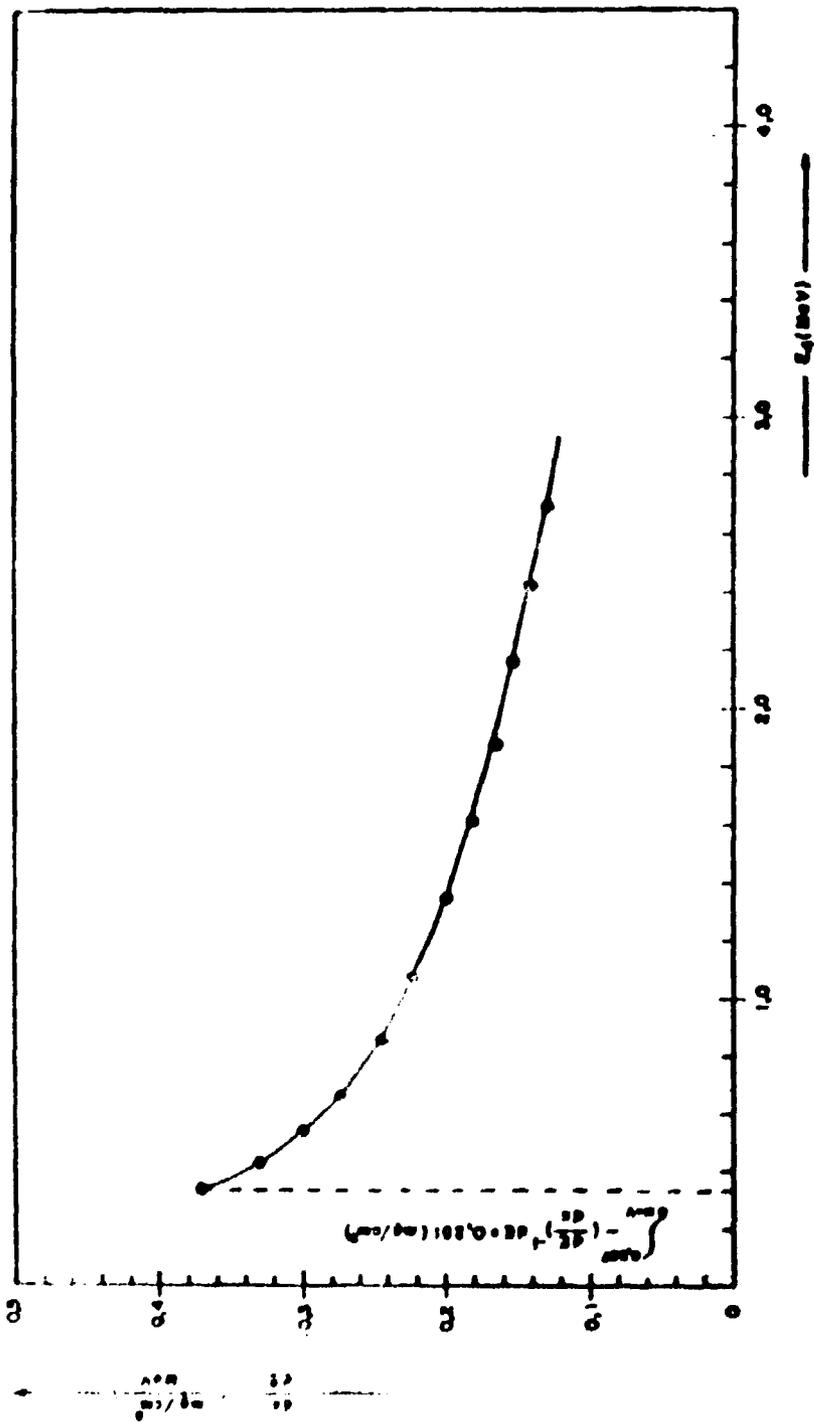


Figura 18 - Alcance dos Núcleos de Mg-27 no $Al(OH)_3$

Na Tabela III.10 mostramos os valores do alcance dos núcleos de ^{27}Mg no $\text{Al}(\text{OH})_3$ em função da energia inicial do núcleo e em função das energias dos nêutrons causadores da reação.

Tabela III.10

Alcance $R(E_4)$ dos Núcleos de ^{27}Mg no $\text{Al}(\text{OH})_3$ em Função de sua Energia (E_4) ou da Energia do Nêutron Causador da Reação (E_1)

E_1 (MeV)	E_4 (MeV)	$R(E_4)$ (mg/cm ²)	$R(E_4)$ (microns)
4,0	0,409	0,2767	1,093
5,0	0,551	0,3214	1,270
6,0	0,691	0,3614	1,428
7,0	0,831	0,3980	1,573
8,0	0,970	0,4317	1,706
9,0	1,110	0,4635	1,832
10,0	1,249	0,4932	1,949
11,0	1,388	0,5213	2,060
12,0	1,528	0,5481	2,166
13,0	1,667	0,5734	2,266
14,0	1,806	0,5977	2,362
15,0	1,945	0,6209	2,454

Verifica-se portanto que o alcance máximo dos núcleos de ^{27}Mg não ultrapassa a 3 microns. Como foi visto anteriormente no item 2.4, a camada de óxido existente nas superfícies das placas dos elementos combustíveis é superior a 3 microns.

Desta forma, podemos considerar que todos os núcleos de ^{27}Mg que se difundem para a água provém de reações que se processam na camada de óxido de alumínio.

3.3.2.4 – Determinação do Número de Núcleos de ^{27}Mg Difundidos para a Água da Piscina

Utilizando a mesma equação deduzida para o caso do sódio-24, temos que:

$$Q(E) = \frac{1}{4} N_o \cdot \sigma(E) \cdot \phi(E) \cdot R(E) \cdot S \quad (\text{núcleos/s})$$

onde:

N = número de átomos de Al por cm^3 existente no $\text{Al}(\text{OH})_3 = 1,95 \times 10^{21}$ (átomos/ cm^3).

$\sigma(E)$ = seção de choque de reação de recuo $^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}^{(24)}$.

$\phi(E)$ = fluxo de nêutrons rápidos no núcleo do IEA-R1 operando em 10 MW⁽¹⁹⁾.

A curva de distribuição de nêutrons rápidos por intervalo de energia encontra-se na Figura 14.

$R(E_4)$ = alcance dos núcleos de ^{27}Mg no $\text{Al}(\text{OH})_3$ (Tabela III-10).

S = superfície total de troca térmica dos elementos combustíveis, para um arranjo básico do núcleo do reator $S = 4,07 \times 10^5 \text{ (cm}^2\text{)}$.

Tabela III.11

O Número de Núcleos de ^{27}Mg Difundidos para a Água da Piscina
por Intervalo de Energia $|P(E)| \left(\frac{\text{Núcleos de Mg-27}}{\text{s.eV}} \right)$

E (MeV) Nêutron	E_4 (MeV) Mg-27	$R(E_4)$ (cm)	σ (E) (cm^2)	ϕ (E) ($\frac{\text{Nêutrons}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s.eV}}$)	P (E) $\frac{\text{Núcleos de } ^{27}\text{Mg}}{\text{s.eV}}$
4,0	0,409	$1,093 \times 10^{-4}$	9×10^{-27}	$8,316 \times 10^6$	$16,23 \times 10^3$
5,0	0,551	$1,270 \times 10^{-4}$	22×10^{-27}	$5,643 \times 10^6$	$31,27 \times 10^3$
6,0	0,691	$1,428 \times 10^{-4}$	43×10^{-27}	$3,712 \times 10^6$	$45,21 \times 10^3$
7,0	0,831	$1,573 \times 10^{-4}$	63×10^{-27}	$2,227 \times 10^6$	$43,78 \times 10^3$
8,0	0,970	$1,706 \times 10^{-4}$	78×10^{-27}	$1,336 \times 10^6$	$35,27 \times 10^3$
9,0	1,110	$1,832 \times 10^{-4}$	85×10^{-27}	$0,742 \times 10^6$	$22,91 \times 10^3$
10,0	1,249	$1,949 \times 10^{-4}$	88×10^{-27}	$0,297 \times 10^6$	$10,10 \times 10^3$
11,0	1,388	$2,060 \times 10^{-4}$	87×10^{-27}	$0,0005 \times 10^6$	$0,17 \times 10^3$

Os valores da função $|P(E) \times E|$ estão mostrados na Figura 19 onde, por integração, podemos obter o número total de núcleos de ^{27}Mg que são difundidos por segundo para a água da piscina quando o reator estiver operando na potência de 10 MW.

Tabela III.12

Taxa de Difusão de Núcleos de ^{27}Mg para a Água da
Piscina do IEA-R1, Operando em 10 MW

E (MeV) Nêutron	E_4 (MeV) Mg-27	$\Delta E = (E - E_{Th})$ (MeV)	P $\left(\frac{\text{Núcleos } ^{27}\text{Mg}}{\text{s.}} \right)$
4,0	0,409	4 - 1,93 = 2,07	$2,77 \times 10^9$
5,0	0,551	5 - 1,93 = 3,07	$13,56 \times 10^9$
6,0	0,691	6 - 1,93 = 4,07	$37,30 \times 10^9$
7,0	0,831	7 - 1,93 = 5,07	$76,47 \times 10^9$
8,0	0,970	8 - 1,93 = 6,07	$116,06 \times 10^9$
9,0	1,110	9 - 1,93 = 7,07	$145,05 \times 10^9$
10,0	1,249	10 - 1,93 = 8,07	$161,57 \times 10^9$
11,0	1,388	11 - 1,93 = 9,07	$166,5 \times 10^9$

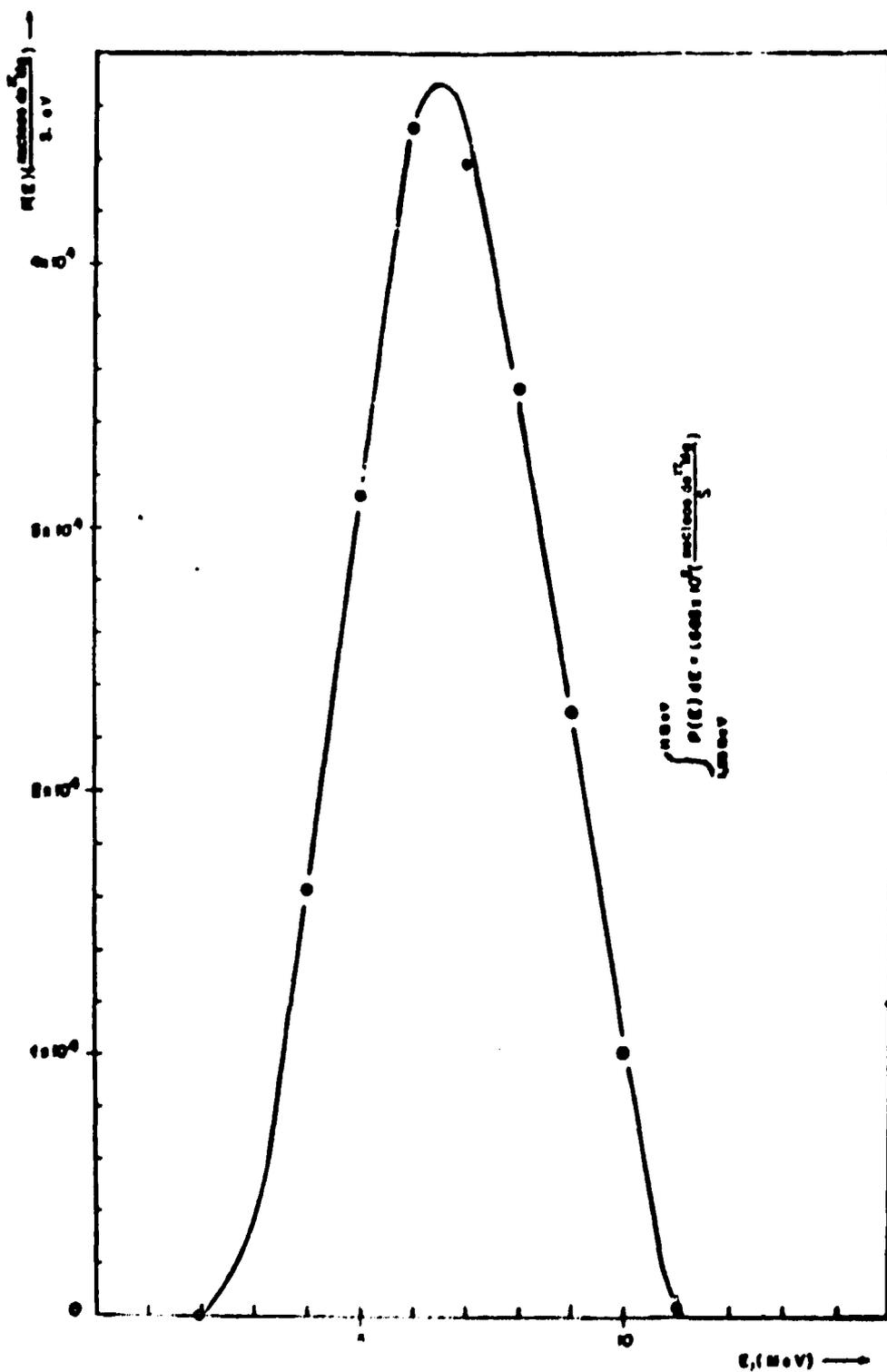


Figura 19 Taxa de Produção de Mg-27 em Função da Energia dos Nêutrons Causadores da Reação $^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$.

$$\text{Portanto: } P(10 \text{ MW}) = 16,65 \times 10^{10} \left(\frac{\text{núcleos de } ^{27}\text{Mg}}{\text{s}} \right)$$

Para a potência de 2 MW, teremos proporcionalmente

$$P(2\text{MW}) = 3,33 \times 10^{10} \left(\frac{\text{núcleos de } ^{27}\text{Mg}}{\text{s}} \right)$$

3.3.2.5 – Cálculo da Atividade da Água da Piscina Devida ao ^{27}Mg Proveniente das Reações de Recuo

Lembrando que V_n é o volume vazio do núcleo e E_1 o tempo de permanência da água no interior do mesmo, a quantidade de núcleos de ^{27}Mg por unidade de volume de água que atinge o refrigerante ao passar através do núcleo do reator será de:

$$\eta_0 = \frac{Q}{G} \quad (\text{núcleos/cm}^3)$$

Analogamente ao caso do sódio-24, a taxa de ^{27}Mg em regime permanente na água que retorna à piscina através do difusor será dada por:

$$Y'' = \frac{Q/G}{1 - e^{-\lambda t_2}} e^{-\lambda t_2} \left(\frac{\text{núcleos de } ^{27}\text{Mg}}{\text{cm}^3} \right)$$

Considera-se desprezível o decaimento do ^{27}Mg durante sua passagem pelo núcleo do reator, pois $T_{1/2}(^{27}\text{Mg}) \gg t_1$.

A atividade da água devida a este radioisótopo será então:

$$A = \lambda Y'' \left(\frac{\text{desintegrações}}{\text{cm}^3 \cdot \text{s}} \right)$$

sendo λ a constante de decaimento do ^{27}Mg , cuja $T_{1/2} = 9,45$ (min).

$$\lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}} = 1,22 \times 10^{-1} \text{ (s}^{-1}\text{)}.$$

Substituindo-se os valores numéricos já citados anteriormente:

$$P = 3,33 \times 10^{10} \left(\frac{\text{núcleos de } ^{27}\text{Mg}}{\text{cm}^3 \cdot \text{s}} \right)$$

$$G = 1,64 \times 10^5 \text{ (cm}^3/\text{s)}$$

$$t_2 = 202,4 \text{ (s)} \quad , \quad T_1 = 117,3 \text{ (s)}$$

teremos que

$$A = 254,27 \left(\frac{\text{desintegrações}}{\text{cm}^3 \cdot \text{s.}} \right) = 6,87 \times 10^{-3} (\mu\text{Ci}/\text{cm}^3)$$

Denominaremos a atividade da água devido ao ^{27}Mg proveniente das reações de recuo de "A₃"

$$A_3 = 6,87 \times 10^{-3} (\mu\text{Ci}/\text{cm}^3)$$

3.3.3 – Cálculo da Atividade da Água Devido a Ativação do ^{26}Mg Dissolvido como Impureza

Como já relatamos anteriormente (Capítulo 2.1) as análises químicas da água da piscina nos revelam que em média existem $(\text{Ca} + \text{Mg}) = 0,6$ ppm, e que a relação entre as quantidades destas impurezas é de $\text{Ca}/\text{Mg} = 1/5$. Baseados nestes dados podemos dizer que em média temos na água da piscina 0,1 ppm em Ca.

Como a porcentagem isotópica natural do ^{26}Mg é de 11,3%, podemos determinar o número de átomos deste elemento existente em $1(\text{cm}^3)$ de água (N_0).

$$N_0 = \frac{6,02 \times 10^{23} \times 0,1 \times 10^{-6}}{26} \times 0,113 = 2,62 \times 10^{14} \left(\frac{\text{átomos de } ^{26}\text{Mg}}{\text{cm}^3} \right)$$

Quando o reator estiver operando por um tempo suficientemente longo ($t > 10 \times T_{1/2}$ do ^{27}Mg), teremos então atingido o equilíbrio entre a formação e o decaimento deste radioisótopo.

$$Y'' = \frac{N_0 \cdot \sigma \cdot \bar{\phi}_{\text{Th}} \cdot t_1}{1 - e^{-\lambda t_1}} e^{-\lambda t_2} \left(\frac{\text{átomos de } ^{27}\text{Mg}}{\text{cm}^3} \right)$$

ou, em termos de atividade,

$$A_4 = Y'' \cdot \lambda = \frac{\lambda \cdot N_0 \cdot \sigma \cdot \bar{\phi}_{\text{Th}} \cdot t_1}{1 - e^{-\lambda t_1}} e^{-\lambda t_2} \left(\frac{\text{desintegrações}}{\text{cm}^3 \cdot \text{s.}} \right)$$

Substituindo-se os valores já conhecidos e sabendo-se o valor da secção de choque para a reação $^{26}\text{Mg}(n,\gamma)^{27}\text{Mg}$:

$$\sigma = 0,05 \text{ (barn)} = 5 \times 10^{-26} \text{ (cm}^2) \text{ (23)}$$

$$A_4 = Y'' \cdot \lambda = 3,165 \times 10^{-2} \left(\frac{\text{desintegrações}}{\text{cm}^3 \cdot \text{s.}} \right) \quad \text{ou}$$

$$A_4 = 0,8 \times 10^{-6} (\mu\text{Ci}/\text{cm}^3)$$

Atividade esta, referente ao ^{27}Mg formado pelo ^{26}Mg dissolvido na água como impureza. Este valor é desprezível em relação a atividade de "A₁" do ^{27}Mg proveniente das reações de recuo. Portanto, a atividade total do ^{27}Mg é dada por:

$$A(^{27}\text{Mg}) = A_3 + A_4 = 6,87 \times 10^{-3} + 0,8 \times 10^{-6}$$

$$A(^{27}\text{Mg}) = 6,87 \times 10^{-3} \text{ } (\mu\text{Ci}/\text{cm}^3)$$

Podemos assim considerar que todo ^{27}Mg existente na água da piscina provém das reações de recuo que se processam nas placas dos elementos combustíveis.

3.4 – Atividade do Argônio-41

Este elemento provém da ativação do ^{40}Ar existente no ar atmosférico dissolvido em água da piscina.

As principais características deste elemento⁽¹⁾ para o cálculo que pretendemos fazer, são:

- percentagem isotópica do ^{40}Ar = 99,6%
- concentração do ^{40}Ar na água em temperatura de 20°C e em equilíbrio com o ar = 0,6 gr/ m^3 = 0,6 ppm = $0,6 \times 10^{-6} \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}\right)$ (27).

O número total de átomos de ^{40}Ar por cm^3 será portanto,

$$N_0 = \frac{6,02 \times 10^{23} \times 0,6 \times 10^{-6}}{40} = 9,0 \times 10^{15} \left(\frac{\text{átomos } ^{40}\text{Ar}}{\text{cm}^3}\right)$$

A secção de choque da reação $^{40}\text{Ar}(n,\gamma)^{41}\text{Ar}$ é igual a,

$$\sigma = 0,56 \text{ (barn)} = 0,56 \times 10^{-24} \text{ (cm}^2\text{)}. \quad (\text{Ref. 1})$$

$$T_{1/2}(^{41}\text{Ar}) = 1,83 \text{ horas.}$$

$$\lambda(^{41}\text{Ar}) = \frac{0,693}{T_{1/2}} = 1,05 \times 10^{-4} \text{ (s}^{-1}\text{)}.$$

Após um tempo de operação suficientemente longo ($t \gg 10 \times T_{1/2}$ do Argônio-41), teremos atingido o equilíbrio entre a formação e o decaimento deste radioisótopo. Analogamente ao caso do ^{24}Na e do ^{27}Mg , teremos no retorno da água à piscina:

$$Y'' = \frac{N_0 \cdot \sigma \cdot \phi \cdot T_{\text{th}} \cdot T_1}{1 - e^{-\lambda T_1}} e^{-\lambda t} \left(\frac{\text{átomos de } ^{41}\text{Ar}}{\text{cm}^3}\right)$$

Substituindo estes valores encontramos

$$Y'' = 8,2 \times 10^{-4} \left(\frac{\text{átomos de } ^{41}\text{Ar}}{\text{cm}^3}\right)$$

ou em termos de atividade,

$$A(^{41}\text{Ar}) = Y'' \times \lambda = 8,61 \text{ (des/cm}^3 \cdot \text{s)} = 0,232 \times 10^{-3} \text{ } (\mu\text{Ci/cm}^3)$$

No caso do Argônio-41, é interessante salientar que existe uma transferência contínua de átomos de argônio na água da piscina para o ar ambiente e vice-versa.

O fator de transferência é uma função da temperatura e da agitação superficial da água. Por este motivo a atividade específica da água devido ao ^{41}Ar poderá sofrer variações consideráveis, especialmente na camada superficial da água da piscina.

Todisco⁽²⁷⁾ cita a seguinte equação de transferência do argônio da água da piscina para o ar ambiente.

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = K \cdot f \cdot S \cdot C_0 \quad (\text{Eq. C})$$

onde:

$\frac{\Delta N}{\Delta t}$ = número de átomos de Argônio que passam da água para o ar por unidade de tempo e vice-versa, pois a concentração do argônio encontra-se em equilíbrio.

$K \cdot f$ = é um fator determinado experimentalmente, (cm/s), veja tabela abaixo.

S = superfície da água. A superfície total da piscina é de 29 (m²), mas como só estamos considerando o comportamento de operação ela se reduz a $S = 16,3 \text{ (m}^2\text{)} = 16,3 \times 10^4 \text{ (cm}^2\text{)}$.

C_0 = concentração do argônio na água.

Vamos considerar a concentração do ^{41}Ar calculada

$$C_0 = 0,232 \times 10^{-3} \text{ } (\mu\text{Ci/cm}^3).$$

A seguir damos uma tabela dos valores de $K \cdot f$ fornecido por Todisco⁽²⁷⁾.

Condições da Superfície da Água	$K \cdot f$ (cm/s)
Sem Agitação	2×10^{-4}
Moderadamente Agitada	20×10^{-4}
Fortemente Agitada	48×10^{-4}

Como as condições de agitação na superfície da água da piscina do IEA-R1 enquadra como moderadamente agitada, utilizaremos o valor

$$K \cdot f = 20 \times 10^{-4} \text{ (cm/s)}.$$

Deste modo, podemos determinar a quantidade de ^{41}Ar que passa da água para o ar ambiental. Substituindo-se os valores acima da Eq. C, temos

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = 75,6 \times 10^{-3} (\mu\text{C}_i/\text{s}) = 4,53 (\mu\text{C}_i/\text{h})$$

O sistema de ventilação do prédio do reator injeta no saguão da piscina 6000 (c.f.m.) de ar, equivalente a $10.200 (\text{m}^3/\text{h})$.

Se considerarmos que existe uma mistura homogênea deste ar com o ^{41}Ar proveniente da água da piscina, a atividade específica do ar no saguão da piscina será de:

$$Ar_{(\text{ambiental})} = \frac{4,53 \mu\text{C}_i/\text{h}}{10.200 \text{ m}^3/\text{h}} = 4,44 \times 10^{-4} (\mu\text{C}_i/\text{cm}^3)$$

ou

$$Ar_{(\text{ambiental})} = 4,44 \times 10^{-10} (\mu\text{C}_i/\text{cm}^3)$$

Para efeito de controle observamos que a máxima concentração de ^{41}Ar admissível em ambiente de trabalho "normal", segundo as normas internacionais de proteção radiológica, é de $1,6 \times 10^{-6} (\mu\text{C}_i/\text{cm}^3)^{(15)}$.

3.5 – Atividade do Alumínio-28

O ^{28}Al é proveniente da ativação do ^{27}Al dissolvido na água por processos de corrosão. A quantidade de alumínio existente na água da piscina é equivalente, como vimos no Capítulo 2.4, a 0,02 ppm. dada as condições de análise química efetuada para esta determinação, podemos afirmar que somente o ^{27}Al é detectado pois, o ^{28}Al possuindo uma meia vida de $T_{1/2} = 2,3$ minutos decai rapidamente e não é detectado. Com o decaimento (β^-) ele passa a formar o ^{28}Si , que é um elemento estável.

O número de átomos de ^{27}Al existente na água é de 0,02 ppm, portanto,

$$N_0 = \frac{6,02 \times 10^{23} \times 0,02 \times 10^{-6}}{27} = 4,46 \times 10^{14} \left(\frac{\text{átomos}}{\text{cm}^3} \right)$$

A atividade de equilíbrio do ^{28}Al após um tempo suficientemente longo de funcionamento do reator ($t \geq 10 \times T_{1/2}$ do ^{28}Al) será:

$$A = \lambda \cdot Y_{\infty} = \frac{\lambda \cdot N_0 \cdot \sigma \cdot \bar{\phi}_{\text{Th}} \cdot t_1}{1 - e^{-\lambda t_1}} e^{-\lambda t_2} \left(\frac{\text{desintegrações}}{\text{cm}^3 \cdot \text{s.}} \right)$$

Como:

$$\sigma = 0,21 (\text{barn}) = 0,21 \times 10^{-24} (\text{cm}^2) \quad (\text{Ref. 1})$$

$$T_{1/2} = 2,3 (\text{min})$$

$$\lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}} = 5 \times 10^{-3} \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

Substituindo-se estes valores e os já definidos anteriormente, teremos:

$$A(^{28}\text{Al}) = 0,329 \left(\frac{\text{desintegrações}}{\text{s}} \right) = 8,9 \times 10^{-6} \text{ (}\mu\text{Ci/cm}^3\text{)}$$

vemos pois que este valor é desprezível em relação as atividades do Na-27 e do Ar-41.

Sendo desprezível a quantidade de ^{27}Al dissolvido na água por processos de corrosão (0,02 ppm) iremos desprezar:

1. A formação do ^{24}Na

- Através da reação de recuo com o ^{27}Al dissolvido na água.
- Por arraste do ^{24}Na já existentes nas placas de alumínio (no óxido) e que se desprendem pelo processo de corrosão.

2. A formação do ^{27}Mg pelos mesmos processos descritos acima.

Resumindo-se os cálculos efetuados até o momento sobre a atividade específica d'água, temos:

Elemento	Processo de Formação	Atividade $\left(\frac{\mu\text{Ci}}{\text{cm}^3}\right)$
^{24}Na	a) reações de recuo	$2,56 \times 10^{-3}$
	b) ativação do ^{23}Na	$0,026 \times 10^{-3}$
	Total	$2,58 \times 10^{-3}$
^{27}Mg	a) reações de recuo	$6,87 \times 10^{-3}$
	b) ativação do ^{26}Mg	$0,8 \times 10^{-6}$
	Total	$6,87 \times 10^{-3}$
^{41}Ar	Ativação do ^{40}Ar	$0,232 \times 10^{-3}$
^{28}Al	Ativação do ^{27}Al	$8,9 \times 10^{-6}$

3.6 – Atividade da Água em Função da Potência de Operação do Reator

As equações utilizadas para o cálculo em função da atividade específica dos elementos acima citados na água da piscina forma:

Para as reações de recuo:

$$A = \lambda_1 Y'' = \lambda_1 \frac{P/G}{1 - e^{-\lambda_1 t_1}} e^{-\lambda_1 t_2} \text{ (}\mu\text{Ci/cm}^3\text{)} \quad (\text{Eq. A})$$

sendo $Q = \frac{1}{4} \cdot N_o \cdot \sigma(E) \cdot \phi(E) \cdot R(E) \cdot S$ ($\frac{\text{nêutrons}}{\text{s}}$) que vem a ser a taxa de difusão dos núcleos de recuo para a água da piscina.

--- Para as reações de ativação:

$$A = \lambda \cdot Y'' = \lambda \cdot \frac{N_o \cdot \sigma \cdot \bar{\phi}_{Th} \cdot t_1}{1 - e^{-\lambda t_3}} e^{-\lambda t_2} \left(\frac{\mu C_i}{\text{cm}^3} \right) \quad (\text{Eq. B})$$

Vamos analisar a influência sofrida pelas equações (A) e (B) em função das potências de operação do reator em 2 MW, 5 MW e 10 MW. A Tabela III.13 fornece as características operacionais do IEA-R1 em diversos níveis de potência.

Tabela III.13

Dados Operacionais do Reator IEA-R1, Funcionando em Potência de 2 MW, 5 MW e 10 MW

Potência (MW)	Vazão do Circuito Primário G		t_1 (s)	t_2 (s)	t_3 (s)
	G.P.M.	cm^3/s			
2	2600	$1,64 \times 10^5$	0,327	202,4	1173,2
5	3600	$2,27 \times 10^5$	0,236	146,2	847,6
10	5800	$3,66 \times 10^5$	0,146	90,7	525,7

Sendo:

$$t_1 = \frac{V_n}{G} \quad t_2 = \frac{V_i}{G} \quad t_3 = \frac{V_T}{G}$$

onde:

G = vazão do circuito primário

V_n = volume de água existente no núcleo do reator (vazio) $V_n = 0,0537 \text{ (m}^3\text{)}$.

V_i = volume de água no interior das tubulações do circuito primário desde a saída do núcleo até o seu retorno pelo difusor. $V_i = 33,2 \text{ (m}^3\text{)}$

V_T = volume total do circuito primário. O qual é considerado como sendo o volume do compartimento principal da piscina + V_i .

$$V_T = 159,2 + 33,2 = 192,4 \text{ (m}^3\text{)}$$

Da equação (A) podemos concluir que uma variação na potência do reator irá provocar uma variação proporcional no valor de "P". Como podemos verificar pela expressão de \underline{P} , o único fator variável em função da potência do reator será o fluxo rápido, o qual é diretamente proporcional à potência.

Podemos, assim, determinar os fatores de acréscimo na atividade dos elementos considerados para as condições de funcionamento em 5 MW e 10 MW.

Tomando como referência a atividade atingida pelos mesmos em 2 MW teremos os seguintes fatores de acréscimo, dados pelas Tabelas III.14 e III.15.

Tabela III.14

Fatores de Acréscimo para as Atividades da Água
Devidas aos Núcleos de Recuo Na-24 e Mg-27

Potência (MW)	Fatores de Acréscimo
2	1,00
5	2,49
10	4,97

Tabela III.15

Fatores de Acréscimo para as Atividades dos Elementos
Dissolvidos na Água como Impurezas

Potência (MW)	Fatores de Acréscimos			
	Na	Mg	A	Al
2	1	1	1	1
5	2,48	2,27	2,45	2,41
10	4,95	4,10	4,85	2,19

As atividades esperadas destes elementos para as condições de funcionamento em 5 MW e 10 MW serão portanto:

Tabela III.16

Atividades Específicas da Água da Piscina nas Diferentes Condições de
Operação do Reator (em Unidades de $10^{-3} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$)

Potência (MW)	Na-24			Mg-27			Ar-41	Al-28
	recuo	impur.	total	recuo	impur.	total		
2	2,56	0,026	2,586	6,87	0,0008	6,87	0,232	0,0089
5	6,37	0,064	6,434	17,1	0,0018	17,1	0,568	0,0214
10	12,72	0,128	12,848	34,14	0,0032	34,14	1,125	0,0373

As atividades causadas pelo ^{27}Mg e ^{24}Al provenientes de impurezas dissolvidas na água serão sempre desprezíveis em relação as demais. Assim, justifica-se plenamente considerarmos que os principais elementos responsáveis pela atividade da água da piscina do reator IEA-R1 são:

^{24}Na – proveniente da reação de recuo e da ativação do ^{23}Na dissolvido como impureza.

^{27}Mg – proveniente da reação de recuo.

^{41}Ar – proveniente da ativação do ^{40}Ar existente no ar atmosférico dissolvido na água.

Para termo de comparação citamos, as atividades dos principais radioisótopos encontrados em equilíbrio na água da piscina dos seguintes reatores de pesquisas, semelhantes ao IEA-R1.

1) Reator "Melusine" Ref. 2

Potência de Operação : 4 MW
Volume da Piscina : 390 (m³)

Elemento	Atividade Específica	% do Total
Na-24	$5,0 \times 10^{-3}$ ($\mu\text{C}_i/\text{cm}^3$)	45,5 %
Mg-27	$2,0 \times 10^{-3}$ ($\mu\text{C}_i/\text{cm}^3$)	18,2 %
A-41	$4,0 \times 10^{-3}$ ($\mu\text{C}_i/\text{cm}^3$)	36,3 %

2) Reator "Siloé" Ref. 5

Potência de Operação : 15 MW
Volume da Piscina : 536 (m³)

Elemento	Atividade Específica	% do Total
Na-24	$12,9 \times 10^{-3}$ ($\mu\text{C}_i/\text{cm}^3$)	35 %
Mg-27	$5,9 \times 10^{-3}$ ($\mu\text{C}_i/\text{cm}^3$)	16 %
A-41	$12,2 \times 10^{-3}$ ($\mu\text{C}_i/\text{cm}^3$)	33 %
Emissores β^+	$5,9 \times 10^{-3}$ ($\mu\text{C}_i/\text{cm}^3$)	16 %

3) Reator I.R.L. "Industrial Reactor Laboratory

Potência de Operação : 5 MW
Volume da Piscina : 606 (m³) Ref. 21

Elemento	Atividade Específica	% do Total
Na-24	$2,9 \times 10^{-3}$ ($\mu\text{C}_i/\text{cm}^3$)	55 %
Mg-27	$2,1 \times 10^{-3}$ ($\mu\text{C}_i/\text{cm}^3$)	40 %
Mn 56	$5,9 \times 10^{-3}$ ($\mu\text{C}_i/\text{cm}^3$)	1 %
A-41	$5,3 \times 10^{-3}$ ($\mu\text{C}_i/\text{cm}^3$)	1 %

4 – MEDIDAS EXPERIMENTAIS

4.1 – Equipamentos Utilizados

Para a realização das experiências, utilizamos além do próprio reator de pesquisa IEA R1, os seguintes equipamentos:

- a) para identificação dos radioisótopos dissolvidos na água da piscina e determinação percentual relativa de suas atividades: detector Ge(Li), com 41 cm³ de volume útil acoplado a um analisador multicanal T.M.C. de 1024 canais.

A calibração do espectro de energias obtido foi realizada com fontes de ¹³⁷Cs e de ⁶⁰Co.

Durante a realização destas medidas e detector e amostra de água de 500 cm³, foram localizados no interior de uma blindagem de chumbo com 10 cm de espessura, evitando-se assim possíveis interferências.

- b) Para verificação da atividade específica da água da piscina devida ao ²⁴Na foi utilizado um detector de NaI(Tl) tipo poço da Harshaw, modelo 8-F-8, cuja eficiência de contagens foi determinada por uma fonte calibrada de ²⁴Na em solução.

A amostra neste caso foi constituída de uma coluna de resinas catiônicas (1 cm³) na qual percolamos um volume de 100 cm³ de água coletados da superfície da piscina.

- c) Para o levantamento dos níveis de radiação na superfície da piscina, utilizamos um detector portátil de radiações modelo 2650 da Nuclear Chicago. Este detector nos forneceu leitura direta do nível de radiação no local da medida em mili-Roentgens por hora, e seu alcance vai de 0 a 100 mR/hora.

Em algumas medidas houve necessidade de acoplar este detector a um registrador de modo a poder acompanhar a variação dos níveis de radiação na superfície da piscina na ocasião do reator ser desligado.

- d) Na determinação das correntes hidráulicas foram utilizados fios de lã amarrados a uma linha vertical ancorada no fundo da piscina.

As velocidades destas correntes foram medidas por meio de um molinete hidráulico.

4.2 – Levantamento dos Níveis de Radiação na Superfície Livre da Piscina

Para a realização deste levantamento utilizamos um detector portátil da Nuclear Chicago, modelo 2650.

O espaçamento adotado entre as medidas foi de 50 cm x 50 cm, mantendo-se uma distância de 5 cm da superfície da água.

Deste modo, foram obtidos três levantamentos em diferentes condições:

- 1) Medidas de nível de radiação de "fundo" (background). Foram realizadas após o reator ter permanecido desligado por 86 horas, tempo compreendido entre o término e o início de 5 dias de operação e o início de um ciclo de 4 dias de operação.

Como já era esperado, este levantamento nos forneceu valores praticamente idênticos para todos os pontos, sendo o nível de radiação de "fundo" igual a 1,2 mR/h.

- 2) Medidas dos níveis de radiação no final da última operação de um ciclo, a saber, para o ciclo de operação de 8 horas/dia, 5 dias/semana. Os dados constantes da planilha A (Figura 20) são os valores médios de duas medidas realizadas em diferentes datas, porém mantendo as mesmas condições acima referidas.

É preciso, no entanto, subtrair os efeitos da radiação do núcleo do reator. Para determinarmos esta influência foi acoplado ao detector portátil um registrador a fim de acompanhar as quedas dos níveis de radiação no momento em que o reator é desligado.

Na Figura 21 pode-se observar um registro gráfico típico obtido por este processo.

A queda de potência do reator durante seu desligamento foi obtida por dados fornecidos pelo canal indicador direto de potência do reator (canal LOG N). Com estes dados construímos um gráfico (Figura 22) – onde podemos verificar que há uma queda instantânea de potência de 2 MW para 200 KW.

Na Tabela IV.1 apresentamos os níveis de radiação em alguns pontos da superfície da piscina causados por radiações provenientes diretamente do núcleo do reator. As medidas foram efetuadas sobre a linha de centro da piscina (C) e em posições que se afastam, gradativamente na vertical, do centro do núcleo do reator, conforme representado na Figura 23.

Tabela IV.1

Níveis de Radiação na Superfície da Piscina Causados por Radiações Provenientes Diretamente do Núcleo do Reator Quando Funcionando em 2 MW

Ponto	Distância ao Eixo Central	Distância do	Acréscimo Blindagem	Nível de Radiação na
	ϕ do Núcleo	Núcleo	Δx (Água)	Superfície Causada Pelo Núcleo
P ₀	0,0 m	6,50 m	0,00 m	1,35 mR/h
P ₁	1,5 m	6,70 m	0,20 m	0,60 mR/h
P ₂	2,0 m	6,80 m	0,30 m	0,40 mR/h
P ₃	3,0 m	6,95 m	0,45 m	0,20 mR/h

Para estudarmos o comportamento destes níveis de radiação na superfície da piscina em função da distância ao núcleo do reator traçamos o gráfico da Figura 23 em papel semi-logarítmico utilizando os valores apresentados nas colunas 4 e 5 da Tabela IV.1.

Com este gráfico podemos observar qual é o decréscimo dos níveis de radiação com o acréscimo (Δx) da blindagem de água e da distância ao núcleo. Verifica-se que a relação é linear e portanto, a atenuação obedece a clássica função exponencial:

$$Y = Y_0 e^{-k \cdot x}$$

onde:

x = espessura da blindagem (Δx) (cm)

k = coeficiente de absorção da blindagem (cm⁻¹)

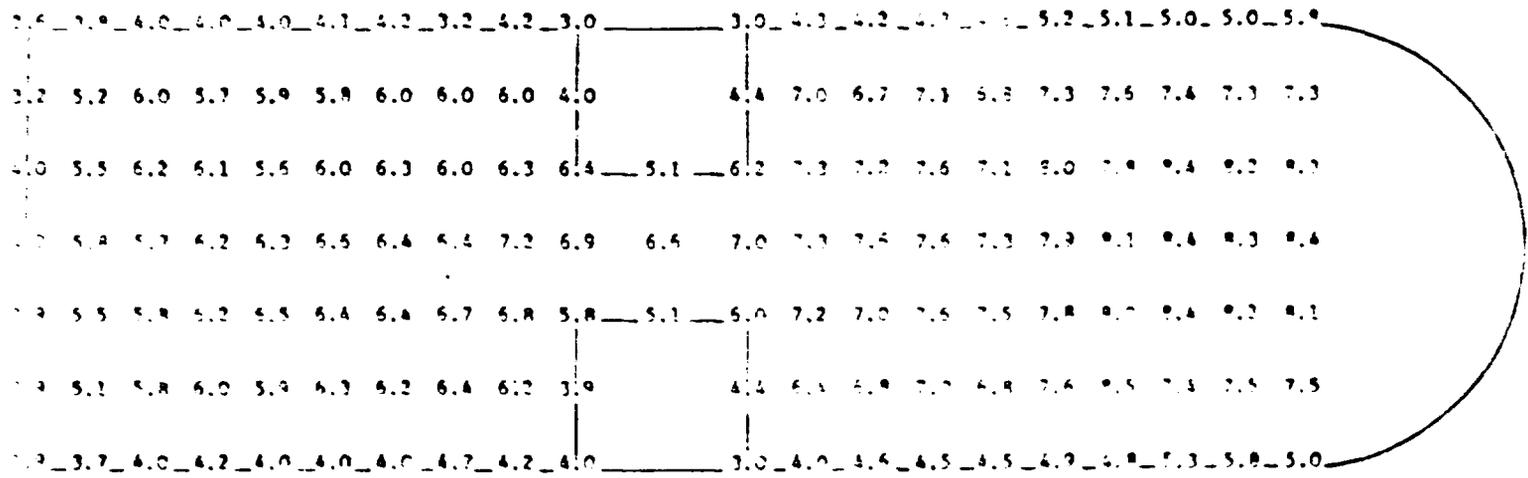


Figura 20 – Níveis de Radiação na Superfície Livre da Piscina no Final da Última Operação (Ciclo de 5 Dias) (mR/hora)

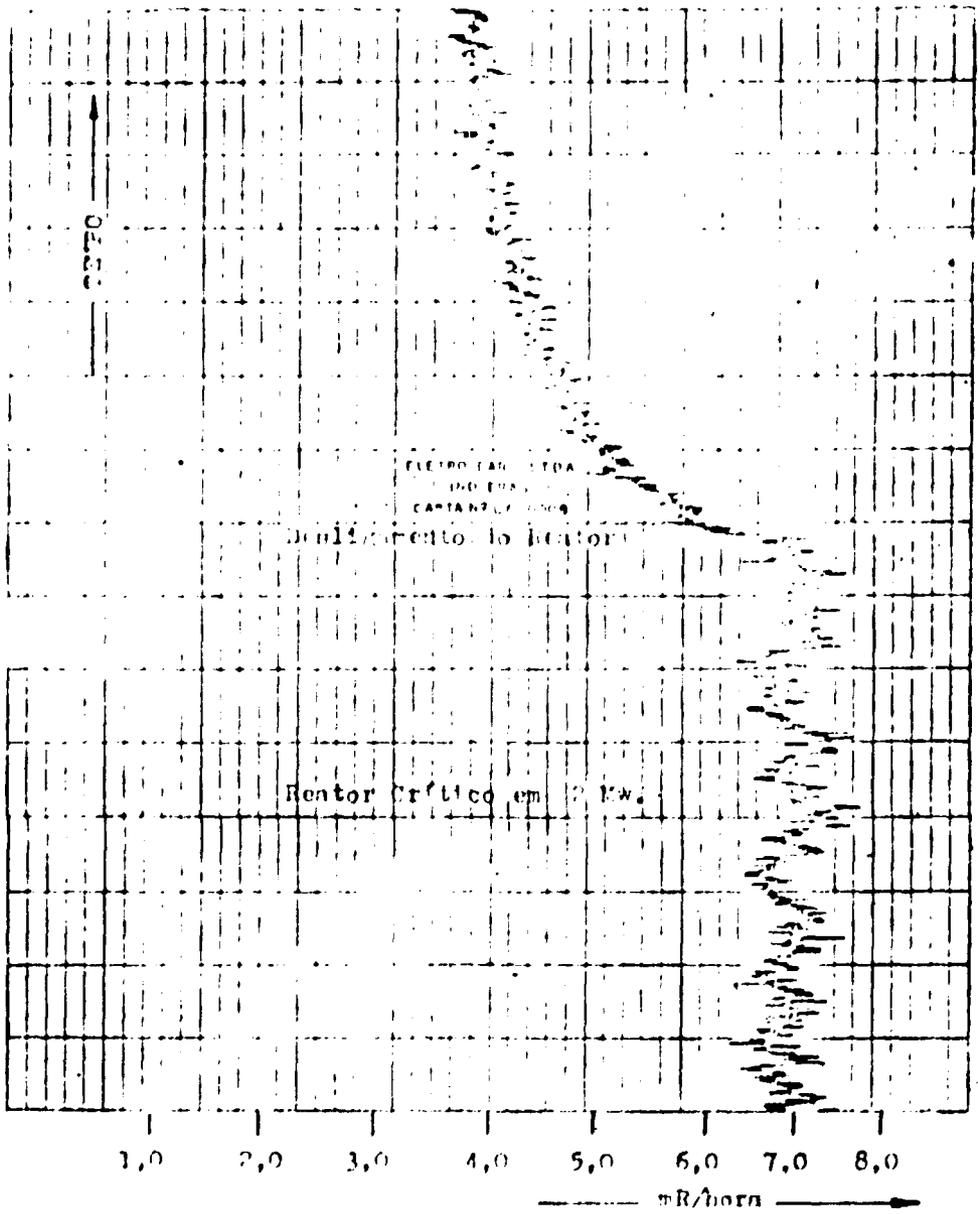


Figura 21 Registro Típico da "Queda dos Níveis de Radiação" no Instante que o Reator é Desligado

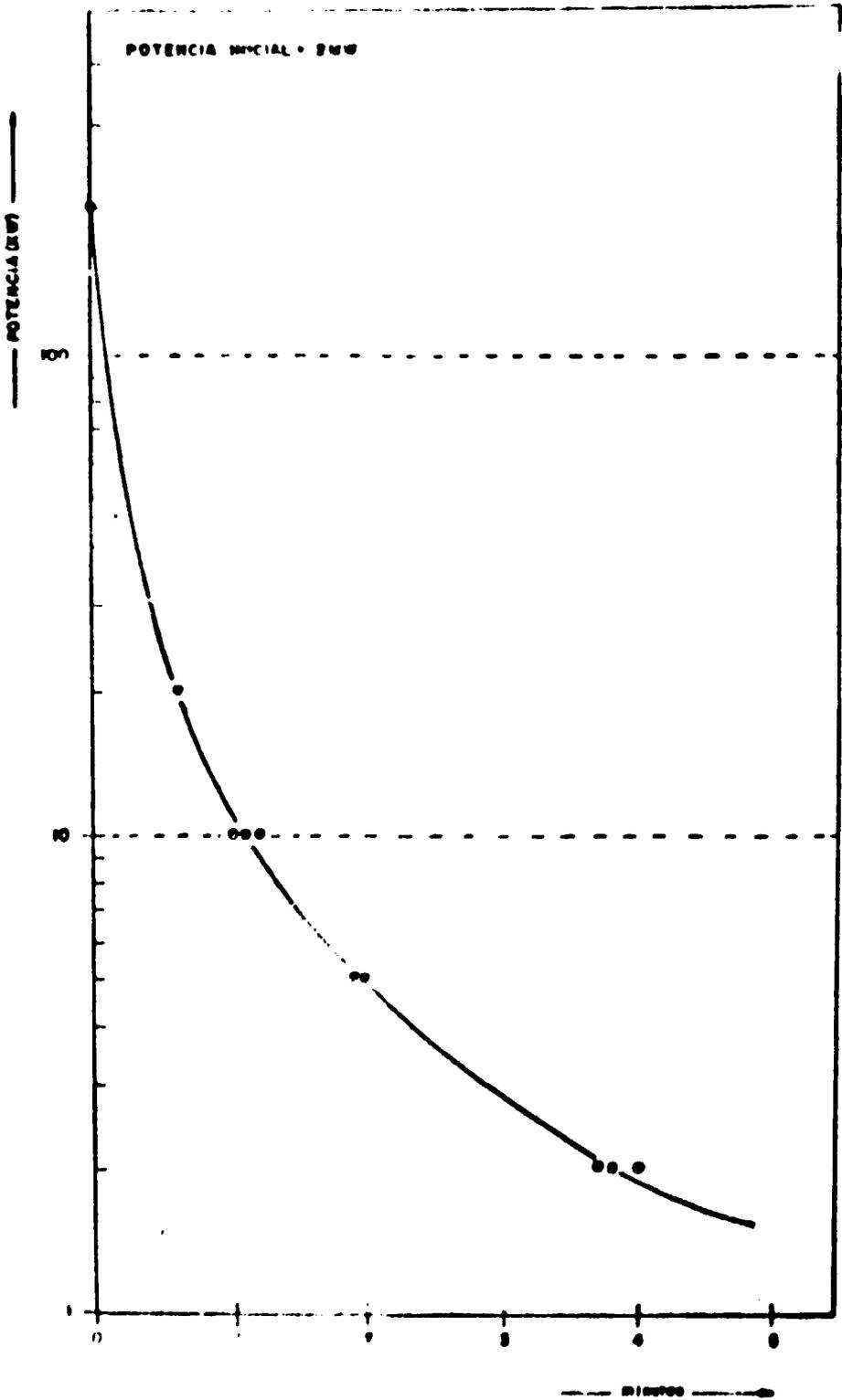


Figura 22 Queda de Potencia do Reator IEA-R1 ao ser Desligado

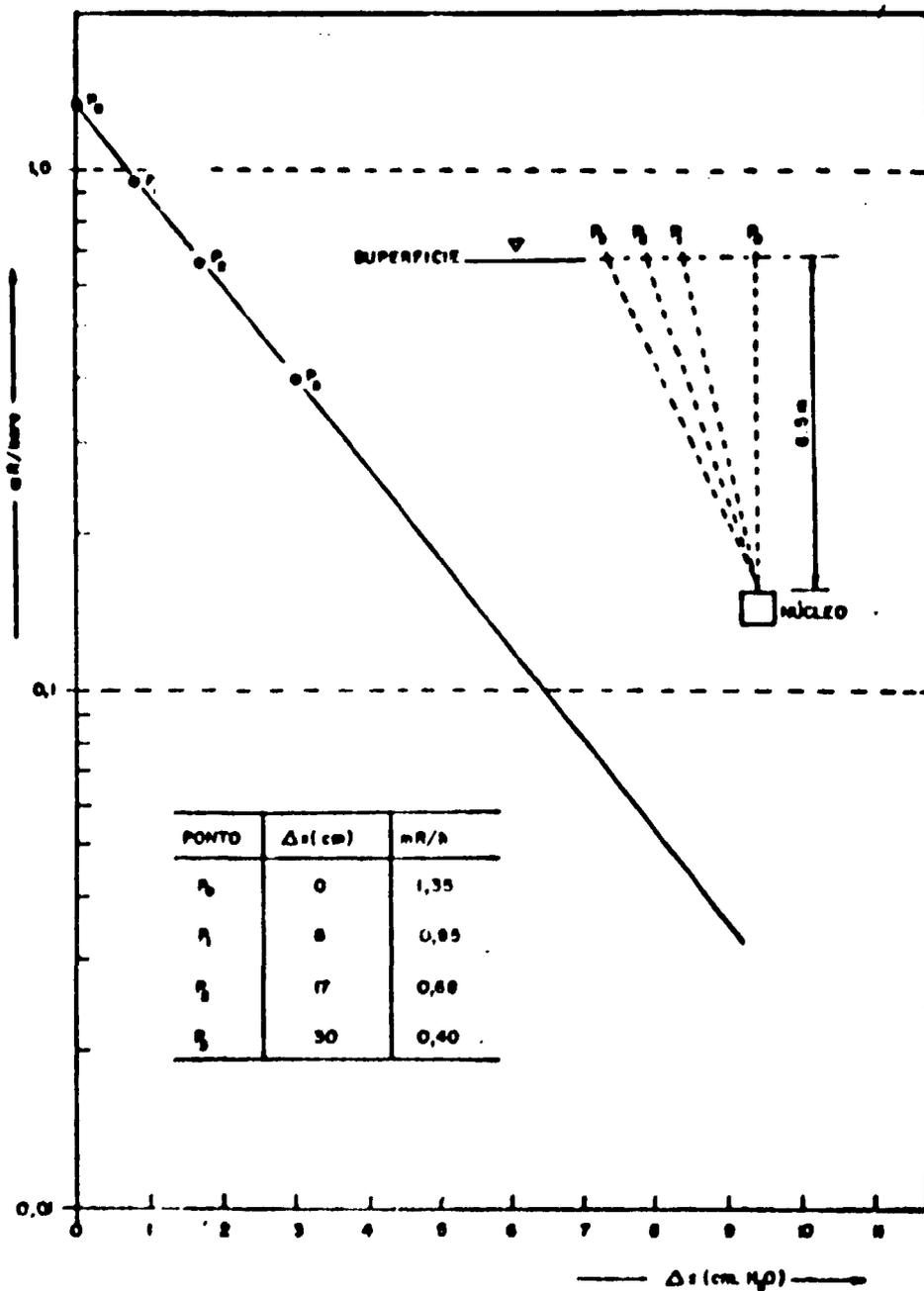


Figura 23 Variação da Influência das Radiações Provenientes do Núcleo do Reator, sobre os Níveis de Radiação na Superfície, a Medida que nos Afastamos da Região Situada sobre o Núcleo.

Y_0 = nível de radiação inicial

Y = nível de radiação com a blindagem.

Do gráfico da Figura 23 podemos determinar o coeficiente k para as radiações provenientes do núcleo do reator.

$$K = 0,0294 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$$

e também este dar a influência das radiações provenientes do núcleo para os mesmos pontos onde foram efetuadas as medidas constantes na Figura A (Veja Figura 24.a). Subtraindo esta influência dos valores encontrados para os níveis de radiação no final de um ciclo de operações de 5 dias, na Figura 20 obtemos os valores "líquidos" dos níveis de radiação devido unicamente aos elementos radioativos dissolvidos na água, os quais são representados na Figura 24.b.

Podemos visualizar na Figura 24.b que os maiores níveis de radiação não estão situados nas proximidades do eixo central do núcleo do reator, e sim na parte mais central do compartimento de operação. A causa, como veremos no Capítulo VI, é dada as correntes hidráulicas principais, provenientes do difusor, que atingem a superfície da piscina via caminhos preferenciais.

5 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 – Contribuição dos Principais Elementos Radioativos sobre os Níveis de Radiação na Superfície da Piscina

Para obtermos a ordem de grandeza da contribuição de cada elemento sobre o nível total de radiação na superfície da piscina, efetuamos uma série de medidas com amostras de água coletadas na superfície do compartimento principal da piscina. Foi utilizado para tanto um detector Ge(Li) acoplado a um analisador multicanal, como já descrito no Capítulo 4.

Nestas medidas foram mantidas fixas:

- 1 – a geometria entre a amostra e o detector
- 2 – o volume da amostra 500 (cm³)
- 3 – o tempo de contagem (5 min.).

As contagens das radiações gama características dos elementos radioativos dissolvidos na água, foram corrigidas levando-se em consideração:

- a) o decaimento sofrido pelo elemento radioativo no tempo compreendido entre a coleta da amostra e o início da contagem. Como o tempo de contagem (5 min.) é significativo quando comparado com a meia-vida do ²⁷Mg (T_{1/2} = 9,45 min) e a dos emissores β⁺ tomado para efeito de cálculo como T_{1/2} = 15 min, a correção englobou também o decaimento sofrido por estes elementos durante o tempo de contagem.
- b) A eficiência de contagem do detector⁽²⁵⁾

Conhecendo-se a área útil do detector (10 cm²), e os fatores para cada raio gama que incidindo sobre uma unidade de área por unidade de tempo, dá como resultante uma exposição de 1 (mR/hora)⁽¹¹⁾, podemos determinar qual a contribuição percentual de cada um destes elementos sobre o nível de radiação total.

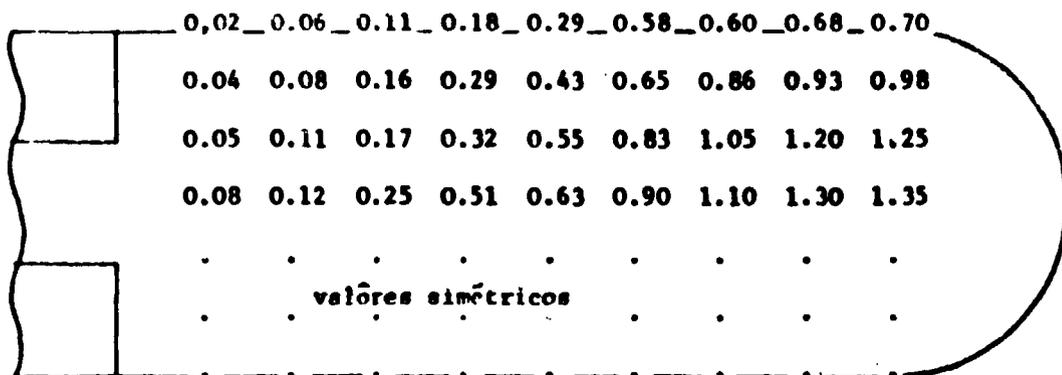


Figura 24 (a) – Níveis de Radiação na Superfície Devido às Radiações Provenientes do Núcleo, em mR/hora.

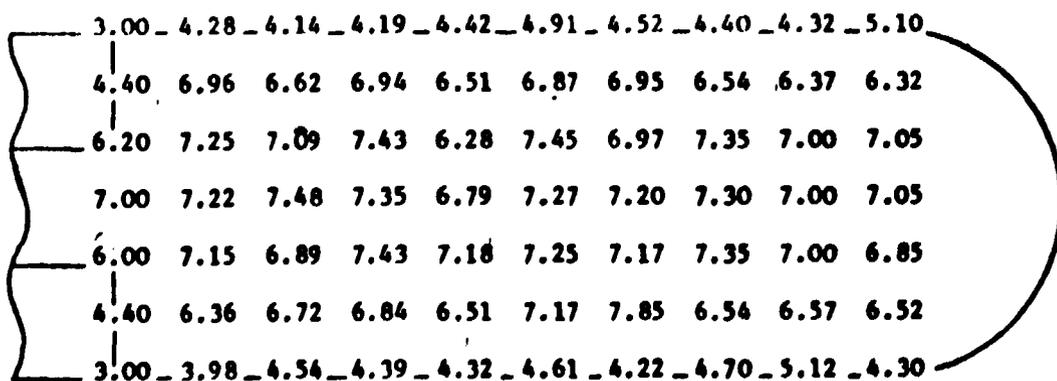


Figura 24 (b) – Níveis de Radiação na Superfície Devido Exclusivamente à Atividade da Água, em mR/hora.

Tabela V.1

Características das Radiações "Gama" Emitidas pelos Elementos Radioativos Dissolvidos na Água e a Eficiência do Detetor Ge(Li) Utilizado

Elemento	Energia (MeV)	Fotons/cm ² .s mR/h	Eficiência (%) do detetor Ge (Li)
Emissores β^+	0,511	940	0,140
Mg-27	0,840	590	0,072
	1,015	510	0,064
A-41	1,29	425	0,044
Na-24	1,37	410	0,042
	2,75	245	0,022

Os resultados de cinco medidas realizadas no final de cada período diário de operação do reator (ciclo de cinco dias), com amostras de água coletadas na superfície da piscina, encontram-se na Tabela V.2. Eles nos interessam apenas para determinarmos a contribuição percentual de cada elemento sobre o nível total de radiação.

Tabela V.2

Níveis de Radiação Proveniente de uma Amostra de Água da Piscina, Calculadas pelas Contagens Realizadas com o Detetor Ge(Li)

Energias (MeV)	Elementos					
	β^+	Mg-27		A-41	Na-24	
Medidas	0,511	0,840	1,015	1,29	1,37	2,75
1ª Medida (mR/h)	0,40	1,75	0,92	1,15	1,22	2,06
2ª Medida (mR/h)	0,66	2,32	1,16	1,26	1,26	2,12
3ª Medida (mR/h)	0,785	3,49	1,60	2,015	1,95	3,26
4ª Medida (mR/h)	0,874	3,56	1,77	1,77	2,01	3,38
5ª Medida (mR/h)	0,752	4,60	1,88	1,93	1,93	3,22

Com os valores da Tabela V.2 podemos determinar a contribuição percentual média destes elementos sobre o nível de radiação observado.

Se tomarmos o valor médio dos níveis iguais ou superior a 7 mR/h como valor básico representativo dos níveis de radiação na superfície da piscina observados na Figura 24.b e que correspondem exclusivamente a atividade da água, teremos:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n} = 7,24 \text{ (mR/h)}$$

para

$$A_i = 7 \text{ (mR/h)}$$

A contribuição dos principais elementos radioativos existentes na água da piscina sobre este nível de radiação (A) é mostrada na Tabela V.3.

Tabela V.3

Contribuições dos Principais Elementos Radioativos sobre o Nível de Radiação Médio (A) Observado na Superfície Livre da Piscina

Elemento	Contribuição	Nível de Radiação Médio Provocado pelo Elemento
	Percentual	
Na-24	40,0 %	2,89 mR/h
Mg-27	39,7 %	2,87 mR/h
A-41	14,2 %	1,02 mR/h
Emissores β^+	6,1 %	0,44 mR/h

Devemos observar entretanto que estes valores foram obtidos com o reator operando nas condições de 2 MW, 8 horas/dia, 5 dias/semana.

Nestas condições alguns radioisótopos responsáveis pelo nível de radiação na superfície ainda não atingiram sua atividade máxima (A_s = atividade saturada).

Uma análise das equações utilizadas nos cálculos de ativação nos mostra que um radioisótopo atinge sua atividade saturada após o material alvo ser irradiado por um período equivalente a 10 vezes a meia vida do radioisótopo formado⁽²²⁾.

Em nosso caso, ao se efetuarem as medidas no final de 5 operações consecutivas, podemos dizer que tanto os emissores β^+ ($T_{1/2}$ = 10 a 20 min) como o Mg-27 ($T_{1/2}$ = 9,45 min) já atingiram suas atividades de saturação.

Entretanto, não podemos dizer o mesmo sobre o Ar-41 ($T_{1/2}$ = 1,8 horas) e o Na-24 ($T_{1/2}$ = 15 horas).

A relação entre a atividade saturada " A_s ", e a atividade obtida após 5 dias de operação (A_5) no atual ritmo de funcionamento do reator é:

$$\frac{A_5}{A_s} = [1 - e^{-\lambda t_1} + e^{-\lambda(t_1 + t_0)} - e^{-\lambda(2t_1 + t_0)} + e^{-2\lambda(t_1 + t_0)} - e^{-\lambda(3t_1 + 2t_0)} + e^{-3\lambda(t_1 + t_0)} - e^{-\lambda(4t_1 + 3t_0)} + e^{-4\lambda(t_1 + t_0)} - e^{-\lambda(5t_1 + 4t_0)}]$$

sendo:

λ = constante de decaimento do radionúclido

t_i = tempo de irradiação em cada ciclo (8 horas)

t_e = tempo de espera em cada ciclo (16 horas)

Substituindo-se os valores acima para o caso de Na-24 e o Ar-41, encontramos:

$$\text{-- para o } ^{24}\text{Na} : A_s/A_{\infty} = 0,46 \rightarrow A_{\infty} = \frac{2,89}{0,46} = 6,28 \text{ (mR/h)}$$

$$\text{-- para o } ^{41}\text{Ar} : A_s/A_{\infty} = 0,95 \rightarrow A_{\infty} = \frac{1,02}{0,95} = 1,07 \text{ (mR/h)}$$

Deste modo, quando o reator operar em regime contínuo por tempos iguais ou superiores a $10 \times T_{1/2}(^{24}\text{Na})$, poderemos esperar um acréscimo nos níveis de radiação pelo fato de que esses dois elementos também atingirão suas atividades de saturação.

Presentemente, planeja-se aumentar a potência de operação do IEA-R1 para um máximo de 10 MW. Existe uma preocupação acerca do nível de radiação na superfície da piscina quando o reator estiver trabalhando em potência superior a 5 MW. Assim, como complemento do nosso estudo, calculamos os níveis de radiação junto à superfície da piscina para operação em 5 MW e 10 MW.

Adotando os fatores de acréscimo na atividade em função do aumento de potência do reator, dados nas tabelas III.14 e III.15 do Capítulo 3, podemos determinar quais serão os níveis de radiação na superfície livre da piscina caso o reator opere em regime contínuo de 5 MW e 10 MW. Lembramos para o fato de que estes fatores de acréscimos são válidos tanto em termos de "atividade" como em termos de "níveis" de radiação pois estas variáveis estão diretamente interligadas.

Tabela V.4

Fatores de Acréscimo das Atividades ou dos Níveis de Radiação em Função das Condições de Operação do Reator

Elemento	Observações	Fatores de Acréscimo	
		5 MW	10 MW
Emissores β^+	será tomado como sendo igual ao do Mg-27 dado as impurezas	2,27	4,10
Magnésio-27	somente núcleos de recuo	2,49	4,97
Argônio-41	do ar dissolvido na água da piscina	2,45	4,85
Sódio-24	somente núcleos de recuo	2,49	4,97

Tabela V.5

Níveis de Radiação Esperados na Superfície Livre da Piscina Quando o Reator Estiver Funcionando em Regime Contínuo em 2 MW, 5 MW e 10 MW

Elemento	2 MW		5 MW		10 MW	
	mR/h	% sobre	mR/h	% sobre	mR/h	% sobre
		o total		o total		o total
Emissores β^+	0,44	3,7 %	1,00	3,4 %	1,80	3,0 %
Magnésio-27	2,87	23,9 %	7,14	24,0 %	14,26	24,1 %
Argônio-41	1,07	8,9 %	2,62	8,8 %	5,20	8,8 %
Sódio-24	6,28	52,3 %	15,63	52,5 %	31,21	52,7 %
Radiação Direta	1,35	11,2 %	3,37	11,3 %	6,75	11,4 %
TOTAL	12,01		29,76		59,22	

Como termo de comparação, lembramos que as normas de proteção radiológica (Veja Apêndice B) fixam em 2,5 mR/h a exposição máxima a que pode ficar sujeito um trabalhador em regime de 40 horas semanais.

Pelos valores da Tabela V.5, podemos concluir que o ^{24}Na e o ^{27}Mg , provenientes das reações de recuo $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ e $^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$, contribuem com 76% sobre o nível de radiação observado na superfície livre da piscina do reator IEA-R1.

6 – A REDUÇÃO DOS NÍVEIS DE RADIAÇÃO NA SUPERFÍCIE DA PISCINA

Como foi verificado no Capítulo anterior os níveis de radiação que serão atingidos caso o reator IEA-R1 venha a operar em potência de 5 MW e 10 MW estão muito acima dos máximos permitíveis para ambientes de trabalho contínuo.

É necessário portanto, que se tome medidas para a redução destes níveis antes do aumento de potência e do período de operação do reator.

Neste Capítulo, descrevemos os métodos e tentativas utilizadas no reator IEA-R1 para a redução dos níveis de radiação na superfície, tendo como objetivo fornecer subsídios para uma solução definitiva desse problema.

Uma pesquisa dos processos utilizados para a redução dos níveis de radiação na superfície da piscina em reatores semelhantes ao IEA-R1 nos mostrou que o meio utilizado normalmente para este fim, consiste na formação de uma camada de água superficial, estável e isenta de elementos radioativos^(5,21,25). Uma camada de água com 1,5 m a 2 m de espessura constituiria uma blindagem às radiações provenientes dos elementos radioativos dissolvidos na água reduzindo de até 8 vezes os níveis de radiação na superfície⁽⁵⁾.

Esta camada geralmente é formada utilizando-se água do sistema de retratamento (Cap. 2.4) que antes de ser injetada na superfície da piscina tem a sua temperatura elevada de alguns graus centígrados

em relação a temperatura normal da água da piscina. Entre os principais elementos radioativos existentes na água, somente o Argônio-41 não é retirado pelo sistema de tratamento.

Este elemento pode, entretanto, ser eliminado através de degaseificadores, colocados após o sistema de retratamento e de aquecimento da água.

Uma das condições básicas para a formação da camada de superfície é que a circulação da água de refrigeração do reator seja feita de modo que não existam correntes de água com velocidades superiores a 1 cm/s na interface de separação entre a água normal da piscina e a água que forma a camada.

Se esta condição não for satisfeita, o volume de água necessário para a formação e manutenção da camada e conseqüentemente a potência de aquecimento, serão extremamente elevadas.

Para o aquecimento desta água é possível utilizar-se da própria potência térmica gerada no núcleo do reator. Neste caso utiliza-se um trocador de calor onde a água do sistema de retratamento (formadora da camada) seria aquecida pela água do circuito primário de refrigeração do núcleo.

Para o caso do IEA-R1 a diferença de temperatura $\Delta t(^{\circ}\text{C})$ entre a saída e a entrada da água pelo núcleo é de:

Potência (MW)	Vazão do Circuito Primário		$\Delta t(^{\circ}\text{C})$
	G.P.M.	m ³ /s.	
2	2600	0,164	2,5 ^o C
5	3600	0,227	4,5 ^o C
10	5800	0,365	5,5 ^o C

A aumento de Δt para uma mesma configuração do núcleo do reator não é conveniente, pois neste caso as temperaturas das placas dos elementos combustíveis seriam conseqüentemente mais elevadas, afetando assim, a segurança de operação.

Com a utilização da potência térmica do reator, o ganho de temperatura da água do sistema de retratamento será pouco significativo, tendo em vista as perdas térmicas inevitáveis que ocorrerão no circuito. Entretanto este pequeno ganho de temperatura poderá ser compensado pelo aumento de vazão do sistema de retratamento.

Os equipamentos atualmente disponíveis no IEA-R1 para produzir a formação de uma camada de água isenta de produtos radioativos na superfície da piscina são:

- a) Aquecedor elétrico com potência de 40 MW;
- b) Tubulação para injeção de água na parte semi-circular da piscina com 1" de diâmetro provida de 68 orifícios com diâmetro de 1/8" que está situada 15 cm abaixo do nível normal da piscina. Pode-se utilizar neste caso tanto a vazão do sistema de retratamento (4,5 m³/h) como a vazão do sistema de tratamento da água da piscina (0,9 m³/h). (Veja Figura 8).
- c) Uma placa de lucite recobrimdo o compartimento de operação do reator (Figura 25) que

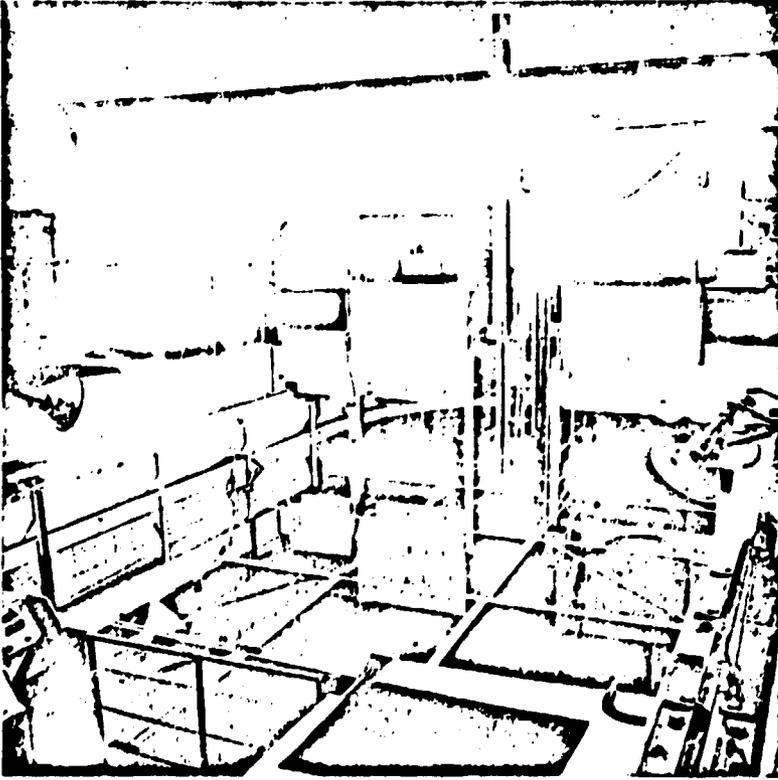


Figura 25 – Vista das Placas de Lucite Colocadas a 80 (cm) de Profundidade, no Compartimen-
to de Operação do Reator.

se encontra submersa a 80 cm de profundidade. Sua função é reduzir as velocidades das correntes hidráulicas que atingem a superfície.

Utilizando-se a água do sistema de retratamento, juntamente com os equipamentos acima descritos, não foi possível formar uma camada superficial mesmo com o sistema de refrigeração do reator ligado.

Este fato levou à realização de um levantamento das correntes hidráulicas existentes na piscina, trabalho este efetuado pelo Centro de Termohidráulica da Escola Politécnica, USP, e supervisionado pela COMR-IEA⁽²⁰⁾. Com as medidas efetuadas, constatou-se a existência de duas correntes principais que atingem a superfície, como esquematizado na Figura 26.

No levantamento das correntes hidráulicas verificou-se que as velocidades da água na faixa de 0 m a 2 m de profundidade estão compreendidas entre 3 cm/s e 6 cm/s.

A obtenção da taxa de destruição da camada, sob diferentes condições só foi possível com a ocorrência de uma camada de água quente, estratificada. O processo de extratificação foi efetuado aquecendo-se toda a água da piscina a uma temperatura de 5°C a 6°C superior a temperatura de estabilização da água, sob condições normais de funcionamento, que é de 28°C.

Este aquecimento é obtido utilizando-se a potência térmica do reator e para tanto, é suficiente desligarmos os ventiladores da torre de refrigeração do circuito secundário durante um dia de operação.

No dia subsequente, ligando-se com força total o sistema de refrigeração, a temperatura da água retorna à piscina através do difusor tenderá a atingir seu ponto de equilíbrio, a saber, de 28°C. Como a massa de água da piscina encontra-se a uma temperatura superior (≈ 33°C), formar-se-á pelo processo de extratificação, uma camada superficial com a água mais aquecida.

Fornecendo-se esta camada extratificada e ligando-se o sistema disponível para a "manutenção da mesma", podemos verificar o ritmo de destruição desta camada na faixa de 0 a 1 metro de profundidade para três condições:

- a) 150 cm/hora, sem as placas de lucite e sem o defletor da corrente principal;
- b) 65 cm/hora com as placas de lucite (Figura 28).
- c) 25 cm/hora com as placas de lucite e o defletor da corrente principal (Figura 28).

Pudemos constatar também que alterações da profundidade das placas de lucite e placa defletora, não produziram alterações significativas nos resultados finais.

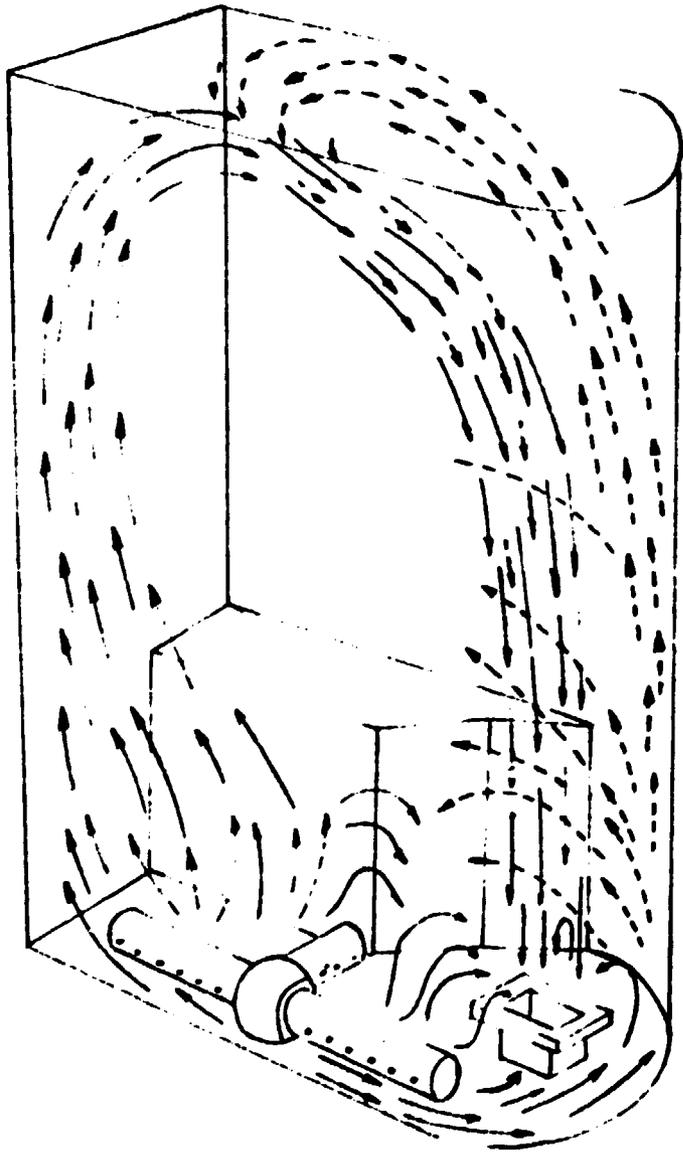
Sendo a área do compartimento de operação de 16 m², se o mesmo for isolado pela colocação das comportas, podemos determinar teoricamente qual seria o acréscimo de vazão do sistema de retratamento, necessário para compensar o ritmo de destruição da camada.

$$\text{Para o caso (b)} \rightarrow 16 \text{ m}^2 \times 0,65 \text{ m/h} = 10,4 \text{ m}^3/\text{h}.$$

$$\text{Para o caso (c)} \rightarrow 16 \text{ m}^2 \times 0,25 \text{ m/h} = 4,0 \text{ m}^3/\text{h}.$$

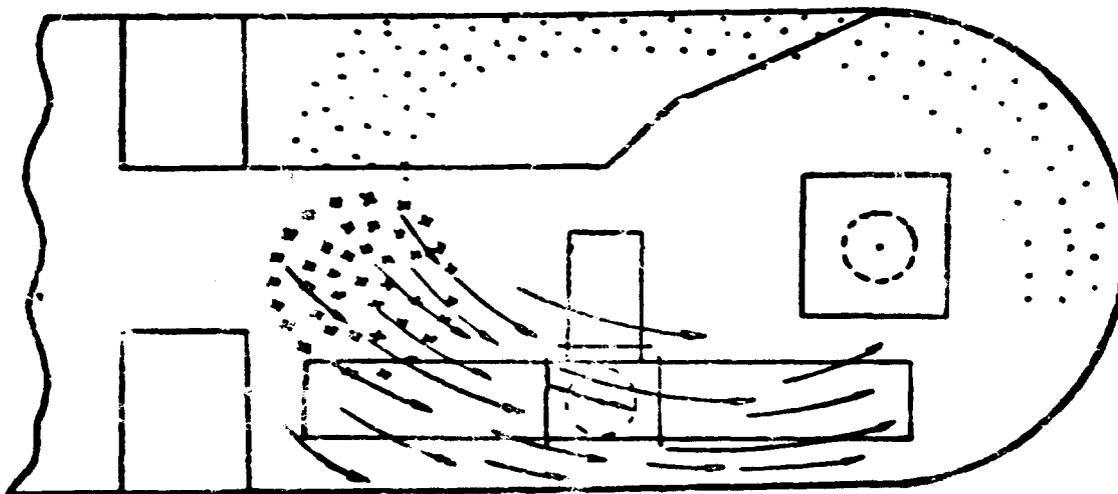
Como a vazão atual do sistema de retratamento é de 4,5 m³/h, seria necessário duplicarmos a capacidade do sistema no caso (c) ou quadruplicarmos este valor para o caso (b). Isto, se for mantida a vazão do circuito primário e, 2600 GPM, pois um acréscimo nesta vazão corresponderá a uma elevação no ritmo de destruição da camada superficial.

Podemos concluir assim pela impossibilidade de se formar uma camada estável de água na superfície da piscina nas condições atuais.



— CORRENTE PRINCIPAL
--- CORRENTE SECUNDARIA

Figura 26 - Correntes Hidráulicas Predominantes na Piscina do Reator



. CORRENTE SECUNDARIA
x CORRENTE PRINCIPAL

Figura 27 - Corrente Hidráulica Resultante na Superfície da Piscina do Reator

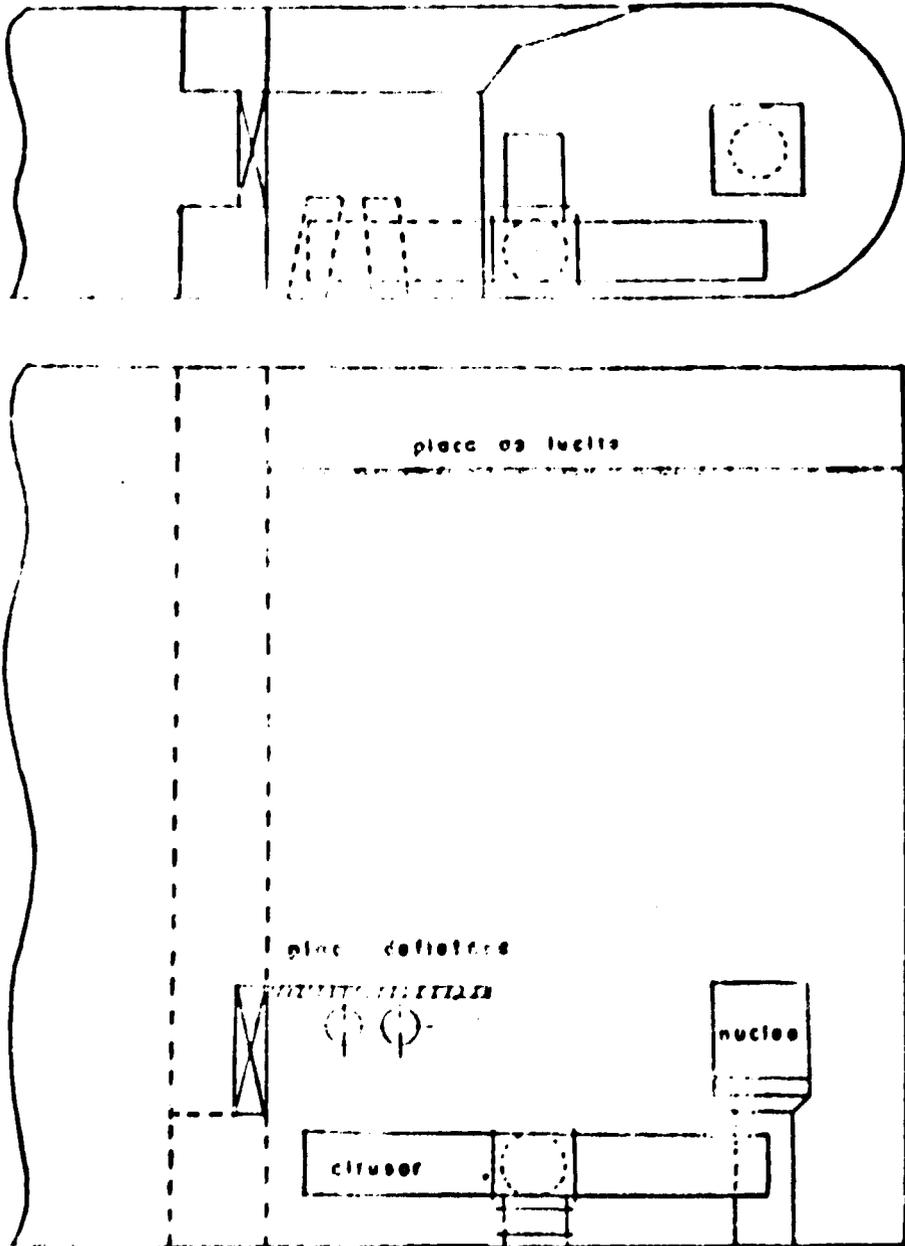


Figura 28 Esquema do Compartimento de Operação Mostrando a Localização das Placas de Luzes e Placa Defletora.

O problema básico de eliminação das correntes hidráulicas que atingem a superfície somente poderá ser solucionado com a mudança do retorno da água de refrigeração à piscina pelo "difusor" após o mesmo ser reprojetoado.

Uma otimização do difusor eliminaria a utilização de placas defletoras que além das dificuldades de fixação no interior da piscina interferem na livre movimentação dos elementos combustíveis e do próprio núcleo do reator, principalmente em casos de emergência.

Uma outra solução para formar uma camada superficial, que funcione como blindagem e ao mesmo tempo evite que correntes hidráulicas de água de refrigeração do reator atinjam a superfície da piscina seria a utilização de líquido com menor densidade que a água.

Este líquido teria as seguintes características:

- a – transparente
- b – não miscível com a água
- c – quimicamente estável
- d – não combustível
- e – não corrosivo (em relação aos materiais estruturais do reator)
- f – densidade inferior à água.

Apesar de ser uma solução tecnicamente aceitável, não foi encontrado ainda, um líquido que satisfaça a todas estas condições e que seja tão apropriado quanto a própria água.

Neste trabalho, resumimo-nos somente a comentar os problemas que surgem para a redução dos níveis de radiação na superfície livre da piscina.

Recomenda-se a execução de um trabalho sistemático de engenharia para a solução do mesmo.

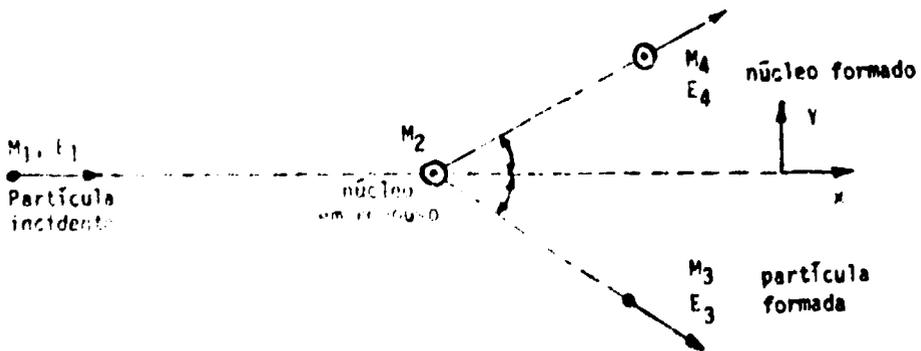
APÊNDICE A – RELAÇÃO ENTRE AS ENERGIAS DO NÊUTRON E DO NÚCLEO DE RECUELO

Sejam:

E_1 = Energia do nêutron causador da reação

E_4 = Energia inicial do núcleo de recuo formado.

A apresentação da reação nuclear ${}^{27}\text{Al}(n,\alpha){}^{24}\text{Na}$ ou ${}^{27}\text{Al}(n,p){}^{27}\text{Mg}$ pode ser esquematizada no "Sistema Laboratório", por:



Denominando por L a quantidade de movimento, $L = M.V$, podemos aplicar a lei da conservação da quantidade de movimento para a reação esquematizada

Temos:

$$E = 1/2.M.V^2$$

$$L = (2.M.E)^{1/2}$$

A projeção dos vetores "quantidade de movimento" sobre o eixo "x" nos fornece:

$$(2.M_1.E_1)^{1/2} = (2.M_3.E_3)^{1/2} \cdot \cos \theta + (2.M_4.E_4)^{1/2} \cdot \cos \psi$$

Sobre o eixo "y" teremos:

$$0 = (2.M_1.E_1)^{1/2} \cdot \sin \theta - (2.M_4.E_4)^{1/2} \cdot \sin \psi$$

fazendo:

$$X = (2.M_1.E_1)^{1/2}$$

$$A = (2.M_3.E_3)^{1/2}$$

$$B = (2.M_4.E_4)^{1/2}$$

ficamos com:

$$X = A \cos \theta + B \cdot \cos \psi$$

$$0 = A \sin \theta - B \cdot \sin \psi$$

elevando-se ao quadrado, somando, e voltando a substituir os valores de X , A e B , teremos:

$$E_3 = \frac{M_1}{M_1} \cdot M_1 + \frac{M_4}{M_3} E_4 - \frac{2(M_1.E_1.M_4.M_4)^{1/2}}{M_3} \cos \psi$$

Lembrando que

$$Q = E_3 + E_4 - E_1 \quad (1)$$

(Veja Capítulo 3.2.1.2), onde:

E_3 = Energia cinética de partícula formada na reação.

Substituindo-se o valor de E_3 na expressão de Q , ficamos com uma equação que é dependente apenas de E_1 e de E_4 .

$$Q = E_4 \left(1 + \frac{M_4}{M_3}\right) - E_1 \left(1 - \frac{M_1}{M_3}\right) - \frac{2(M_1.E_1.M_4.E_4)^{1/2}}{M_3} \cos \psi$$

Esta equação pode ser escrita na forma:

$$E_4 - \frac{2(M_1.M_4.E_1)^{1/2}}{M_3 + M_4} \cdot \cos \psi \cdot (E_4)^{1/2} - \frac{M_3 Q + (M_3 - M_1)E_1}{M_3 + M_4} = 0$$

Fazendo a seguinte mudança de variáveis:

$$\rho = (E_4)^{1/2} \quad A = \frac{(M_1.M_4.E_1)^{1/2}}{M_3 + M_4} \cdot \cos \psi$$

$$B = \frac{M_3.Q + (M_3 - M_1)E_1}{M_3 + M_4}$$

8.1

obtemos, finalmente

$$\rho^2 - 2A\rho + B = 0$$

que vem a ser a equação adotada no Capítulo 3.2.1.3.

APÊNDICE B – NÍVEIS DE RADIAÇÃO MÁXIMA ADMISSÍVEIS EM AMBIENTES DE TRABALHO

Para pessoas que trabalham em ambientes sujeitos à radiações ionizantes a "Comissão Internacional de Proteção Radiológica" fixa o limite "máximo permissível" a que podem ficar expostos⁽¹⁵⁾.

Órgão Exposto	Máximo Permissível
Corpo todo, órgãos hematopoiéticos, e gônadas	5 Rem/ano ou 3 Rem/trimestre;
Pele, tireóide e osso	30 Rem/ano ou 15 Rem/trimestre;
Mãos, pés, antebraço e tornozelo	75 Rem/ano ou 40 Rem/trimestre;
Qualquer outro órgão	15 Rem/ano ou 8 Rem/trimestre.

A unidade Rem (Roentgen Equivalent Man) é definida como a dose de qualquer radiação ionizante, que liberada em tecido humano é biologicamente igual a 1 Rad. Sendo que 1 Rad equivale a uma energia de 100 ergs liberada em 1 gr de material alvo⁽¹⁴⁾.

Normalmente, as medidas dos níveis de radiação X ou Gama são obtidas em "Roentgen", unidade esta que corresponde a uma quantidade de radiações que libera uma energia de 87 ergs em 1 cm³ de ar nas C.N.P.T.

No tecido humano esta mesma quantidade de radiação libera uma energia de 96 ergs em 1 grama de material.

Numericamente, podemos dizer que para radiações tipo Raios X ou Gama, atingindo o tecido humano,

$$1 \text{ Rem} \approx 1 \text{ Rad} \approx 1 \text{ Roentgen.}$$

Tomando como valor básico o "máximo permissível" para o corpo todo, um trabalhador em regime de 40 horas semanais poderá receber uma dose equivalente a:

$$100 \text{ mRem/semana} = 2,5 \text{ mRem/hora} \approx 2,5 \left(\frac{\text{mRoentgen}}{\text{hora}} \right)$$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ACTIVATION gamma ray constant. In: ARGONNE NATIONAL LABORATORY, Argonne, Ill. *Reactor physics constants*. 2.ed. Argonne, Ill., Jul. 1963. p.637-46. (ANL-5800).
2. BAAS, C. et alii. Calculs et mesures thermiques. In: *Rapport de surété de "Melusine" (après augmentation de puissance a 4 MW) partie descriptive, t.2*. Grenoble, Fr., CEA, Centre d'Etudes Nucleaires. Mars 1967. (annexe 2, p.63-73). (CEA-3131).
3. BETHE, H. A. & ASHKIN, J. Passage of radiation through matter. In: SEGRÉ, E. ed. *Experimental nuclear physics*. New York, Wiley, 1960. p.166-357.
4. BOHR, N. Mechanism of deuteron-induced fission. *Phys. Rev.*, 59:1042, 1941.
5. CHAUVET, M. Activité de l'eau primaire de "Siloé". In: AGERON, P. et alii. *Rapport de surété de "Siloé" partie descriptive*. Grenoble, Fr., CEA, Centre d'Etudes Nucleaires, 1963. v.3, appendice B. (CEA-2307).
6. DENILOV, G. Higher power from pool reactors. hot water layer raises permissible levels. *Nucl. Engng. (Tokyo)*, 9:249-50, 1964.
7. DRALEY, J. E. & RUTHER, W. E. Aqueous corrosion of aluminum. 1. Behavior of 1100 alloy. *Corrosion*, 12(9):318, 1956.
8. EVANS, R. D. *The atomic nucleus*. New York, McGRAW-Hill, 1955.
9. GAMMA-RAY, constants. In: ARGONNE NATIONAL LABORATORY, Argonne, Ill. *Reactor physics constants*. 2.ed. Argonne, Ill., Jul. 1963. p.651-7. (ANL-5800).
10. GARAY, P. N. Bigger and better swimming pool reactors. *Nucleonics*, 16(6):99-101, 1958.
11. GRIES, H. C. & SAVAGE, J. L. Effect of heat flux on the corrosion of aluminum by water. 4. Tests relative to the advanced test reactor and correlation with previous results. Oak Ridge, Tenn., Oak Ridge National Lab., Feb. 1964. (ORNL-3541).
12. INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA, São Paulo. *Reator de Pesquisas*. São Paulo, [s.d] (IEA-1)
13. INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA, São Paulo. *Relatório de análise de Segurança do IEA R1 modificado*. São Paulo, maio 1974. (Relatório Interno).
14. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS, Washington, D. C. *Radiation quantities and units*. Washington, D. C., Sep. 1968. (ICRU-11).
15. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Sutton, UK. *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. (Adopted September 17, 1965). Oxford, Pergamon, 1966. (ICRP 9).
16. LIMA, F. W. *Chemical support and maintenance work in light-water moderated research reactors*. São Paulo, Instituto de Energia Atomica, dez. 1965. (IEA-119).
17. LYON, W. S. & REYNOLDS, S. A. Radioactive species induced in reactor cooling water. *Nucleonics*, 13(10) 602, 1955.
18. NORTHCLIFFE, L. C. & SCHIFFRIG, R. F. Range and stopping power tables for heavy ions. *Nucl. Data Tabl.*, A7 233-463, 1970.

19. OJIMA, M. K. Comunicação Pessoal.
20. PASQUALETTO, H. & SOUZA, J. A. *Estudos visando a redução dos níveis de radiação na superfície do reator IEA-R1*. São Paulo, Instituto de Energia Atômica, fev. 1975. (IEA-Inf.-43).
21. PELRINE, J. R. Radionuclides found at equilibrium conditions in the cooling water of a 5-megawatt pool-type research reactor. In: ANALYTICAL chemistry in nuclear reactor technology: Sixth conference, Gatlinburg, Tenn., October 9-11, 1962. Oak Ridge, Tenn., USAEC, Div. Technical Information, 1963. p.107-18. (TID-7655).
22. PENTEADO FILHO, A. C. *Irradiações no reator e cálculos de ativação*. São Paulo, Instituto de Energia Atômica, nov. 1972. (IEA-Inf.-23).
23. PIERONI, R. R. et alii. *Níveis de radiação observados com o IEAR-1 operando em potência*. São Paulo, Instituto de Energia Atômica, 1960. (IEA-34).
24. STEHN, J. R. et alii. *Neutron cross sections, v.1, z-1 to 20*. 2.ed. Upton, N. Y., Brookhaven National Lab., Sigma Center, may 1964. (BNL-325, suppl, 2).
25. SEYFARTH, H. et alii. Efficiency determination for some standard type Ge (Li) detectors for gamma-rays in the energy range from 0.04 to 11 MeV. *Nucl. Instrum. Meth.*, 105:301-10, 1972.
26. TIBERGHIEM, R. *Chaîne de puissance "azote 16" sur le circuit de réfrigération de Melusine*. Grenoble, Fr., CEA, Centre d'Etudes Nucléaires, 1962. (Thèse) (CEA-2211).
27. TODISCO, S. & FRANCESCHINI, A. Misure della concentrazione di ^{41}A nell'acqua di un reattore a piscina e della sua velocità di fuga nell'ambiente circostante. *Minerva nucl.*, 5:319-23, 1961.

