

IRRADIAÇÃO E AVALIAÇÃO DE ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS
DE FABRICAÇÃO IPEN/CNEN-SP

Roberto Frajndlich (IPEN/CNEN-SP)
Joel Alvarenga de Souza (IPEN/CNEN-SP)
Sadamo Koshimizu (IPEN/CNEN-SP)

RESUMO

A partir de 1984 o Departamento de Metalurgia Nuclear do IPEN/CNEN-SP iniciou um programa de construção de elementos combustíveis tipo MTR, 20% enriquecidos em ^{235}U para substituírem os elementos combustíveis do reator IEA-R1 atualmente com altos índices de queima de ^{235}U .

Como todo programa pioneiro, houve a necessidade de se traçar diretrizes para avaliação do desempenho destes elementos. O presente trabalho procura mostrar como estão sendo desenvolvidas estas etapas, e os resultados até aqui verificados.

ABSTRACT

The Nuclear Metallurgy Department of IPEN/CNEN-SP began in 1984 the construction of MTR fuel elements 20 percent enriched in ^{235}U that will be used to substitute the IEA-R1 fuel elements showing high ^{235}U burnup rates.

Like all pioneer programs there was the need of establishing guidelines for the inspection of these fuel elements. This paper describes how these steps are being developed and the results verified by now.

INTRODUÇÃO

O reator de pesquisa IEA-R1 vem operando desde 1957 a uma potência de 2MW térmicos com elementos combustíveis tipo "MTR". Nestes quase 30 anos de operação foram adquiridos 4 conjuntos de elementos, a saber:

- Carregamento de 24 elementos combustíveis 20% enriquecidos em U-235, 19 placas curvas que foram pouco aproveitadas por apresentarem problemas de ordem técnico-constructivo;
- Um segundo carregamento idêntico ao primeiro em substituição aos elementos defeituosos;
- Um terceiro carregamento com 36 elementos, 93% enriquecidos e 18 placas planas;
- Um quarto e último carregamento composto por cinco elementos 20% enriquecidos em U-235, 18 placas planas.

Os três primeiros carregamentos foram oriundos dos Estados Unidos e o quarto da Alemanha Ocidental.

Tendo em vista as dificuldades encontradas na importação de novos elementos combustíveis para a operação do reator e levando-se em consideração a alta taxa de queima em U-235 apresentada pelos elementos aqui existentes, iniciou-se no ano de 1984 um programa em conjunto com a Diretoria de Materiais Nucleares (M) no sentido de se fabricar, no próprio IPEN-CNEN/SP, os elementos combustíveis para a substituição dos importados e assegurar assim, a continuidade da operação do reator.

Dentro do programa de fabricação houve a necessidade de se estabelecer uma sistemática de irradiação dos elementos combustíveis no reator IEA-R1 para avaliar o seu desempenho nas condições de operação deste reator.

Para iniciar o programa, foram montados em caráter experimental dois elementos parciais, os de número 128 e 129. O EC#128 é formado por 2 placas combustíveis nas posições externas do elemento ou seja na 1ª e 18ª posição conforme a Figura 1. O restante das placas são de alumínio. O EC#129 é constituído por 10 placas combustíveis assim enumeradas: 1, 3, 5, 7, 9, 10, 12, 14, 16 e 18. O restante das placas são de alumínio a exemplo do EC#128.

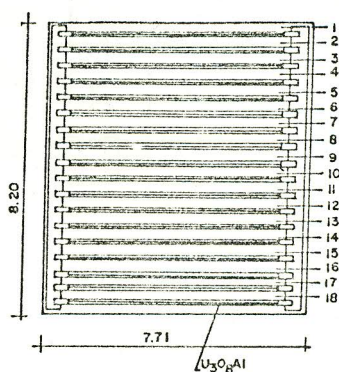


Figura 1 - Elemento Combustível Padrão

PROCEDIMENTOS UTILIZADOS NA IRRADIAÇÃO DOS EC#128 E EC#129

Duas etapas principais estão sendo usadas na avaliação da influência e com portamento destes dois elementos combustíveis no núcleo do reator IEA-R1.

Na primeira etapa foram realizados os cálculos neutrônicos para avaliar a influência destes elementos nos parâmetros nucleares tais como: excesso de reatividade e perturbação do fluxo de neutrons térmicos. Foi feito ainda uma análise prévia sobre a provável queima destes elementos nos primeiros meses de irradiação. Na segunda etapa, esta havendo um acompanhamento destes elementos durante a irradiação. Uma série de procedimentos são seguidos periodicamente e estão relacionados nos itens posteriores.

CONFIGURAÇÕES ESTUDADAS E METODOLOGIA DE CÁLCULO

A configuração estudada é a de número 150, formada por 28 elementos com bustíveis assim distribuídos (Figura 2):

- 18 elementos combustíveis padrão com 93% de enriquecimento em U-235;
- 05 elementos combustíveis padrão com 20% de enriquecimento em U-235;
- 04 elementos combustíveis de controle;
- 01 elemento combustível vazado.

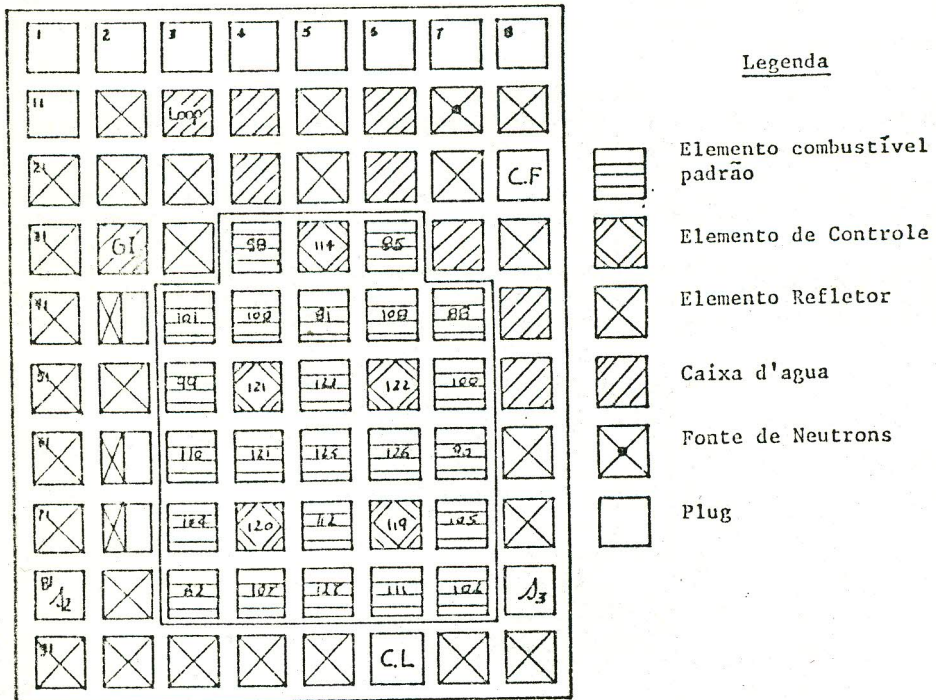


Figura 2 - Configuração 150

Inicialmente foram realizados os cálculos neutrônicos para esta configuração. Determinou-se o excesso de reatividade e os fluxos nas diversas posições. A partir de então, foram estudadas mais quatro configurações que denominaremos de 150A, 150E, 150C e 150D.

Todas as novas configurações estudadas são idênticas a configuração original de número 150 com pequenas alterações a saber:

- na configuração 150A foi introduzido o elemento combustível de número 128 produzido no Departamento de Metalurgia Nuclear (MM) do IPEN na posição número 15;
- na configuração 150B, além do elemento combustível 128, foi introduzido o elemento 129 também produzido no Departamento de Metalurgia Nuclear na posição 16;
- na configuração 150C e 150D estes 2 elementos são remanejados na placa matriz. Na configuração 150C o EC#128 passa ocupar a posição 33 e na configuração 150D o EC#129 é remanejado para a posição 37.

METODOLOGIA DE CÁLCULO

Os cálculos foram realizados através dos códigos HAMMER e CITATION [3,1] e os resultados apresentados e mostrados mais adiante. Trabalho anterior mostrou grande aproximação entre os cálculos teóricos e os resultados práticos [2].

As seções de choque utilizadas pelo código CITATION para cálculo do Keff, mapeamento do fluxo e queima de U-235, foram utilizadas a partir do HAMMER SYSTEM. Por sua vez o código HAMMER foi usado no cálculo dos parâmetros de uma rede infinita de células unitárias, para resolver a equação de transporte e de fornecer os parâmetros de difusão do reator, através da solução da equação de difusão. Portanto, a sua utilização requer uma análise na escolha das células unitárias e na homogeneização do núcleo do reator [2].

PROCEDIMENTOS DE INSPEÇÃO

No procedimento de inspeção são consideradas as placas 1 e 18 contadas a partir da face que contém a canaleta (Figura 3). Na folha de inspeção são anotadas as condições de irradiação e os resultados de inspeção visual e da análise dimensional (Tabelas 1 e 2).

As condições de irradiação são: Pn, condutividade, teor de iodo, vazão, potência, fluxo térmico, tempo de irradiação e temperatura.

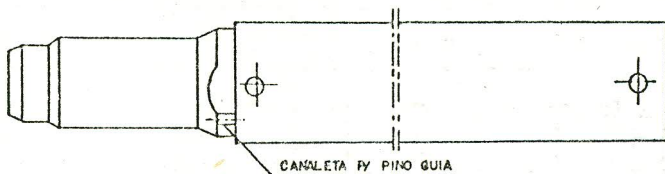


Figura 3 - Elemento Combustível

As condições de irradiação foram fixadas conforme os dados abaixo:

- pH: (entre 5,5 a 6,5)
- condutividade: $\leq 1 \mu \Omega/\text{cm}$
- teor de iodo: $300 \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$
- vazão: $14,5 \text{ m}^3/\text{h}$
- potência: 2MW
- fluxo: $0,8 \times 10^{13}$ a $2 \times 10^{13} \text{ n}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$
- tempo de irradiação:
 - EC nº 128: 1) 60 dias na posição nº 15 da placa matriz
 - 2) após 60 dias, continua a irradiação na posição nº 33 da placa matriz até atingir o "burnup" desejado (3% de queima de U-235 por ano)
 - EC nº 129: 1) 60 dias na posição nº 16 da placa matriz
 - 2) após 60 dias, continua a irradiação na posição 37 da placa matriz até atingir o "burnup" desejado (3% de queima de U-235 por ano).
- Temperatura: $\leq 75^\circ\text{C}$ no núcleo da placa combustível.

RESULTADOS

Reatividade inserida devido à introdução dos elementos combustíveis 128 e 129 na placa matriz

Todos os cálculos levaram em consideração a presença de produtos de fissão e actinídeos, conforme a Tabela 3. Não foi considerado nos cálculos a presença das barras absorvedoras.

Tabela 3 - Produtos de fissão e actinídeos no reator após 1 mês de operação

ELEMENTO	CONCENTRAÇÃO
Pu-239	2,77 - 07
Pu-240	3,90 - 10
Pu-241	1,18 - 12
Pu-242	1,14 - 15
U -236	4,92 - 07
Np-237	8,81 - 11
Am-243	3,15 - 19
Xe-135	6,04 - 09
Sn-149	2,54 - 08
Produtos de fissão	2,61 - 06

O excesso de reatividade apresentado pela configuração 150 foi de 5808,54 pcm. A configuração seguinte, ou seja, 150A (elemento combustível 128 na posição 15) apresentou um excesso de reatividade igual a 5809,02 pcm. A terceira configuração, 150B (elementos combustíveis 128 e 129 nas posições 15 e 16, respectivamente) apresentou um excesso igual a 5634,73 pcm enquanto a configuração 150D (dois elementos no núcleo), apresentou um excesso de reatividade igual a 6026,84 pcm, conforme tabela 4.

A diminuição do excesso de reatividade da configuração 150C em relação as outras, deve-se ao fato de que ao se colocar o elemento combustivel na posição 15 do núcleo, foi necessário remover um refletor acarretando uma perda de reatividade de 356 pcm da configuração 150.

Tabela 4 - Excesso de reatividade das diversas configurações devido a presença dos elementos combustíveis 128 e 129

CONFIGURAÇÃO	EXCESSO DE REATIVIDADE p.c.m.	VARIAÇÃO DA REATIVIDADE EM RELAÇÃO À CONF. 150
Configuração 150	5803,54	-
Configuração 150A	5809,02	0,48
Configuração 150B	5855,56	47,02
Configuração 150C	5634,78	- 173,76
Configuração 150D	6026,84	218,30

Fluxo de Nêutrons Térmicos e Densidade de Potência Máxima (w/cc) nos Elementos combustíveis 128 e 129

O fluxo de nêutrons térmico nos elementos experimentais apresentou variação conforme a posição dos elementos na placa e altura em relação à linha central do núcleo. Ao ocupar a posição 15 da placa matriz, o fluxo de nêutrons térmicos e a densidade de potência máxima do elemento combustivel 128 foi respectivamente, de $1,165E13$ n/cm².s e 15,21 w/cc (configuração 150A). Na configuração 150B os valores de fluxo térmico e densidade de potência máximas são, respectivamente, de $1,203E13$ e 15,73 w/cc para o elemento 128 e de $0,825E13$ e 6,59 w/cc para o elemento 129. Na configuração 150C, os valores são de $2,00E13$ e 23,9 w/cc para o EC#128 no núcleo e de $1,00E13$ e 7,5 w/cc para o EC#129. Por fim, para a configuração 150D temos $2,00E13$ e 23,9 w/cc para o EC#128 e $1,56E13$ e 17,54 w/cc para o EC#129.

Tabela 5 - Fluxo de nêutrons térmicos e densidade de potência máxima nos elementos combustíveis 128 e 129

CONFIGURAÇÃO E ELEMENTO	FLUXO TÉRMICO MÁXIMO ($\times 10^{13}$)	DENSIDADE DE POTÊNCIA MÁXIMA (w/cc)
150A EC 128	1,165	15,21
150B EC 128	1,203	15,73
EC 129	0,825	6,59
150C EC 128	2,00	23,90
EC 129	1,00	7,50
150D EC 128	2,00	23,90
EC 129	1,56	17,54

Deformações ocasionadas no fluxo de nêutrons térmico devido a presença dos EC 128 e EC 129 no núcleo

As deformações ocasionadas no fluxo de nêutrons térmico são mostradas nas Figuras 4, 5 e 6 abaixo.

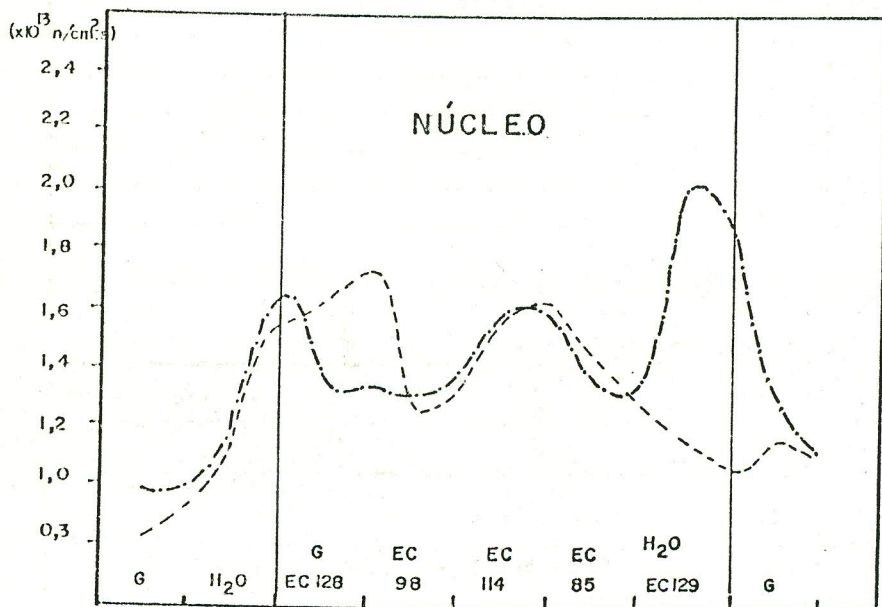


Figura 4 - Fluxo de nêutrons térmicos correspondente a um corte horizontal xx' da placa matriz, no centro dos elementos combustíveis.

--- Configuração 150
 -.-.- Configuração 150D

Cálculo de Burn-up para os elementos combustíveis 128 e 129

A queima de U-235 dos elementos combustíveis 128 e 129 pode ser vista na Tabela 6. Como se observa, os valores são muito baixos, ou seja, 3,0% de queima para o EC 128 e 1,0% para o EC 129, após 1 ano de irradiação no reator IFA-RI.

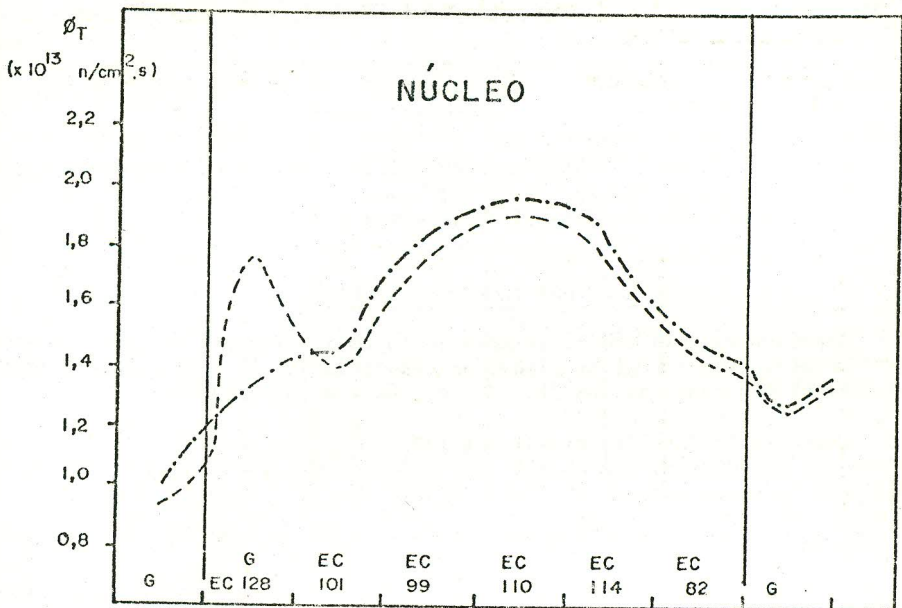


Figura 5 - Fluxo de nêutrons térmicos correspondente a um corte horizontal YY_1 da placa matriz, no centro dos elementos combustíveis

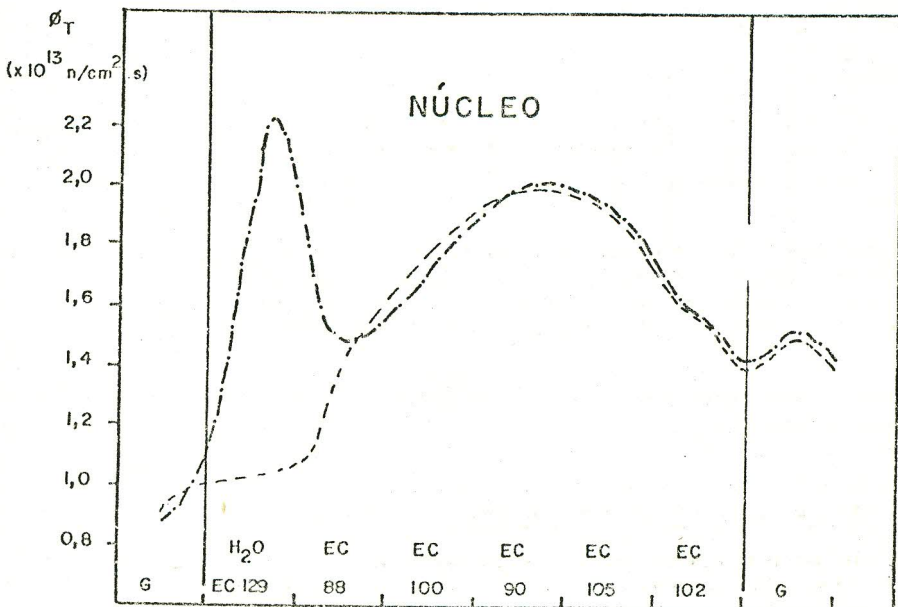


Figura 6 - Fluxo de nêutrons térmicos correspondente ao corte horizontal YY_2 da placa matriz, no centro dos elementos combustíveis

Tabela 6 - Burn-up dos EC# 128 e 129 após 1 ano de irradiação

ELEMENTO	CONDIÇÃO	TEMPO	BURN-UP (gr)
128	Fora do Núcleo	2 meses	0,10
	Límites do Núcleo	10 meses	0,50
129	Fora do Núcleo	2 meses	0,20
	Límites do Núcleo	10 meses	0,80

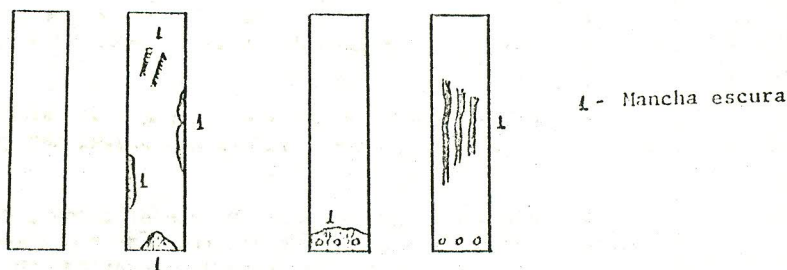
RESULTADOS DAS INSPEÇÕES VISUAIS

As inspeções visuais são realizadas de 15 em 15 dias por ocasião da manutenção do reator. Vamos registrar aqui os resultados da 1ª inspeção do elemento combustível 128 realizada em 21/10/85 e a última em 13/03/86.

Relatório nº 1: Inspeção Visual EC# 128
 Tempo de irradiação: 54h 25 min
 Posição na placa matriz: 15
 Fluxo: 10^{12} nêutrons/cm².s
 Potência: 2 Mw

A face A da placa 18 esta perfeita e a face B da placa 19 que esta exposta frontalmente ao fluxo de 10^{12} n/cm².s apresenta algumas manchas escuras que parecem provocadas pelo fluxo local d'água uma vez que as placas de alumínio também apresentam estas manchas (Figura 7).

Figura 7 - Condições das placas do EC# 128 em 21/10/85



Placas: 18 19 Laterais de alumínio
 Face: A B

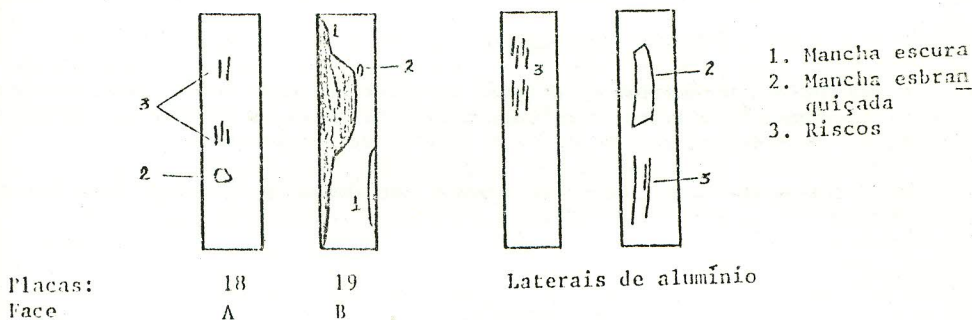
Apresentamos agora os resultados do último relatório antes da realização deste trabalho:

Relatório nº 8. Inspeção visual EC# 128
 Tempo de irradiação na posição 15: 334h 10 min.
 Tempo de irradiação na posição 33: 128h 48 min.
 Tempo de irradiação total : 512h 58 min.
 Posição atual na placa matriz : 33

Com relação ao relatório nº 1 observou-se o aparecimento de alguns riscos longitudinais na face A da placa 18 situados aproximadamente no centro da placa. Observou-se o aumento das manchas pretas e o aparecimento de uma mancha esbranquiçada no centro da face B da placa 15.

Nas placas laterais de alumínio as manchas escuras deram lugar a uma mancha esbranquiçada e riscos longitudinais.

Figura 8 - Condições das placas do EC#-128 em 30/03/86



CONCLUSÕES

Como se pode observar, sob o aspecto neutrônico, os resultados apresentados com a introdução dos elementos combustíveis experimentais em muito pouco afetou os parâmetros nucleares do núcleo do reator IEA-R1. O excesso de reatividade do núcleo permaneceu praticamente inalterado já que a reatividade introduzida através dos elementos combustíveis 128 e 129 foi compensado pela perda de reatividade do núcleo com a retirada do elemento refletor da posição 15 da placa matriz.

Com relação as inspeções visuais podemos dizer que as manchas e riscos existentes nas placas externas são superficiais não oferecendo qualquer risco a continuidade de irradiação destes elementos.

Quanto as condições de irradiação como pH, condutividade, teor de iodo e outros, os relatórios demonstram que estes valores têm-se mantido, nestes 3 meses de irradiação, dentro dos limites aceitáveis e descritos nos itens anteriores.

REFERÊNCIAS

- [1] FOWLER, T.B.; VONDY, D.R.; CUNNINGHAM, C.W., Nuclear Reactor Core Analysis Code CITATION. Oak Ridge, Tenn.; Oak Ridge National Laboratory Jul. 1971.
- [2] FRAJNDLICH, R.; SOUZA, J.A., Cálculos Neutrônicos para várias configurações do núcleo do reator IEA-R1 visando a sua otimização. São Paulo, Brasil, CNEN/SP, 1983
- [3] SUICH, J.E.; HONECK, H.C., The HAMMER System Heterogeneous Analysis by multigroup methods of exponentials and reactors United States Atomic Energy Commission, Jan. 1967.