

ACOMPANHAMENTO DA IRRADIAÇÃO DOS ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS DO REATOR IEA-R1

Margaret de Almeida Damy, Luis Antonio Albiac Terremoto, José Eduardo Rosa da Silva, Antonio Teixeira e Silva, Celso A. Teodoro, Georgi Lucki, Myrthes Castanheira.

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN / CNEN - SP)
Avenida Professor Lineu Prestes 2242
05508-000 São Paulo, SP.
madamy@ipen.br

RESUMO

O acompanhamento da irradiação dos elementos combustíveis faz parte de um programa de qualificação dos combustíveis de U_3O_8 -Al e de U_3Si_2 -Al fabricados no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP. Neste trabalho apresentam-se os resultados do acompanhamento da irradiação dos elementos combustíveis e elementos de controle do reator IEA-R1 para vários períodos de operação, desde junho de 1999 a dezembro de 2003. Nos relatórios de acompanhamentos, são resumidos os resultados de inspeções visuais realizados nos períodos vigentes para cada configuração em operação no Reator IEA-R1, visando escolher os próximos elementos combustíveis a serem inspecionados ou mesmo substituídos por elementos novos. Uma das conclusões de inspeções periódicas no reator, foi a necessidade de substituição das barras de controle e segurança, por novas barras, fabricadas no IPEN/CNEN-SP, sendo que as antigas estavam sendo utilizadas desde 1972. O acompanhamento da irradiação dos elementos combustíveis do reator IEA-R1 é um trabalho em equipe realizado por pesquisadores do Centro de Engenharia Nuclear, CEN de várias áreas de atuação, com a colaboração de pesquisadores do Centro do Reator de Pesquisas, CRPQ. Tem a finalidade de verificar as condições de irradiação dos elementos combustíveis (ECs) do reator IEA-R1, evolução da queima, utilização contínua, ocorrência de falhas e necessidade de avaliação e substituição de elementos. São documentados os eventos ocorridos em cada configuração do reator, a fim de fornecer subsídios para operá-lo de maneira segura.

1. INTRODUÇÃO

O reator IEAR1 é um reator de pesquisa, tipo piscina, refrigerado e moderado a água leve, utilizando como refletores grafite e berílio. Sua primeira criticalidade ocorreu em 16 de setembro de 1957. A partir desta data operou à potência de 2,0 MW, sendo que desde 1997 foi reformado e passou por um processo de modernização, passando a operar à potência de 5,0 MW, a fim de torná-lo um reator produtor de radioisótopos e gerar importantes radionuclídeos, como o Mo-99, utilizados na medicina nuclear.

Nos últimos anos, o IPEN desenvolveu a fabricação de elementos combustíveis a dispersão de U_3O_8 em Al e U_3Si_2 em Al /1/. O combustível U_3O_8 -Al está qualificado para operação no reator IEA-R1 para uma densidade de urânio de até 2,3 gU/cm³ e o U_3Si_2 -Al está sendo qualificado para uma densidade de até 3,0 gU/cm³.

Como não se dispõe de célula quente para efetuar ensaios não destrutivos em amostras de combustíveis, inspeções visuais periódicas são realizadas desde 1997, onde é verificado o estado externo dos elementos combustíveis, além da realização de testes, através da técnica de *Sipping* (Técnica de Análise da Água Refrigerante) de cada elemento combustível/ elemento de controle e segurança - EC/ECC. Estes testes têm a finalidade de detectar possível falha em

algum elemento combustível sendo irradiado no núcleo e consiste na detecção de vazamento de produtos de fissão emissores de radiação gama, o que permite avaliar a integridade estrutural do revestimento dos combustíveis nucleares irradiados.

O acompanhamento dos elementos combustíveis tem sido feito para verificar as condições de operação em regime de 64 horas contínuas semanais com potência de operação do reator reduzida para 2,0 MW e examinar a capacidade de operação à potência de 5,0 MW. Pois, com a operação à maior potência, em períodos de 1999 verificou-se através de inspeções visuais realizadas periodicamente nos elementos combustíveis, que houve um aumento na oxidação da superfície externa das placas combustíveis de alguns ECs. Alguns destes elementos foram substituídos e outros ainda permanecem no núcleo, porém em posições de menor densidade de potência. Este acompanhamento da irradiação vem sendo feito para a qualificação dos elementos combustíveis.

2. Metodologia

Os elementos combustíveis padrão utilizados no reator IEA-R1 são do tipo MTR, “Materials Testing Reactor”. Cada EC compõem-se de 18 placas combustíveis planas paralelas, montadas mecanicamente em dois suportes laterais de alumínio com ranhuras.

As dimensões externas de cada elemento combustível perfazem (7,6 cm x 8,0 cm) por 88,0 cm de altura.

Ao longo dos 47 anos de operação do reator IEA-R1, foram utilizadas seis tipos de elementos combustíveis, a saber:

- a) Liga U-Al contendo $1,8 \text{ gU/cm}^3$, na qual o urânio apresenta 19,75% de enriquecimento em ^{235}U , fabricado nos EUA, utilizado entre 1957 e 1976;
- b) Liga U-Al contendo $0,6 \text{ gU/cm}^3$, na qual o urânio apresenta 93,15% de enriquecimento em ^{235}U , fabricado principalmente nos EUA, mas também na França, utilizado entre 1968 e 1997;
- c) UAlx disperso em matriz de alumínio, contendo $1,9 \text{ gU/cm}^3$, com grau de enriquecimento do urânio em ^{235}U igual a 19,75%, fabricado na Alemanha, utilizado entre 1981 e 1996;
- d) U_3O_8 disperso em matriz de alumínio, contendo $1,9 \text{ gU/cm}^3$, com grau de enriquecimento do urânio em ^{235}U igual a 19,90%, fabricado no IPEN/CNEN-SP, utilizado entre 1988 e 2004;
- e) U_3O_8 disperso em matriz de alumínio, contendo $2,3 \text{ gU/cm}^3$, com grau de enriquecimento do urânio em ^{235}U igual a 19,90%, fabricado no IPEN/CNEN-SP, utilizado desde 1996;
- f) U_3Si_2 disperso em matriz de alumínio, contendo $3,0 \text{ gU/cm}^3$, com grau de enriquecimento do urânio em ^{235}U igual a 19,90%, fabricado no IPEN/CNEN-SP, utilizado desde 1999.

É importante destacar que, desde setembro de 1997, o reator IEA-R1 opera utilizando exclusivamente combustíveis nucleares nacionais, dos tipos (d), (e) e (f), descritos acima e fabricados no próprio IPEN/CNEN-SP. O sistema de refrigeração tem como função retirar o calor produzido nas placas combustíveis, através da circulação da água da piscina. Este calor é eliminado para a atmosfera mediante o uso de trocadores de calor e torres de refrigeração. Com a finalidade de melhorar as condições gerais de refrigeração do núcleo do reator, decidiu-se reduzir a geração de calor no espaçamento existente entre componentes adjacentes. Para tanto, desde o início de 2004 passaram a ser utilizados elementos combustíveis padrão contendo combustível nuclear do tipo (e), mas cujas placas combustíveis externas (primeira e décima oitava) têm metade da densidade de urânio ($1,15 \text{ gU/cm}^3$). A análise Termo-hidráulica é feita com base nos dados de operação do reator, nas medidas das condições da água de

refrigeração do núcleo, em parâmetros neutrônicos e termo-hidráulicos obtidos com programas computacionais utilizados pelo Centro de Engenharia Nuclear do IPEN. Os cálculos neutrônicos são efetuados com os códigos de computador: LEOPARD /2/ e, HAMMER-TECHINION /3/ para geração de seções de choque, o 2DB /4/ para cálculo de reator em dois grupos de energia e o código CITATION /5/ para cálculo reatividade de amostras.

3. Histórico de Queima

A Tabela 1 contém um resumo geral dos parâmetros neutrônicos do reator IEA-R1 para as configurações 207, 210, 210 A, 210 B e 211. A configuração muda de número quando há entrada de um novo elemento combustível e muda de letra, quando há mudança de posição entre os mesmos elementos combustíveis. A Tabela 2 apresenta as características gerais dos ECs que participaram do núcleo do reator IEA-R1 desde a configuração de número 207, a qual teve início em 31 de maio de 1999, até a configuração de número 211, a qual permaneceu no reator até 16 de dezembro de 2003. Além disso, a Tabela 2 apresenta o histórico da queima em porcentagem de ^{235}U para cada elemento em todas as configurações apresentadas neste trabalho. Em relação à Tabela 2, têm-se as seguintes observações:

X – Este elemento não participou da configuração em questão;

1 -: Retorno em 01/08/01 no lugar do EC 156 para a Configuração 211;

ECC* - Elemento Combustível de Controle.

4. Histórico de Inspeções Visuais

O IPEN dispõe de uma câmera de TV subaquática tolerante à irradiação que vem sendo utilizada, desde setembro de 1997, nas inspeções visuais dos elementos combustíveis do reator IEA-R1m, a qual dispõe de recursos de iluminação e de lentes para aproximação e foco, que possibilitam observar as condições gerais das superfícies externas dos elementos combustíveis e da parte superior dos canais de água entre placas combustíveis com bom nível de nitidez.

A configuração 207 operou no reator IEA-R1 no período de junho a setembro de 1999. No período abrangido neste documento, o reator operou em regime de 64 horas contínuas semanais com potência de operação do reator reduzida para 2,0 MW. Não foi realizada inspeção visual dos elementos combustíveis neste período. Ao final de outubro de 1999 foi realizada uma inspeção visual dos elementos combustíveis pertencentes ao núcleo e foi constatado que o grau corrosão na superfície de placas combustíveis não apresentou alterações qualitativas.

Durante o período considerado, os valores medidos do pH e da condutividade da água da piscina não sofreram variações significativas, se comparados aos valores medidos nos meses anteriores, permanecendo dentro dos limites especificados para a operação do reator IEA-R1. Várias amostras de água foram coletadas da piscina e analisadas por espectrometria gama. As concentrações dos radionuclídeos encontrados permaneceram abaixo dos limites estabelecidos para o IEA-R1, não havendo indicação de falha de combustíveis no núcleo. Os parâmetros neutrônicos e termo-hidráulicos calculados e/ou medidos indicaram conformidade com os limites e critérios estabelecidos.

Tabela 1. Resumo dos parâmetros neutrônicos do Reator EA-R1 - Configurações de elementos combustíveis desde Junho de 1999.

Configuração nº	206	207	210		210 A	210 B	211		
Período no Reator		Junho a Set. 1999	Out. a Dez. 1999	Jan. a Set. 2000	Out. 2000 a Abril 2001	Abril a Julho 2001	Ago. 2001 a Maio 2002	Maió a Dez. 2002	Jan. a Dez. 2003
Início	11/04/99	31/05/1999	13/09/1999	13/09/1999	25/09/2000	09/04/2001	20/08/2001		
Coleta de dados	30/05/99	10/09/1999	31/12/1999	20/09/2000	04/04/2001	31/07/2001	14/05/2002	17/12/2002	16/12/2003
Excesso de reativ.[pcm]	3600 5,14\$	3530 5,04\$	5330 7,61\$	4200 6,00\$	3890 5,07\$	4340 5,67\$	3489 4,57\$	5014 6,63 \$	3817 5,05 \$
Horas de operação	1120,06	834,31	346,7	1928,4	1381,6	736,8	1101,5 h a 2 MW	1055,7h a 2,0 MW	1512 horas
Reatividade das barras (pcm)	BC: 3798 BS1: 4027 BS2: 3915 BS3: 3767	BC: 4130 BS1: 3976 BS2: 4270 BS3: 3855	BC: 3773 BS1: 4129 BS2: 4066 BS3: 4018	BC: 3773 BS1: 4129 BS2: 4066 BS3: 4018	BC: 3926 BS1: 3912 BS2: 3926 BS3: 3666	BC: 4022 BS1: 4061 BS2: 4009 BS3: 3670	BC: 4073 BS1: 4095 BS2: 4034 BS3: 3746	BS1: 3.823 BS2: 4.325 BS3: 4.308 BC: 3.778	BC: 3.823 BS1: 4.325 BS2: 4.308 BS3: 3.778
Total (ρ)	15507 pcm (22,16)	16231 pcm (23,17 \$)	15986 pcm (22,82 \$)	15986 pcm (22,82 \$)	15430 pcm (20,12 \$)	15762 pcm (20,58 \$)	15948 pcm (20,89 \$)	16234 pcm (21,47 \$)	16234 pcm (21,47 \$)
Queima média do núcleo ^{235}U	16,90 %	17,61 %	10,52 %	14,93 %	17,84 %	19,26 %	21,64 %	23,80 %	26,89 %
Densidade de potência média	22,76 W/cm ³	22,75 W/cm ³	23,77 W/cm ³	23,79 W/cm ³	23,78 W/cm ³	23,76 W/cm ³	23,78 W/cm ³	23,69 W/cm ³	23,70 W/cm ³
Densidade de potência do EC mais quente	32,48 W/cm ³ (EC IEA-162)	31,97 W/cm ³ (EC IEA-162)	28,16 W/cm ³ (EC IEA-179)	28,45 W/cm ³ (EC IEA-162)	35,11 W/cm ³ (EC IEA-170)	35,30 W/cm ³ (EC IEA-165)	35,91 W/cm ³ (EC IEA-165)	34,95 W/cm ³ (EC IEA-165)	35,26 W/cm ³ (EC IEA-165)
Fluxo rápido médio [n/cm². s]	3,76 x 10 ¹³	3,75 x 10 ¹³	3,69 x 10 ¹³	3,75 x 10 ¹³	3,75 x 10 ¹³	3,78 x 10 ¹³	3,82 x 10 ¹³	3,85 x 10 ¹³	3,88 x 10 ¹³
Fluxo térmico médio [n/cm². s]	1,46 x10 ¹³	1,46 x10 ¹³	1,30 x10 ¹³	1,35 x10 ¹³	1,35 x10 ¹³	1,38 x 10 ¹³	1,42 x 10 ¹³	1,45 x 10 ¹³	1,50 x 10 ¹³
Coefficiente de reatividade isotérmico	- 17,27 pcm/°C	- 17,36 pcm/°C	- 16,44 pcm/°C	- 16,44 pcm/°C	- 17,24 pcm/°C	- 17,38 pcm/°C	- 17,51 pcm/°C	-16,02 pcm / °C	-16,02 pcm / °C
Margem de desligamento	219 %	239 %	200 %	280 %	297%	263 %	357 %	224 %	325 %

Tabela 2. Percentagem de Queima Média do EC em ²³⁵U para cada configuração.

EC ou ECC*	Primeira Entrada no Reator ↓	Data de retirada ↓	Config. →	Anterior à 31/05/1999	207	210		210 A	210 B	211		
			Coleta →	---	10/09/99	31/12/99	20/09/00	04/04/01	31/07/01	14/05/02	17/12/02	16/12/03
U₃O₈-Al (D=1,9)			Irradiação	Queima Média (%²³⁵U)								
130	05/09/88	02/07/97	13260,5 horas	36,13	X	X	X	X	X	X	X	X
131	16/02/89	02/07/97	13032,13	31,52	X	X	X	X	X	X	X	X
132	20/02/90	02/07/97	11669,63	27,40	X	X	X	X	X	X	X	X
133	11/06/90	02/07/97	11261,62	29,65	X	X	X	X	X	X	X	X
134	21/09/90	19/12/97	11159,64	27,18	X	X	X	X	X	X	X	X
135	21/09/90	02/07/97	10877,27	30,86	X	X	X	X	X	X	X	X
136	21/09/90	19/12/97	11159,63	25,41	X	X	X	X	X	X	X	X
137	21/09/90	06/01/99	13678,54	30,94	X	X	X	X	X	X	X	X
138*	25/11/91	19/02/98	9938,34	29,69	X	X	X	X	X	X	30,51	33,14
139*	20/07/92	19/02/98	9086,64	30,32	X	X	X	X	X	X	28,70	31,09
EC	Entrada	Saída	Horas	Conf. 206 (coleta:30/5/99)	207	210		210 A	210 B	211		
140	01/10/93	31/05/98	10732,51	29,11	X	X	X	X	X	X	25,28	27,63
141	01/10/93	13/09/99	11566,75	26,77	27,99	X	X	X	X	X	X	X
143	13/12/94	13/09/99	10141,47	25,80	27,38	X	X	X	X	X	X	X
144	16/10/95	13/09/99	8954,79	21,91	23,57	X	X	X	X	X	X	X
145	16/10/95	13/09/99	8954,79	21,66	23,31	X	X	X	X	X	X	X
146*	16/09/94	13/09/99	10435,92	30,72	32,86	X	X	X	X	X	X	X
147*	23/03/95	13/09/99	9838,42	30,47	32,53	X	X	X	X	X	X	X
148	16/10/95	13/09/99	8954,79	21,82	23,48	X	X	X	X	X	X	X
149 (1)	10/06/96	13/09/99	9823,60	19,06	20,38	X	X	X	X	22,23	23,89	26,27
150	10/06/96	--	7666,40	18,71	19,97	20,67	23,81	25,89	26,91	28,66	30,51	33,14
151	15/11/96	--	6445,64	16,96	18,28	18,99	22,13	24,24	25,26	27,04	28,70	31,09

Tabela 2. Percentagem de Queima Média do EC em ²³⁵U para cada configuração (Continuação)

EC ou ECC*	Primeira Entrada no Reator	Data de retirada	Config. →	206	207	210(início-13/9/99)		210 A	210 B	211		
			Coleta →	Anterior à 31/05/1999	10/09/99	31/12/99	20/09/00	04/04/01	31/07/01	14/05/02	17/12/02	16/12/03
U₃O₈-Al (D=2,3)			Irradiação(h)	Queima Média (%²³⁵U)								
152	12/05/97	--	5221,72	12,65	14,45	15,19	18,49	20,69	21,77	23,64	25,28	27,63
153	16/11/96	--		18,16	19,77	20,42	23,33	25,29	26,24	28,40	30,38	33,20
154	12/05/97	--		15,14	17,49	18,37	22,30	24,92	26,20	28,40	30,46	33,29
155	08/09/97	--		11,29	13,64	14,87	20,30	22,89	24,15	26,32	28,12	30,70
156	08/09/97	01/08/01	Falhado	11,18	12,90	13,82	17,92	20,62	21,95	X	X	X
157	08/09/97	--		11,35	13,10	14,00	18,02	20,69	21,99	24,24	26,12	28,81
158	08/09/97	--		11,19	12,91	13,81	17,80	20,48	21,78	24,02	25,97	28,75
159	08/09/97	--		11,60	13,38	14,30	18,41	21,11	22,45	24,75	26,75	29,62
160	08/09/97	--		11,05	13,35	14,57	19,96	22,65	23,96	26,20	28,28	31,25
161	08/01/98	--		10,48	12,97	14,24	19,88	23,59	24,84	26,98	28,87	31,56
162	08/01/98	--		10,98	13,48	14,75	20,40	24,11	25,34	27,46	29,29	31,91
163	11/01/99	--		2,63	4,54	5,56	10,08	13,09	14,56	17,08	19,52	23,00
164	30/05/99	--		X	2,00	3,03	7,59	10,63	12,11	14,66	16,93	20,18
166*	02/03/98	--		10,94	13,26	14,44	19,69	23,13	24,80	27,65	30,04	33,44
167*	02/03/98	--		10,91	13,26	14,46	19,80	23,31	25,01	27,92	30,44	34,01
179*	13/09/99	--		X	X	1,36	7,34	11,24	13,15	16,41	19,10	22,93
180*	13/09/99	--		X	X	1,34	7,23	11,07	12,95	16,15	18,98	23,00
U₃Si₂-Al (D=3,0)			Irradiação(h)	Queima Média (%²³⁵U)								
165	13/09/99	--		X	X	0,85	4,65	7,20	9,01	12,12	14,84	18,71
168	13/09/99	--		X	X	0,87	4,71	7,29	9,09	12,17	14,74	18,41
169	13/09/99	--		X	X	0,90	4,89	8,39	10,09	13,00	15,50	19,06
170	13/09/99	--		X	X	0,87	4,71	8,25	9,97	12,93	15,40	18,93
171	13/09/99	--		X	X	0,89	4,84	7,44	8,74	10,97	13,14	16,25

A configuração de núcleo na qual o reator operou no período de outubro a dezembro de 1999 foi a configuração 210. A inspeção visual realizada permitiu determinar o estado de corrosão de oito dos elementos combustíveis em uso no núcleo e acompanhar o processo para cada um dos revestimentos destes elementos. Não foi observada, no entanto, nenhuma corrosão que inviabilizasse a permanência dos elementos inspecionados no núcleo do reator.

Na primeira inspeção visual para a configuração 210B foram observados os ECs de fabricação IPEN/CNEN-SP com combustíveis tipo U_3O_8 -Al de números 150, 153, 155, 157, 160, 162 e 163. e com combustíveis tipo U_3Si_2 -Al de números 165, 168, 169, 170 e 171. A segunda inspeção foi efetuada em decorrência da falha do combustível IEA-156 e foi realizada na primeira semana de Agosto de 01. Os elementos combustíveis inspecionados foram os elementos de tipos U_3O_8 -Al de números 151, 152, 154, 158, 162 e 156. Apesar de não ter sido constatado na análise da água da piscina um aumento significativo de radionuclídeos importantes, foi observado um aumento na concentração de I-131, a inspeção visual detectou falha no EC IEA-156, comprovada por teste de *Sipping*.

Durante a configuração 211, foi feito o acompanhamento de irradiação do combustível no reator no período de 8 de Agosto de 2001 até 20 de Maio de 2002. Pois em 20/05/02, houve a troca dos refletores do reator, ou seja, a entrada dos refletores de Berílio. Embora a configuração não tenha sido mudada, os parâmetros neutrônicos são alterados. A configuração 211 iniciou em 8 de Agosto de 2001, quando há entrada dos refletores. Em 20 de maio de 2002 houve mudança na periferia do núcleo, colocados refletores de Berílio, não mexendo nem em posição nem colocando outros elementos combustíveis.

Os testes de “*Sipping*” realizados nos demais elementos combustíveis não indicaram nenhum tipo de liberação de produtos de fissão, apesar dos elementos IEA-154, 158 e 162 apresentarem perda de camada de óxido na superfície do revestimento (descamação). O EC IEA-162 acusa descamação antiga na região central, e também, um ponto preto bastante oxidado em sua volta, em sua região inferior, assim, estes elementos deverão ser inspecionados posteriormente dentro do programa de qualificação dos elementos combustíveis IEA.

Recomenda-se a verificação das condições termo-hidráulicas de refrigeração do reator bem como reavaliação do Comitê de Análise de Segurança a respeito da operação do reator IEA-R1 a potência de 5 MW, uma vez que as maiores oxidações nos ECs, observadas nas inspeções visuais realizadas, indicam que estas foram decorrentes de operações a níveis de temperatura que aceleraram a cinética de formação de óxido, níveis estes que foram alcançados na operação a 5 MW. As marcas de forte oxidação, inclusive regiões com descamação, observadas após o período experimental de operação a 5 MW, indicam que as temperaturas dos revestimentos das placas combustíveis dos ECs centrais do núcleo ultrapassaram a temperatura limite de projeto especificada de 95 °C.

Para o período de Janeiro a Dezembro de 2003, ainda para a configuração 211, foram realizados 3 testes em todo o conjunto de barras absorvedoras de nêutrons do reator IEA-R1. Além disso, houve substituições das barras de controle e de segurança por novas de Prata, Índio e Cádmiio, fabricadas no IPEN pelo Centro de Combustíveis Nucleares, CCN. A barra de controle e de segurança número 1 foi substituída em 23 de Outubro; a barra de segurança número 3 em 22 de Dezembro de 2003. A barra de segurança de número 2 foi retirada do núcleo e trocada pela nova em 26 de Janeiro de 2004. Os testes de queda de barras foram realizados nos dias 3 e 20 de Janeiro e no dia 27 de Junho de 2003.

Foram realizados três relatórios de acompanhamento da irradiação dos ECs de fabricação IPEN/CNEN-SP durante todo o ano de 2003, para a configuração 211, a qual iniciou a operação em

Agosto de 2001. Neste período, não foram realizadas inspeções visuais em elementos combustíveis do reator IEA-R1, devido principalmente ao comportamento destes elementos em configurações anteriores à potência de operação de 2,0 MW e devido ao reduzido número de horas em que o reator operou a esta potência.

Porém, devido ao aumento de atividade, observado tanto na água da piscina quanto no saguão do reator IEA-R1 desde Outubro do ano de 2002, foram realizados no início de 2003, testes de “*Sipping*” em todos os 24 elementos combustíveis do núcleo do reator. Os resultados destes testes indicaram não haver falha em elementos combustíveis, uma vez que foi constatada total ausência de produtos de fissão nos espectros de raios gama resultantes das medidas em todas as amostras coletadas nos elementos combustíveis do núcleo do reator.

Estudos detalhados foram efetuados posteriormente e chegou-se a conclusão que o aumento de atividade observado era proveniente do elemento estocado IEA-156, que estava dentro da piscina falhado e ainda liberando produtos de fissão a partir do “rack” de estocagem onde se encontrava armazenado. Após o elemento IEA-156 ter sido retirado do “rack” de estocagem e isolado provisoriamente em um tubulão com água, a atividade na água da piscina e no saguão do reator diminuiu gradualmente até retornar aos valores normais.

Entretanto, nos testes de *Sipping* realizados no início de 2003, detectou-se atividade elevada do isótopo ^{110m}Ag , indicando que o revestimento de níquel das barras de controle continuava a descamar, conforme vinha ocorrendo de maneira acentuada desde 1999. Como consequência, foram realizadas em 2003 duas inspeções visuais nas barras de segurança e de controle, nos meses de Janeiro e Agosto. Após estas inspeções, a barra de controle e as barras segurança, que estavam sendo utilizadas no reator IEA-R1 desde 1972, foram substituídas por novas barras, fabricadas no IPEN/CNEN-SP.

A barra de controle e de segurança número 1 foi substituída em 23 de Outubro de 2003; a barra de segurança número 3 em 22 de Dezembro de 2003 e a barra de segurança de número 2 em 26 de Janeiro de 2004. Os parâmetros neutrônicos e termo-hidráulicos calculados e/ou medidos indicaram conformidade com os limites e critérios estabelecidos. O resultado mais importante da inspeção visual pode ser resumido da seguinte maneira: os elementos combustíveis que apresentaram manchas acentuadas de óxido em forma de gradiente, foram os elementos que operaram à potência de 5 MW durante alguns períodos de 1999, nas regiões centrais do núcleo, onde a densidade de potência é maior e que ainda encontram-se em uso no núcleo do reator. Alguns destes ECs apresentam regiões com descamação (perda ou desprendimento de camada de óxido da superfície do revestimento da placa combustível – ECs IEA-149, IEA-155 e IEA-162). No entanto, as manchas de oxidação observadas são similares àquelas constatadas em outros elementos combustíveis que também operaram à potência de 5,0 MW em 1999 e que já saíram do núcleo, sem nenhuma falha, após atingirem a queima estipulada de projeto.

5. CONCLUSÕES

Conclui-se que, operando o reator à potência de 2,0 MW, as marcas de oxidação não progridem ou o fazem de maneira bastante lenta. Isto indica que para a operação a 2,0 MW as margens termo-hidráulicas estão sendo adequadas para um funcionamento seguro do reator. Porém, continua-se recomendando a verificação das condições termo-hidráulicas de refrigeração do núcleo do reator, bem como reavaliação do Comitê de Análise de Segurança a respeito da operação do reator IEA-R1 à potência de 5,0 MW. Estas recomendações decorrem do fato de que as maiores oxidações nos ECs inspecionados são decorrentes de operações a níveis de temperatura que aceleraram a cinética de formação de óxido, níveis estes que foram alcançados na operação a 5,0 MW. As marcas de forte oxidação, inclusive regiões com descamação observadas após o período experimental de operação a

5,0 MW, indicam que as temperaturas dos revestimentos das placas combustíveis dos ECs centrais do núcleo ultrapassaram a temperatura limite de projeto especificada de 95 °C.

AGRADECIMENTOS

À equipe de operação do reator IEA-R1 que sempre prontamente nos auxilia nas inspeções visuais;
Aos pesquisadores do CEN, Mitsuo Yamaguchi, Pedro Umbehaum e Miriam Cegalla pelos cálculos efetuados com dedicação.

REFERÊNCIAS

1. SIMÕES, A. V. *Desempenho sob irradiação de combustíveis a dispersão de MTR*. 1993. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
2. LEOPARD-LEO4, University of Michigan, March 1980.
3. Barhen, J. et al. "The HAMMER Code System", EPRI-NP-565, October 1978.
4. University of Mich Nuclear Engineering Reactor Design Code 2-D Diffusion with Macroscopic Depletion 2DB-UM, University of Michigan, September 1986.
5. Fowler, T. B.; Vondy, D. R.; Cunningham, G. W. "Nuclear Reactor Code Analysis Code: CITATION", Oak Ridge National Laboratory, ORNL-TM-2496, Rev. 2, July 1971.