

## AVALIAÇÃO DO CICLO DE EQUILÍBRIO DE REATOR REFRIGERADO POR CHUMBO E CARREGADO COM COMBUSTÍVEL METÁLICO

Adimir dos Santos\* e Jamil Alves do Nascimento\*\*

\*Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP  
Av. Lineu Prestes 2.242  
05508-900 Butantã, São Paulo, SP, Brasil

\*\*Centro Técnico Aeroespacial, Instituto de Estudos Avançados – CTA/IEAv  
Torrão de Ouro, km 5.5  
12231-970 São José dos Campos, SP, Brasil

### RESUMO

É proposto um conceito de reator integrado refrigerado a chumbo (ILR) e carregado com combustível metálico para a próxima geração de reatores. O ciclo de combustível adotado apresenta características com potencialidades para não liberar rejeitos de alta atividade no ambiente e de alta segurança, constituindo uma boa alternativa para os países em desenvolvimento. O ILR é iniciado com combustível U-Zr e muda, paulatinamente, para o combustível U-TRU-Zr-TR (Terras Raras) no ciclo de equilíbrio. Neste trabalho foram avaliadas, no ciclo de equilíbrio, as reatividades de queima e de vazio no chumbo, o efeito Doppler e a fluência rápida em função do diâmetro da vareta – 6,35 até 10,4 mm - razão passo diâmetro – 1,308 - e potência do núcleo - 300 até 1500 MWe. O efeito Doppler é pequeno como esperado em um reator rápido carregado com combustível metálico. A reatividade de vazio no chumbo é negativa para reator com potência da ordem de 350 MWe. A fluência neutrônica é alta e os núcleos estudados necessitam de otimizações para satisfazerem o limite atual de  $4,0 \times 10^{23}$  n/cm<sup>2</sup>. O critério: reatividade de queima ( $\Delta k_{\text{queima}}$ ) <  $\beta_{\text{eff}}$  é satisfeito com um núcleo de 350 MWe e vareta com diâmetro de 10 mm.

**Keywords:** lead reactor, equilibrium cycle, metallic fuel, burnup reactivity, lead coolant.

### I. INTRODUÇÃO

A próxima geração de reatores está sendo pesquisada e desenvolvida pela comunidade nuclear internacional. Os novos conceitos são idealizados para satisfazer questões fundamentais colocadas atualmente para o uso de reatores nucleares na geração de energia: i) segurança melhor que nos reatores em operação – ênfases nos processos físicos inerentes ao reator e sistemas passivos, e resistência a proliferação, ii) impacto ambiental mínimo – utilização eficiente dos recursos naturais e adequado gerenciamento dos rejeitos radioativos, iii) competitividade econômica com outras fontes, e iv) aceitação pública.

Em 2000 Nascimento [1] propôs um novo conceito de reator rápido que combina as melhores características dos conceitos americano “Integral Fast Reactor – IFR” [2] e russo “Lead-Cooled Reactor - LCR” [3] que tem potencialidades para satisfazer os requisitos mencionados anteriormente. Este conceito foi denominado “Integral Lead Reactor – ILR”.

Este trabalho avalia algumas características do ILR no ciclo de equilíbrio, como: reatividades de queima e vazios no chumbo, efeito Doppler e fluência rápida, em

função do diâmetro da vareta – 6,35/8,12/10,4 mm; razão passo/diâmetro de 1,308; e potência do reator de 300/900/1500 MWe. O reator é carregado inicialmente com urânio enriquecido (U-Zr) e passa, paulatinamente, para o uma liga combustível com Transurânicos (U-TRU-Zr) no ciclo de equilíbrio. Para o Brasil e países em desenvolvimento, o início com urânio enriquecido é bem adequado devido a falta de experiência em combustível com plutônio.

A utilização do combustível metálico e chumbo em reatores tem sido objeto de interesse de pesquisadores japoneses e americanos. Em 95, Sekimoto [4] estudou reatores pequenos (150 MWt), com núcleo de vida longa (ciclo de 10 anos) para ser usado em áreas remotas. Nesta mesma linha, Greenspan [5] em 1998 propôs um reator de 50 MWe carregado com U-Zr para ser usado nos países em desenvolvimento no futuro. Em ambos os casos, não foi adotado a reciclagem do combustível queimado.

Em seguida é apresentada a Seção II que salienta as potencialidades do conceito como candidato à próxima geração de reatores. Na Seção III é feita uma breve descrição dos modelos de núcleo utilizado e do sistema de cálculo. A Seção IV discute os resultados, mostra as

tendências para otimizações e apresenta as necessidades de reprocessamento para um ILR de 350 MWe. A Seção V apresenta a conclusão.

## II. POTENCIALIDADES DO ILR PARA SER A PRÓXIMA GERAÇÃO DE REATORES

No conceito americano IFR as instalações do ciclo de combustível são integradas ao sítio do reator, ele usa combustível metálico, a via seca – piroprocesso [6] - para o reprocessamento do combustível queimado, e sódio como refrigerante. Atualmente, a experiência operacional com reatores rápidos a sódio [7, 8] mostra que o “calcanhar de Aquiles” desta tecnologia é o sódio devido a sua reação exotérmica violenta com a água e umidade do ar.

O interesse no uso do chumbo como refrigerante de reatores ressurgiu em meado dos anos 80 com a proposta russa em LCR e nos anos 90 com o interesse europeu nos sistemas híbridos sub-críticos acelerador-reator – Accelerator Driven Systems – proposto por Rubbia [9]. No primeiro caso a experiência russa com o refrigerante Pb-Bi em reatores de submarinos motivou a proposta. No segundo o chumbo foi adotado devido a sua boa produção de nêutrons pela reação de “spallation” com prótons de alta energia, da ordem de 1GeV.

Atualmente, o chumbo é uma alternativa ao sódio porque ele melhora a segurança do reator, é inerte, e permite simplificações no sistema primário, eliminação do trocador de calor intermediário, o que diminui custos [3]. Além disso, seu alto ponto de ebulição (1740 °C) permite imaginar aplicações do LCR em processos industriais que requeiram altas temperaturas, embora neste caso ainda seja necessário um grande esforço em P&D.

Especificamente, o conceito ILR proposto é um centro de geração de energia baseado em reator nuclear, com todas as instalações do ciclo de combustível localizadas dentro do sítio do reator. Ele pode usar combustível metálico ou nitreto, sistema primário do tipo piscina ou “top-entry”, reciclagem via seca, piroprocesso e chumbo como refrigerante.

A integração das instalações do ciclo de combustível ao sítio do reator introduz uma alta resistência à proliferação por restringir a circulação do material nuclear ao sítio. Além disso, diminui a vulnerabilidade destas instalações ao ataque por terroristas.

Uma característica importante do ILR é sua potencialidade de ser um sistema radiologicamente limpo, resultado do esquema de transmutação/partição escolhido; o piroprocesso recupera os elementos transurânicos com alta eficiência (>0.999) [6] e estes, por sua vez, retornam ao núcleo do reator para serem queimados. Atualmente, o reator refrigerado por chumbo é o que apresenta as melhores características para queimar os TRUs, como pode ser visto na Tabela 1 que mostra a razão entre as seções de choque de captura e fissão ( $\sigma_c / \sigma_f$ ). Além disso, os produtos de fissão problemáticos (PF) poderão ser recuperados na fase de reciclagem e colocados em feixes que serão reintroduzidos no núcleo, em posições especiais.

Estas posições serão devidamente projetadas para permitir que estes PFs sejam transmutados em isótopos estáveis e inócuos, como demonstrou o experimento TARC no CERN [10] no caso do uso do chumbo. Por conseqüência, o armazenamento do rejeito de alta atividade será facilitado, o risco ao ambiente será menor e a percepção, pela população, do risco de contaminação por lixo radiativo, será mais favorável.

TABELA 1. Razão  $\sigma_c / \sigma_f$  Para os TRUs em Diferentes Reactores (Adaptado da Ref. 11)

Reator	Térmico	Candu	PWRU	LMFBR	LCR
<sup>237</sup> Np	1.00+4*	2.02+2	61.7	3.67	0.42
<sup>238</sup> Pu	32.9	27.9	14.1	0.58	0.14
<sup>240</sup> Pu	4.49+3	4.36+2	1.79+2	1.14	0.14
<sup>242</sup> Pu	1.93+4	4.72+2	62.1	1.29	0.16
<sup>241</sup> Am	1.97+2	1.44+2	94.5	3.83	0.51
<sup>243</sup> Am	1.02+3	6.74+2	16.4	1.16	0.64
<sup>244</sup> Cm	17.3	33.1	15.9	1.61	0.21
<sup>246</sup> Cm	21.7	13.8	5.00	0.69	0.08

(\*) Leia  $1.00 \times 10^4$

Portanto o ILR tem todas as potencialidades para ser um conceito do futuro, visto que as atuais preocupações da população com respeito à energia nuclear poderão ser amenizadas.

## III. MODELOS E MÉTODO DE CÁLCULO

**Modelos Para o ILR.** Os modelos de núcleo para o estudo do ILR foram obtidos com base na experiência americana e russa [12,13]. A potência inferior do reator – 300 MWe – foi definida pela possibilidade de fabricação do sistema primário. A potência superior – 1200 MWe -foi escolhida com base no projeto do Super-Phenix 2. Uma potência intermediária - 900 MWe - completou a definição da potência. As varetas combustíveis estudadas foram de 6,35/8,12/10,4 mm. A razão passo diâmetro foi de 1,308. Adotou-se uma potência linear conservativa - 200 W/cm – que é a mesma do “Advanced Liquid Metal Reactor” americano.

O núcleo é do tipo homogêneo. O feixe de combustível é hexagonal, protegido por duto de aço inoxidável. O número de varetas por feixe é 271 separadas por grade. A altura ativa é 100 cm. O material estrutural é o aço inoxidável HT-9. A temperatura de fusão do chumbo (327 °C) requer uma alta temperatura de entrada no núcleo, 420 °C, para possibilitar uma margem até a sua solidificação. A temperatura de saída, 540 °C, é similar ao do reator refrigerado a sódio.

O número de feixes de controle, envoltório, refletor e blindagens e as espessuras axiais são de importância secundária neste estudo. Assim, eles foram definidos genericamente com base nos projetos de reatores atuais. As características geométricas dos modelos são apresentadas na

Tabela 2. A Fig. 1 apresenta o arranjo hexagonal para a potência de 300 MWe.

TABELA 2. Características Geométricas dos Modelos de Núcleo do ILR

Potência (MWe)	300	900	1500
Número de feixes			
Núcleo interno/externo	66-60	204-180	342-288
Controle-Envoltório	13-48	25-78	43-96
Blind. gama-nêutron	114-66	174-96	210-114
Diâmetro da vareta (mm)	6,35	8,12	10,4
Passo do feixe (mm)	149	188	238
Frações de volume (%)			
Combustível	31,7	32,7	33,5
Estrutura	21,8	20,4	19,1
Chumbo	46,5	46,9	47,4

O núcleo ativo foi dividido em duas regiões radiais, núcleos interno e externo, para aplanar a distribuição de potência. Nas análises aqui realizadas, os feixes de controle foram totalmente retirados do núcleo.

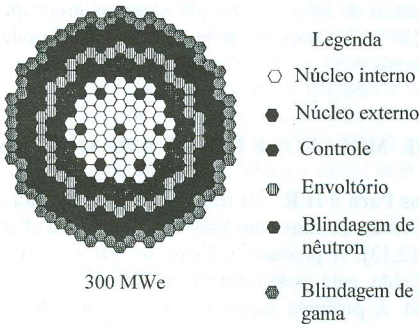


Figura 1. Arranjo dos Feixes no Núcleo do ILR.

**Sistema de Cálculo.** O sistema de cálculo usa a biblioteca de dados nucleares japonesa JFS-2 ("Japanese Fast Set 2") [14] em 70 grupos e três códigos: o EXPANDA [15], O CITATION [16] e o ORIGEN 2.1 [17]. O EXPANDA faz cálculos unidimensionais, em 70 grupos, e condensa as seções de choque em 9 grupos para serem usadas pelo CITATION na avaliação do ILR. Os cálculos estáticos e de queima foram realizados com a geometria RZ mostrada na Fig. 2. A cadeia utilizada no cálculo de queima está apresentada na Fig. 3. O código ORIGEN-2.1 foi usado no estabelecimento do ciclo de equilíbrio e, neste caso, as seções de choque foram as do próprio código. A aproximação começa com as condições do início de vida do reator e continua, ciclo-a-ciclo, utilizando as características de reciclagem do piroprocesso.

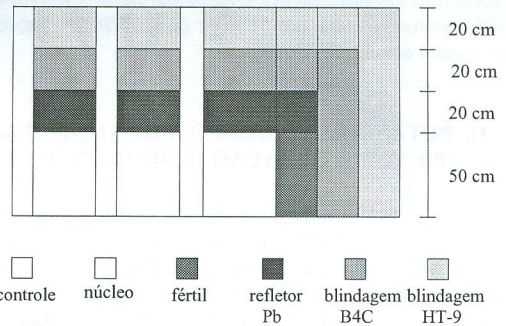


Figura 2. Modelo RZ Usado nos Cálculos.

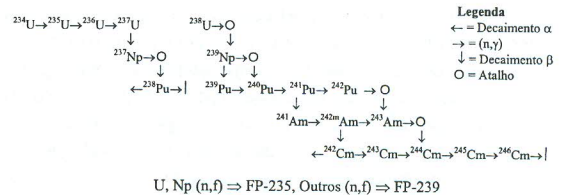


Figura 3. Cadeia de Queima Usada nos Cálculos.

**Metodologia de Cálculo.** O ILR é iniciado com o combustível U-Zr e passa, paulatinamente, para o combustível U-TRU-Zr-TR (TR - Terras Raras). A presença das TRs no combustível é decorrente do uso do piroprocesso na reciclagem [6]. Aqui, as TRs foram simuladas pelo  $^{143}\text{Nd}$ . A queima média alvo é 100 MWd/kg e o recarregamento foi feito em 3 lotes.

A reatividade de queima ( $\Delta k_{\text{Queima}}$ ) foi considerada como sendo a soma de dois componentes:

$$\Delta k_{\text{queima}} = \Delta k_{\text{Transm.}} + \Delta k_{\text{Incham.}} \quad (1)$$

onde,  $\Delta k_{\text{Transm.}}$  é a reatividade resultante da mudança da composição do combustível durante o processo de queima e  $\Delta k_{\text{Incham}}$  é a reatividade devido ao inchamento axial do combustível durante a queima que, por sua vez, foi simulado por aumento uniforme do núcleo ativo no início do ciclo de queima.

Inicialmente dois enriquecimentos,  $E_{\text{Int.}}$  e  $E_{\text{Ext.}}$  são ajustados nos núcleos interno e externo, para obter-se uma distribuição de potência plana, considerando que o reator esteja crítico no final do ciclo de queima. Isto é realizado com cálculos iterativos entre EXPANDA-CITATON. Posteriormente, as condições ajustadas são entradas para o ORIGEN, que estabelece a composição do combustível no ciclo de equilíbrio, fazendo cálculos de queima ciclo-a-ciclo. Este processo foi realizado com todos os modelos do ILR e, após isto, foi calculada a composição média,

mostrada na Tabela 3, utilizada pelo EXPANDACITATION na avaliação do ciclo de equilíbrio.

TABELA 3. Composição de Equilíbrio do Combustível

Isótopo	% peso	Isótopo	% peso	Isótopo	% peso
<sup>237</sup> Np	1,79	<sup>242</sup> Pu	1,95	<sup>243</sup> Cm	0,01
<sup>238</sup> Pu	2,49	<sup>241</sup> Am	2,22	<sup>244</sup> Cm	0,23
<sup>239</sup> Pu	57,12	<sup>242m</sup> Am	0,10	<sup>245</sup> Cm	0,06
<sup>240</sup> Pu	30,05	<sup>243</sup> Am	0,65	<sup>246</sup> Cm	0,01
<sup>241</sup> Pu	3,32	<sup>242</sup> Cm	0,01		

Nas análises do ciclo de equilíbrio os enriquecimentos foram ajustados no início do ciclo, usando-se a composição de equilíbrio. Em seguida o núcleo foi queimado. Os parâmetros de interesse no início e fim do ciclo foram avaliados com cálculos estáticos, usando-se as concentrações do combustível obtidas no ajuste inicial e no final do cálculo de queima. Todas as reatividades foram calculadas como diferença entre  $k_{ef}$  do caso referência e do caso perturbado.

#### IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os parâmetros neutrônicos avaliados foram a reatividade de queima ( $\Delta k_{Queima}$ ), o coeficiente de Doppler (CD), a reatividade de vazios no chumbo (RVPb) e a fluência rápida. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos no ciclo de equilíbrio para casos selecionados

Um requisito desejável para o ILR é ter  $\Delta k_{Queima} < \beta_{ef}$  para minimizar os efeitos do acidente TOP. Este acidente está baseado na retirada inadvertida do feixe de controle mais reativo que introduz uma reatividade  $\rho_{TOP}$  dado por:

$$\rho_{TOP} = \frac{\Delta k_{Queima}}{\text{numero de feixes de controle}} \quad (2)$$

Caso a razão de conversão (RC) do núcleo seja próxima de 1,  $\Delta k_{Queima}$  e  $\rho_{TOP}$  podem ser próximas de zero e o acidente não trará consequências para o núcleo. A razão RC é diretamente proporcional a razão fértil/fissil no núcleo, ou seja, ao enriquecimento. Quanto maior o núcleo, menor será o enriquecimento, a RC será maior e a reatividade de queima menor.

A reatividade de queima diminui com o aumento da potência do núcleo e com o aumento do diâmetro da vareta. Para um dado diâmetro da vareta, o aumento da potência do núcleo diminui a fuga radial de nêutrons diminuindo o enriquecimento, o que disponibiliza <sup>238</sup>U para conversão. O aumento de RC mostrado na Tabela 4 comprova este efeito.

Um resultado mostrado na Tabela 4 é que  $\Delta k_{Queima}$  muda de sinal entre 300 e 900 MWe para a vareta de 10,4 mm. Isto significa que o reator ganhou reatividade durante a

queima, veja  $RC > 1,0$ . Nestes casos, a reatividade inicial do núcleo foi a necessária para cobrir o atraso na conversão  $U \rightarrow Pu$ , ou seja, a reatividade do <sup>239</sup>Np. A Fig. 4 mostra o valor de  $k_{ef}$  em função do tempo de queima onde este comportamento pode ser observado. Então, há um intervalo de potência, entre 400 e 500 MWe, onde  $|\Delta k_{Queima}| < \beta_{ef}$  para a vareta de 10,4 mm e  $p/d = 1,308$  [1]. Estas potências podem ser diminuídas se o esquema de recarregamento é alterado para 4 ou 5 lotes. Nestes casos a reatividade de queima resultante é  $-0,39$  e  $-0,28$  % $\Delta k$ . Portanto, para o caso de um núcleo de 300 MWe, a condição  $|\Delta k_{Queima}| < \beta_{ef}$  é satisfeita com recarregamento em 5 lotes.

TABELA 4. Resultados Para o Ciclo de Equilíbrio

Potência (MWe)		300	900	1500		
Vareta (mm)		6,35	8,12	10,4	10,4	10,4
E <sub>int.</sub> (% peso)		16,6	15,11	14,1	13,4	13,4
E <sub>Ext.</sub> (% peso)		25,4	21,72	19,1	16,1	15,2
$\Delta k_{Queima}$ (%)		-3,39	-2,04	-0,64	+1,12	+1,51
$\beta_{ef}$ ( $\times 10^{-3}$ )		3,81	3,90	3,92	3,91	3,91
RC		0,77	0,87	0,96	1,06	1,08
Fluência ( $\times 10^{23}$ )		1,51	1,77	1,82	2,07	2,39
RVPb (% $\Delta k$ )		-3,71	-2,46	-1,40	+0,27	+0,71
CD ( $\times 10^{-3}$ )		-2,28	-2,60	-2,76	-2,99	-3,07

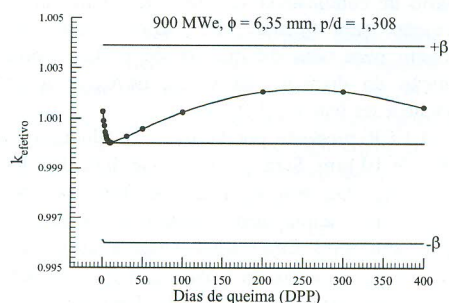


Figura 4.  $K_{ef}$  em Função do Tempo de Queima.

A reatividade de vazios no chumbo foi avaliada considerando a perda total do chumbo que flui no núcleo e regiões adjacentes. A Tabela 4 apresenta o valor desta reatividade no fim do ciclo de equilíbrio, que é a pior situação. A RVPb aumenta com o diâmetro da vareta devido a diminuição do enriquecimento o que aumenta disponibilidade do <sup>238</sup>U e a contribuição das fissões neste elemento quando do esvaziamento. O aumento da RVPb com a potência do núcleo também é resultado da diminuição do enriquecimento, com o agravante da diminuição do componente de fuga radial, neste caso estes efeitos se somam. Porém, para potências baixas, da ordem de 300 MWe, ela será negativa para este tipo de perturbação.

O efeito Doppler foi calculado considerando um aumento uniforme de temperatura pelo núcleo todo. O coeficiente de Doppler foi calculado como  $Tdk/dt$ . Este efeito é pequeno como esperado em reatores carregados com combustível metálico, e os resultados são similares aos obtidos em reatores a sódio do mesmo porte.

A fluência foi calculada considerando nêutrons com energia acima de 100 keV. O limite atual para o aço HT-9 é  $4,0 \times 10^{23}$  (n/cm<sup>2</sup>) [18]. Neste aspecto, nenhum dos modelos apresentados satisfaz o requisito. A fluência aumenta com o diâmetro da vareta e com a potência do núcleo, resultado da diminuição do enriquecimento. Esta diminuição faz com que o fluxo aumente para manter a potência constante. Outro efeito que contribui para o aumento da fluência é o aumento do ciclo de queima para as varetas mais grossas. Portanto, quanto à fluência rápida, o ILR precisa ser otimizado. Possíveis soluções para isso são: adotar diferentes enriquecimentos axiais, fazer remanejamento dos feixes críticos para posições mais favoráveis durante o recarregamento, etc.

**Tendências Para Otimizações.** Os resultados anteriores mostraram uma série de tendências que podem ser usadas para se iniciar uma otimização do ILR. No caso da reatividade de queima, varetas mais grossas são melhores. Porém, em muitos outros aspectos uma vareta mais fina é melhor. Por exemplo, a RVPb será mais negativa, a fluência rápida será menor, o sistema primário será menor, o inventário de combustível será menor, a vulnerabilidade à proliferação será menor, etc. Todos estes aspectos contribuem para uma diminuição de custos. Portanto, a diminuição do diâmetro da vareta deve ser a primeira otimização a ser feita no ILR.

O LCR proposto por Orlov [13] adota vareta com diâmetro de 10 mm. Será que para esse diâmetro de vareta  $\Delta k_{\text{Queima}} < \beta_{\text{ef}}$ ? Para responder esta pergunta foi estimada a reatividade de queima deste caso, tendo como base os resultados anteriores. Esta estimativa está apresentada na Fig. 5, e como pode ser visto, uma  $\Delta k_{\text{Queima}} < \beta_{\text{ef}}$  pode ser obtida usando-se uma vareta de 10 mm de diâmetro ( $\phi$ ), em um reator com potência da ordem de 350 MWe (ILR-350) e recarga em 5 lotes.

**Reciclagem no ILR-350.** Uma característica importante do ILR é o reprocessamento do combustível. O processo de recuperação adotado neste conceito utiliza-se de uma célula de eletrorefino que está bem descrita por Nawada [19]. No caso do ILR-350, qual seria o número de células de eletrorefino necessárias para preparar uma recarga? A estimativa da necessidade de reprocessamento para este caso, em termos de massa do combustível, está mostrada na Tabela 5. Para o cálculo do número de células considerouse que o combustível será reciclado e refabricado em 1 ciclo de queima. Os tempos envolvidos nos processos foram os mesmos de Nawada. O resultado desta estimativa foi que com apenas 6 células de eletrorefino é possível preparar o recarregamento de um ILR de 350 MWe. Detalhes destes cálculos podem ser obtidos na referência 1.

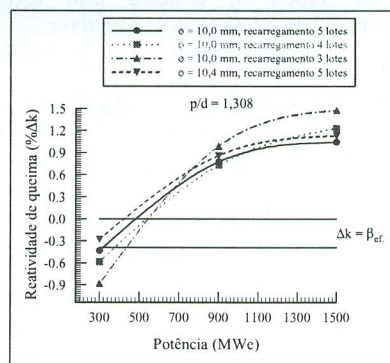


Figura 5. Reatividade de Queima Versus Potência do Núcleo e Número de Lotes do Recarregamento.

TABELA 5. Massa Reprocessada Para Uma Recarga do ILR-350

Etapas	TRU + U (kg)
Dissolução anódica	10360
Recuperação no cátodo líquido	4924
Recuperação no cátodo sólido	5436

## V. CONCLUSÃO

Foi estudado um conceito de reator que usa ciclo de combustível integrado, refrigerado a chumbo, e carregado com combustível metálico, aqui denominado ILR. Suas características chaves são a potencialidade de ser radiologicamente limpo, a boa segurança contra a proliferação e, possivelmente, ao ataque por terroristas, e uma alta segurança contra o acidente de sobrepotência. A reatividade de vazios no chumbo é negativa para um núcleo da ordem de 350 MWe. O efeito Doppler é pequeno como nos reatores rápidos atuais. A fluência neutrônica é alta e o conceito precisa ser otimizado a este respeito. A reatividade de queima é menor que  $\beta_{\text{ef}}$  em um reator com potência de 350 MWe e vareta com diâmetro de 10 mm. As boas características de segurança do ILR recomendam-no como candidato para a próxima geração de reatores. Principalmente para os países em desenvolvimento, e Brasil em particular.

## REFERÊNCIAS

- [1] Nascimento, J. A., **Avaliação Neutrônica de Reator Carregado com Combustível Metálico e Refrigerado por Chumbo**, Tese de Doutorado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN, 2000.
- [2] Hannum, W. H., Ed., **The Technology of The Integral Fast Reactor and Its Associated Fuel Cycle**, Prog. Nucl. Energy, vol. 31, 1997.

- [3] Adamov, E., Orlov, V., Filin, A., Leonov, V., Sila-Novitski, A., Smirnov, V., Tsikunov, V., **The Next Generation of Fast Reactor**, Nucl. Eng. Des., vol. 173, p. 143, 1997.
- [4] Sekimoto, H. e Zaki, S., **Design Study of Lead-And Lead-Bismuth-Cooled Small Long-Life Nuclear Power Reactors Using Metallic and Nitride Fuels**, Nucl. Techn., vol. 109, p. 307, 1995.
- [5] Greenspan, E., Elias, E., Kastenber, W. E., Stone, N., Aoki, K., Brown, N. W., **Compact Once-For-Life Fueled Reactors for Developing Countries**, Trans. Am. Nucl. Soc., vol. 78, p. 239, 1998.
- [6] Laidler, J. J., Battles, J. E., Miller, W. E., Ackerman, J. P., Carls, E. L., **Development of Pyroprocessing Technology**, Prog. Nucl. Energy, vol. 31, p. 131, 1997.
- [7] Pesteil, J. M., Coulon, P., **Consequences of External Storage Barrel Leakage on Fuel Management**, Trans. Am. Nucl. Soc., vol. 62, p. 73, 1990.
- [8] Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, **A Review of Fast Reactor Programme in Japan**, 29th Annual Meeting of The IWGFR, Aktau, Republic of Kazakstan, 14--17 May 1996, IAEA-TC-385.63, 1996.
- [9] Rubbia, C., Buono, S., Gonzalez, E., Kadi, Y., Rubio, J. A., **A Realistic Plutonium Elimination Scheme With Fast Energy Amplifiers and Thorium-Plutonium Fuel**, CERN/AT/95-53(ET), 1995.
- [10] González, E., **Experimental Measurements of  $^{99}\text{Tc}$  and  $^{129}\text{I}$  Transmutation in TARC at CERN**, Proc. Of the Fifth International Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, Mol, Belgium, November 25-27, 1998, EUR 18898 EN, p. 249, 1999.
- [11] Kocherov, N. P., Rimski-Korsakov, A. A., Khlopin, V. G., **Data Needs for Modeling of Fuel Cycle Concepts for Fast Lead Cooled Reactors**, INDC(NDS)-428, p. 141 2001.
- [12] Khalil, H. S., Hill, R. N., **Evaluation of Liquid-Metal Reactor Design Option for Reduction of Sodium Void Worth**, Nucl. Sci. Eng., vol. 109, p. 221, 1991.
- [13] Orlov, V. V., Sila, A. G., Tsikunov, V. S., Filin, A. I., Dobrovolsky, V. N., Kazennov, Y. I., Rogoskin, B. D., **Lead-Cooled Reactor Core, Its Characteristics and Features**, Proc. Int. Top. Meet. Advanced Reactors Safety ARS'94, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 17--21 April 1994, p. 516, 1994.
- [14] Takano, H., Hasegawa, A., Nakagawa, M., Ishiguro, Y., Katsuragi, S., **JAERI Fast Reactor Group Constants Set, Version II**, JAERI-1255, 1994.
- [15] Hasegawa, A., Katsuragi, S., Tone, T., **A One-Dimensional Diffusion Code for Multigroup Criticality and Perturbation Calculations with JAERI-Fast Set of 70-Group Structure: EXPANDA-70D**, JAERI-M-4953, 1972, (em japonês).
- [16] Fowler, T. B.; Vondil, D. R., **Nuclear Core Analysis Code: CITATION**, ORNL-TM-2496, July 1971.
- [17] **ORIGEN-2.1, Isotope Generation and Depletion Code - Matrix Exponential Method**, ORNL/TM-7175, 1971.
- [18] Glueckler, E. L., U. S. **Advanced Liquid Metal Reactor (ALMR)**, Prog. Nucl. Energy, vol. 31, p. 43, 1997.
- [19] Nawada, H. P., Bhat, N. P., Balasubramanian, G. R., **Some Computations in Planning Reconstitution of a 500-MW(Electric) Fast Breeder Reactor (Metallic) Fuel by Electrorefining**, Nucl. Tech., vol. 114, p. 97, 1996.

#### ABSTRACT

An integral metallic-fueled and lead-cooled reactor concept (Integral Lead Reactor - ILR) is proposed for the next generation reactor. The ILR fuel cycle presents potentiality good characteristics such as no release of high level wastes to the environment and high safety, constituting a suitable energy generation alternative for the developing countries. The ILR is started with U-Zr fuel and shifts to the U-TRU-Zr-RE (Rare Earth) fuel in the equilibrium cycle (EC). Burnup and lead void reactivities, Doppler effect, and fast fluence, were evaluated at the EC as function of the fuel pin diameter in 6.35 to 10.4 mm range, pin/diameter ratio of 1.308 and core power in 300 to 1500 MWe range. The Doppler effect is small, as expected in a fast reactor loaded with metallic fuel. The lead void reactivity is negative considering whole core perturbations for reactors powers of the order of 350 MWe. The fast fluence is high and the studied cores need an optimization to satisfy the present limit of  $4.0 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$ . The ILR core requirement - burnup reactivity ( $\Delta k_{\text{BU}} < \beta_{\text{eff}}$  - to mitigate the TOP accident, is obtained using a pin diameter of 10 mm in a reactor of 350 MWe power.