CONSIDERAÇÕES METALÚRGICAS SÔBRE UM REATOR DE CONVERSÃO COM LIGA LÍQUIDA DE TÓRIO

RICHARD M. BIDWELL

Publicação IEA — N.º 65
Setembro — 1963

INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
Caixa Postal 11049 (Pinheiros)
CIDADE UNIVERSITÁRIA "ARMANDO DE SALLES OLIVEIRA"
SÃO PAULO — BRASIL

CONSIDERAÇÕES METALÚRGICAS SÔBRE UM REATOR DE CONVERSÃO COM LIGA LÍQUIDA DE TÓRIO

por

Richard M. Bidwell

DIVISÃO DE METALURGIA NUCLEAR

INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA

São Paulo - Brasil

Publicação IEA Nº 65

Setembro 1963

Separata de A.B.M. - Boletim da Associação Brasileira de Metais - Nº 77, Vol. 19

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS

CONSIDERAÇÕES METALÚRGICAS SÔBRE UM REATOR DE CONVERSÃO COM LIGA LÍQUIDA DE TÓRIO

por

RICHARD M. BIDWELL

★

Separata do A B M
BOLETIM DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS
N.º 77 — Vol. 19

1963
SÃO PAULO — BRASIL

CONSIDERAÇÕES METALÚRGICAS SÔBRE UM REATOR DE CONVERSÃO COM LIGA LÍQUIDA DE TÓRIO [1] [2]

RICHARD M. BIDWELL [3]

RESUMO

Neste trabalho discute-se a necessidade de reatores de conversão para utilizar a maior parte dos recursos do Brasil em combustível nuclear. Explicam-se as vantagens do combustível móvel ou circulante. Descrevem-se desenhos de zona fértil e do caroço de um reator para a produção de U^{233} proveniente do tório pela queima de plutônio, que se propõe que opere em conjunto com outro que queima U^{233} e produz plutônio. Mostra-se que com o uso de uma liga de plutônio fundida, impelida por sódio líquido num anel exterior, tiram-se os produtos de fissão, de modo a permitir a queima duma grande parte do combustível sem reprocessamento.

1. INTRODUÇÃO

A discussão de concepções avançadas de reatores de potência parece conveniente nesta ocasião, principalmente pelas conseqüências que resultarão quando a economia nuclear tiver se desenvolvido conforme se espera aqui no Brasil e em outras partes do mundo.

Concepções avançadas de alguns reatores que vêm sendo estudadas poderão se tornar realidade talvez dentro de dez anos, o que interessará muito a países que, como o Brasil, contam com grandes recursos de tório. Naturalmente, na fase inicial em que se encontra a indústria nuclear de reatores de potência, devem ser utilizados os tipos de reatores bem provados; assim

---

(1) Contribuição Técnica n.º 494. Apresentada ao XVII Congresso Anual da Associação Brasileira de Metais; Rio de Janeiro (GB), julho de 1962.

(2) As pesquisas realizadas e descritas neste trabalho foram em parte feitas sob os auspícios da *"Atomic Energy Comission"* dos Estados Unidos.

(3) Membro da ABM; Conselheiro da Agência Internacional de Energia Atômica junto à CNEN, Divisão de Metalurgia Nuclear, IEA, São Paulo, em licença dos *"Los Alamos Scientific Laboratory", Los Alamos,* N. M., Estados Unidos.

utilizaremos, sem dúvida, barras ou placas de ligas de urânio ou de óxido, revestidas de aço inoxidável ou ligas de alumínio ou de magnésio, resfriadas por água ou por gás.

Embora seja fora de dúvida que tais reatores representam no estado atual da tecnologia o caminho mais rápido, seguro e econômico, para a produção de energia, acredita o autor que tais reatores se baseiam em uma filosofia algo errada e que, por isso, os reatores de combustível líquido circulante, como o *"Homogeneous Reactor Experiment" de Oak Ridge,* apresentam possibilidades bem mais atraentes. Os reatores de combustível líquido circulante apresentam a possibilidade de retirada contínua ou freqüente dos venenos de fissão do combustível nuclear. Quando se visa a economia de neutrons para a regeneração do combustível (*"breeding fuel"*), não parece lógico se interpor materiais estruturais que têm sua absorção parasita própria e, além disso, mantêm os produtos venenosos indesejáveis de fissão permanentemente no caroço do reator e até uma concentração em que êsses produtos impeçam a utilização do combustível. Embora as técnicas de manipulação à distância já permitam a fabricação de elementos combustíveis com grande atividade gama residual, ainda tem-se que aprender que não é necessário purificar o urânio recirculado até uma forma final que permitir a fabricação de elementos combustíveis que possam ser manipulados, sem perigo, durante 24 horas por dia. Isso não parece mais razoável do que filtrar e tratar água para torná-la potável quando apenas ela se destinasse a impulsionar turbinas em uma usina hidrelétrica.

O modelo de reator regenerador discutido nesta contribuição é um dentre os muitos tipos de reatores do futuro. É atraente porque representa um projeto utilizável para o sistema de dois reatores, ao qual se dá atualmente grande importância nos Estados Unidos.

2. A NECESSIDADE DE REATORES REGENERADORES

O Brasil conta com enormes reservas de combustível nuclear potencial. Visto como, entretanto, a maior parte dêsses recursos são na forma de tório, que necessita prévia conversão a U^{233} para que possa entrar em reação em cadeia, o emprêgo de *reatores regeneradores* será necessário para que se possa utilizar êsse material. O urânio natural, em certas condições particulares, pode admitir uma reação em cadeia auto-suportada, mas o tório, considerado isoladamente, sòmente tem uma influência de atenuação nas reações em cadeia que ocorram num reator no qual esteja presente. De forma análoga, a utilização prática de

mais de 99% dos recursos mundiais de urânio exigem que em primeiro lugar seja transmutado em plutônio. Quando considerada apenas do ponto de vista de U^{235}, a reserva de combustível nuclear do Brasil é reduzida de um fator superior a 1.000.

A utilização de tório como material fértil depende da absorção de neutrons para causar sua transformação em U^{233} físsil:

$$Th^{232} + n \longrightarrow Th^{233} \longrightarrow Pa^{233} \longrightarrow U^{233}$$

O excesso de neutrons produzidos além dos necessários para propagar a reação em cadeia é absorvido tanto pelo tório como pelos outros materiais presentes no reator. Em um reator construído para a conversão há necessidade de reduzir-se ao mínimo o material estrutural e de revestimento do elemento combustível. Além disso é ainda menos razoável se procurar confinar os venenos de fissão no caroço. Se se puder eliminar o revestimento do combustível e retirar os produtos de fissão logo depois de se formarem, ter-se-á conseguido um grande passo para a regeneração de U^{233} numa base prática.

3. O SISTEMA DE DOIS REATORES

Se se dispuser tanto de Th como de U, a utilização ideal exigirá provàvelmente, dois reatores diferentes associados [1]. Por enquanto, tratar-se-ão tais conjuntos de uma maneira algo simplificada. O primeiro reator deve ser um reator rápido, alimentado por plutônio e produzindo U^{233} em uma zona fértil de tório ("thorium blanket"). Já que o plutônio produz número de neutrons maior na fissão rápida do que na fissão térmica, maior número de neutrons existirá por grama de plutônio, ou por megawatt-dia. Além disso, há vantagem suplementar, resultante do fato de que a secção de absorção do Th para neutrons não diminui tão ràpidamente com a energia dos neutrons como acontece com a maoria dos elementos, inclusive os produtos de fissão. Em resumo, em reator dêste tipo, produz-se maior número de neutrons, dos quais uma maior fração pode ser utilizada para a regeneração.

O segundo tipo de reator a ser utilizado em associação com o primeiro, pode ser um reator mais convencional, queimando U^{233} e produzindo plutônio a partir de uma zona fértil de urânio natural. Êsse par de reatores pode assim gerar energia utilizável, empregando sòmente urânio natural e tório como fontes de combustível, com possibilidades adicionais pela recirculação de material fértil.

Não há dúvida que o trabalho de desenvolvimento necessário para realizar êsse sistema e na verdade em qualquer sistema regenerativo será longo e difícil.

Não obstante, algumas idéias podem ser apresentadas para a solução dos problemas que decorrem do envenenamento pelos produtos de fissão e da absorção parasita. Além disso, os sistemas aqui considerados conduzirão a alta eficiência termodinâmica, bem como à possibilidade de custos de reprocessamento bastante baixos.

4. ZONA MÓVEL DE TÓRIO

Consideremos em primeiro lugar a zona fértil de tório. Já que, comparando-se com urânio, o tório tem grande estabilidade dimensional sob irradiação, as partes componentes da zona fértil de tório podem ter qualquer forma, permitindo assim resfriamento adequado. Em princípio, o revestimento individual de cada elemento pode ser eliminado, fazendo-se escoar um líquido orgânico ou metálico, comó refrigerante, através de tubulações no tório.

Para diminuir o envenenamento por produtos de fissão, sugere o autor uma alternativa: uma zona móvel para o tório. Chiotti e outros [2], no desenvolvimento de processos de separação para o ciclo de conversão de tório, mostraram que, dissolvendo-se tório em magnésio líquido, pode-se separá-lo do urânio, protoactínio e metais de transição dos produtos de fissão, deixando apenas junto com o tório os metais alcalinos e alcalinos-terrosos bem como as terras raras. A praticabilidade de caroço líquido já foi demonstrada no reator LAMPRE [3] e assim não há razão para que se conceba um reator com zona de regeneração que seja constituída por liga líquida de tório em magnésio.

Em um elemento de zona fértil contendo liga líquida de tório e magnésio a 600°C, o urânio bem como os produtos de fissão menos solúveis, se precipitam na região mais fria do recipiente. O local para a separação dessas substâncias, que têm uma influência indesejável sôbre a zona fértil, pode ser determinado pela forma de introdução do resfriador, sendo possível escolhê-lo de tal maneira que influencie pouco nas propriedades nucleares do reator. É de se esperar que os processos de difusão que tem lugar no metal líquido possam carrear os produtos de fissão a todo o recipiente. Há também a possibilidade de se movimentar a liga da zona fértil, seja interna ou externamente.

Os gases raros subirão ao topo do sistema, por serem quase insolúveis nos metais líquidos. Entretanto, o envenenamento habitual por xenônio não ocorre na região de neutrons rápidos.

Com o uso de magnésio em quantidade apreciável, seria aconselhável o emprêgo de um reator rápido para o desenvolvimento dessa concepção, pois sua absorção parasita, considerável nas energias térmicas, poderia ser mantida muito baixa desde que se mantivesse a energia dos neutrons acima de 100 Kev.

Uma primeira maneira menos complicada de operação pode ser a de irradiar uma liga sólida de magnésio-tório da zona fértil e depois fundí-la em seu recipiente. Quando o urânio, o protactínio e os metais de transição (que são produtos de fissão) tiverem se precipitado, a liga de tório pode ser decantada em um nôvo recipiente, depois fechado, e voltar à zona do reator sem reprocessamento, podendo-se, talvez, repetir esta operação muitas vêzes. Convém lembrar a êsse respeito que as técnicas de manipulação à distância de materiais com atividade gama têm evoluido muito nos últimos anos.

5. REATOR DE COMBUSTÍVEL CIRCULANTE

Considerando agora o caroço do reator, sabe-se que o combustível líquido de plutônio foi empregado durante muitos meses no reator LAMPRE. Com as suas cápsulas fechadas, entretanto, o reator LAMPRE não apresentava muitas vantagens em relação aos reatores dotados de elementos combustíveis sólidos. Êsse reator tem sido considerado mais como um reator de ensaios de materiais e que permite o estudo de reatores que empregarão combustível móvel ou recirculante.

Maior atenção tem sido dada ùltimamente ao chamado "reator de núcleo circulante" (*"dynamic core reactors"*), no qual o combustível circula através de um anel curto externo ao caroço sendo impulsionado por um jato de metal líquido imiscível com o combustível e que, ao mesmo tempo, serve como meio de transferência de calor (fig. 1). Na extremidade do anel o combustível é separado do agente resfriador por gravidade ou por centrifugação, voltando em seguida ao caroço.

Convém tornar claro que a figura 1 indica simplesmente o princípio de funcionamento de um reator de combustível circulante e que, de forma alguma, representa um projeto prático. A carga de plutônio para um reator rápido que seja econômico deve variar entre 20 e 200 kg. Se se tiver de evitar que a temperatura suba muitas centenas de graus no caroço, todo o conteúdo deve ser circulado no anel externo em alguns segundos para fornecer o calor, de modo a justificar os juros do in-

vestimento em plutônio. Os projetos dessa concepção de reator que devem ser práticos, compreendendo muitos jatos, serão divulgados mais tarde [4].

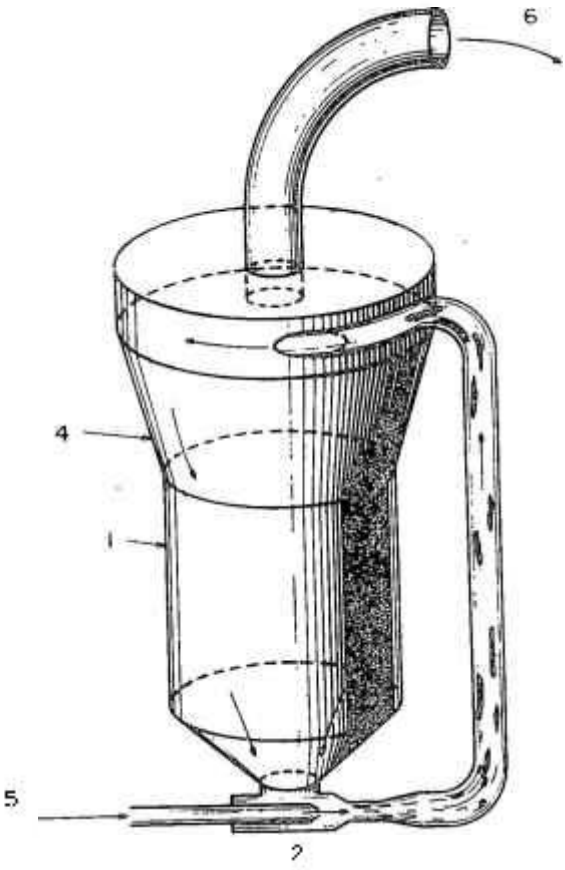

Fig. 1 — Princípio de reatores bombados a jato (1 — caroço; 2 — bomba a jato; 3 — anel de circulação; 4 — separador; 5 — entrada de sódio; 6 — saída de sódio).

Discutir-se-ão a seguir algumas das vantagens metalúrgicas principais que resultam de um íntimo contacto entre o combustível e o agente resfriador, começando pela análise de velocidade sob o qual os produtos de fissão são retirados do combustível, para indicar depois quais dentre êsses elementos são eliminados, para, e por fim, prever a influência dêsses fatôres em uma operação contínua durante longo espaço de tempo.

6. MECANISMO PROPOSTO PARA A EXTRAÇÃO DOS PRODUTOS DE FISSÃO

Embora o emprêgo de dados termodinâmicos seja precário para se avaliar o equilíbrio em sistemas metálicos complexos, e mais ainda para se estimar as velocidades de transferência de massa, o comportamento de muitos dos átomos formados na fissão pode ser previsto com razoável segurança:

As velocidades de transferência dos produtos de fissão do combustível ao agente resfriador podem ser calculadas para os casos limites, isto é, para os casos de regime turbulento e para o regime laminar. Admitiu-se que as dimensões dos filetes de liga de plutônio formados num jato de sódio fossem idênticas às que são produzidas no sistema água e mercúrio, cujas dimenhões foram medidas pelas fotografias ultra-rápidas de Humphreys, e que é semelhante do ponto de vista dinâmico [5]. Verificou-se que as velocidades de difusão de metais em metais líquidos nos casos em que não existem complexos covalentes iônicos, são sempre da mesma ordem de grandeza [6], a única possível exceção, sendo a de átomos muito leves, como os de lítio. Como base para o raciocínio, tomou-se a média dos valores dos coeficientes de difusão, da ordem de

$$D = 5 \,.\, 10^{-5} \text{ cm}^2 \,.\, \text{seg}^{-1}.$$

Tendo em vista que a fase do sódio tem maior volume, maior turbulência e menor viscosidade, a concentração de produtos de fissão na inter-face pode ser considerada desprezível. Assim, e como primeira aproximação, supôs-se que os átomos se difundissem radialmente num cilindro metálico de dimensões conhecidas, através de uma inter-face na qual a concentração é nula durante o tempo de passagem para o anel externo de troca de calor. Com a distribuição homogênea inicial a proporção de produtos de fissão extraída por cada passagem pode ser fàcilmente estimada pela segunda lei de Fick.

Verificou-se que, com a hipótese menos favorável de regime laminar, a extração dos produtos de fissão mais fàcilmente extraíveis seria completada em algumas passagens e que o resultado final quase independia do diâmetro inicial admitido e do coeficiente de difusão. Com um filete de diâmetro de 0,01 cm e com um período de extração de 0,01 seg, antes dos mesmos se juntarem para formar correntes maiores, cêrca de 30% dos átomos extraíveis eram eliminados em cada passagem. Se a duração do ciclo fôr de 1 segundo o tempo médio de permanência de um átomo extraível no combustível é de apenas cêrca de 2,5 seg.

A comparação das proporções de elementos extraídos com base nos cálculos, admitindo-se vários regimes de extração, inclusive extração ideal, com os valores de Bredig, Bronstein *et al.*[7], mostrou que as quantidades totais de materiais extraídos não dependia muito da vazão, desde que existisse uma extração contínua.

Parece que, de fato, mais importante que a vazão, é a influência dos rendimentos de fissão independente. Quando o átomo de plutônio sofre a fissão, fornece não só átomos de massas de 72 a 161, mas também produz até dez elementos diferentes que tem o mesmo pêso atômico.

Em muitos casos os elementos que têm a mesma massa desintegram-se segundo a mesma cadeia para produzir o mesmo nuclídeo estável. Não obstante, num processo que tem lugar mais ràpidamente que muitos dos períodos de desintegração em jôgo, é essencial considerar a distribuição das substâncias no longo do desenvolvimento da cadeia, quando produzidas inicialmente. Por exemplo, se se considerar a cadeia correspondente ao número de massa 96, que ocorre em proporção elevada, deve ela fornecer uma parcela apreciável de todos os outros elementos entre rubídio e nióbio. O rubídio e o estrôncio podem ser extraídos por sódio, mas o ítrio e seus descendentes não. Quer o rúbidio e o estrôncio se desintegrem em ítrio quer sejam extraídos, êsse comportamento pode ser estimado por meios estatísticos, a partir das velocidades dos processos de remoção superpostos. Os átomos que são produzidos imediatamente como ítrio, não poderão contudo ser removidos.

Infelizmente, não existem dados para fissão rápida de plutônio. Existem, entretanto, processos para o cálculo, baseados nos valores determinados para o U^{235}, bem como os estudos teóricos de Pappas[8] e Wahl[9]. Foi traçado um gráfico dos produtos calculados isoladamente que serviu para os cálculos ulteriores.

Para êste estudo, o combustível escolhido foi uma liga de baixo ponto de fusão constituída de 7,5% de Pu, 25% Co e 67,5% Ce (em todos os casos foram sempre adotadas percentagens atômicas, não percentagens em pêso). Êste sistema ternário apresenta interêsse particular, porque ligas com ponto de fusão inferior a 450°C podem ser preparadas a partir dos três elementos e para qualquer concentração de plutônio até 92%[10], o que permite uma grande liberdade de projeto para o reator.

Considerando qualquer combustível neste sistema, e tendo o sódio como seu agente resfriador, existem dados de diagramas de equilíbrio e termodinâmicos para prever quais os produtos de fissão que se distribuirão no combustível, e quais os que irão para o agente resfriador.

Os metais alcalinos e alcalinos-terrosos são muito solúveis em sódio líquido e insolúveis em metais densos. Os halogênios formam compostos mais estáveis com sódio do que com os metais densos; além disso, a grande solubilidade dêsses compostos no sódio líquido fornece uma indicação suplementar de que o iôdo e o bromo serão extraídos pelo agente resfriador.

Os gases nobres deverão também ser extraídos, porque serão mais solúveis no sódio do que no combustível líquido; em qualquer caso ocuparão a parte superior do sistema, subindo em bôlhas pelo sódio.

Os metais de transição, como o cobalto, têm forte tendência de formação de compostos com outros metais. Muitos dêsses metais produzidos por fissão dão lugar a compostos estáveis com plutônio, cério ou cobalto e assim estarão presentes na fase combustível até atingir a saturação, estado que deve ser evitado durante a operação. Admite-se conservadoramente que tais elementos como telúrio, para os quais os dados são ainda precários, fiquem no combustível. A contribuição volumétrica da totalidade dêsses produtos de fissão é relativamente insignificante.

As terras raras são tôdas solúveis no constituinte principal, cério; pode-se, por isso, supor que as que venham a ser produzidas na fissão permaneçam em solução no combustível.

O molibdênio e zircônio apresentam solubilidade limitada no plutônio, e o comportamento do nióbio é provàvelmente análogo. Visto como a solubilidade dêsses elementos em sódio é pràticamente nula, pode-se admitir que permanecerão no combustível até que atinjam concentração de 1%, a partir da qual se precipitarão como compostos intermetálicos. Concluindo, os metais alcalinos, os alcalinos-terrosos, os halogênios e os gases nobres serão removidos rápidamente pelo sódio, enquanto que todos os demais elementos permanecerão no combustível líquido.

7. CONSEQÜÊNCIAS DE OPERAÇÃO CONTÍNUA

Os resultados de extração das impurezas no caroço de um reator do tipo descrito comparados com os que se teria num reator de tipo usual estão apresentados na tabela I; no reator de tipo usual os produtos de fissão são retidos no elemento combustível e no tipo proposto cada nuclídeo que pode ser eliminado por sódio e retirado do circuito. Parece assim que o modêlo proposto aproxima-se muito mais de um reator ideal do que aqueles cujos elementos combustíveis são fechados. É particularmente notável a diminuição da quantidade de gases inertes gerados no combustível, o que diminui o perigo resultante da instabilidade de operação decorrente da formação de bôlhas.

Esta diminuição é pevida principalmente a remoção de iôdo antes de se desintegrar em xenônio.

TABELA I

Distribuição dos átomos dos produtos de fissão com várias velocidades de extração

Vida média de um átomo no combustível (seg)	Extraíveis por sódio	Gases	Solúveis no combustível	Provàvelmente precipitáveis
∞	16%	12 %	52%	20%
780	36%	3,8%	44%	16%
19	42%	0,9%	42%	14%
2,5	43%	0,5%	42%	14%
0	49%	0,5%	42%	9

No processo de operação para extração de calor, mostrou-se que 43% dos produtos de fissão são removidos do caroço, onde, tanto pelo envenenamento como pela diluição, poderiam influenciar desfavoràvelmente no funcionamento do reator.

Quando se considera os volumes atômicos dos elementos a vantagem é ainda acentuada, porque 65% em volume dos produtos de fissão vão para a fase do agente resfriador. Os volumes atômicos empregados foram referidos à fase líquida, considerando-se os gases como nela dissolvidos. Se se considerar as bôlhas gasosas, essas ocuparão volumes algumas centenas de vêzes maiores.

A consideração dos volumes dos produtos de fissão extraídos do caroço dos reatores é importante porque o comportamento de um reator rápido líquido é limitado pela diluição e não pelo envenenamento; devido a esta circunstância porcentagens de queima muito maiores que as usuais, limitadas a alguns porcentos, podem ser consideradas.

Considere-se, por exemplo, o efeito do consumo de tôda a carga original de plutônio, mantendo-se a criticalidade à custa de novas adições de plutônio. Foram feitos cálculos de criticalidade para o caso do caroço de plutônio circulante admitindo uma estrutura razoável, mas com o emprêgo de uma zona fértil de UO_2 empobrecido em mistura pastosa ("slurry") com sódio. Conseguiu-se muito mais tarde o desenvolvimento da idéia da

zona fértil de tório dissolvido em magnésio; ainda não houve oportunidade para se fazer os cálculos críticos de grupos múltiplos para o nôvo conjunto.

Conforme se mostra na tabela II, depois de ter sido consumida tôda carga inicial de plutônio, o envenenamento do caroço resultante dos produtos de fissão — metais de transição, terras raras e metais raros que não tenham sido carreados pelo sódio — atingiu sòmente 8%, isto é, 8 neutrons são absorvidos por produtos de fissão para cada 92 neutrons absorvidos pelo plutônio. Há naturalmente uma sensível diminuição na relação de regeneração; êsse dado é contudo apenas ilustrativo, porquanto êle não se refere à zona fértil que interessa. O que é mais interessante é, entretanto, que o reator pode continuar a funcionar eficientemente, a despeito da acumulação de produtos de fissão, bastando para tal um aumento de 3% na massa de plutônio, sendo muito limitada a alteração da composição do combustível.

TABELA II

Efeito de queima extrema nas propriedades de um combustível de plutônio líquido

	Inicial	Depois de 100% de queima
Concentração de plutônio	1,00 g/cm³	1,03 g/cm³
Envenenamento no caroço	0 %	8 %
Razão de conversão	1,23%	1,18%
Composição, átomos por cento:		
plutônio	7,50%	7,58%
cério	67,5 %	61,6 %
cobalto	25,0 %	22,8 %
produtos de fissão	0,0 %	8,0 %

Se se levar em conta os volumes dos átomos de produtos de fissão que se acumulam, a adição de 103% do plutônio utilizado inicialmente causa um aumento de volume de combustível de 7%. Isso significa, de fato, que o combustível deve poder expandir-se em alguma região menos crítica do reator, ou que se deva retirar porção correspondente do combustível para ser reprocessado. Assim, a adição efetiva do plutônio necessário

para manter a operação para utilização integral (100% de queima) corresponde a 110% da massa inicial.

De qualquer modo, a duração da operação é muito maior do que os índices de queima de 2% a 10% considerados como desejáveis nos reatores de potência convencionais. Com densidade de potência econômica de 500 w/g, 100% de queima corresponde a 8 anos de operação contínua para o modelo proposto. É naturalmente provável que, seja por razões de economia de neutrons ou por outras razões, possa ser conveniente descarregar o reator para recarregá-lo com carga nova em períodos mais curtos.

8. CONCLUSÕES

Apresentou-se um estudo sôbre zona fértil e constituição de caroço para um reator nuclear alimentado por plutônio líquido destinado à conversão de tório em urânio-233. Examinaram-se as principais vantagens, tanto sob o ponto de vista metalúrgico, como quanto à economia de neutrons, de combustível recirculado em contacto com o agente refriador. Em trabalhos subsequentes examinar-se-ão as vantagens econômicas, ainda mais acentuadas. A facilidade de manipulação e os baixos custos de reprocessamento, juntamente com a eliminação dos custos de fabricação de elementos combustíveis, constituem vantagens inerentes de reator no qual tanto a zona fértil como o combustível são líquidos, ou que possam sef fàcilmente fundidos.

A manipulação de sódio, que anteriormente constituia um problema, é atualmente uma operação de rotina bem conhecida. O desenvolvimento do reator LAMPRE forneceu todos os dados fundamentais relativos à manipulação de plutônio líquido, embora exista campo para maiores aperfeiçoamentos. Provàvelmente será ainda necessário maior trabalho de desenvolvimento para o magnésio líquido, para que êste possa ser manipulado tão fàcilmente quanto o sódio, a despeito de sua maior pressão de vapor.

Embora sejam consideráveis os problemas metalúrgicos relacionados com os reatores de alta temperatura e que empregam metais líquidos, vêm êles sendo resolvidos paulatinamente. A solução dêsses problemas deve continuar a ser procurada, pela grande eficiência que resultará da utilização do combustível nuclear nessa nova concepção.

A elaboração desta contribuição foi possível pelos conselhos e sugestões de J. R. Humphreys Jr., R. P. Hammond, F. T. Miles e H. M. Busey.Os cálculos relativos à críticalidade foram

efetuados por G. L. Ragan e G. P. Ford auxiliou no cálculo dos rendimentos de produtos de fissão. O autor registra também a colaboração de T. D. de Souza Santos na adaptação do texto à versão em português.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. PARKER, H. M. e McEWEN, L. H. — *"Progress in Plutonium Recycle Research and Development"*, HW-66.119 (15 outubro 1959). Veja também *"Plutonium Recycle Program Annual Reports, FY 1959 and FY 1960"*, HW-62.000 e HW-67.000.

2. CHIOTTI, P. e VOIGHT, A. F. — *"Pyrometallurgical Processing"*, em Progress in Nuclear Energy Series III, vol. 3 — Process Chemistry, págs. 340-354.

3. RAGAN, G. L. e CARMICHAEL, B. M. — *"Some effects peculiar to the liquid metal fuel of LAMPRE I"*. Trans. Amer. Nucl. Soc., 4-2, 1961.

4. HAMMOND, R. P. e HUMPHREYS, J. R., Jr. — a ser publicado.

5. HUMPHREYS, J. R., Jr. — comunicação pessoal.

6. SHERBY, O. D. e SIMNAD, M. T. — *"Prediction of atomic mobility in metallic systems"*. DMS Report N.º 61-1, Stanford University (1.º de fevereiro de 1961).

7. BREDIG, M. A. e BRONSTEIN, H. R. — J. Phys. Chem. 64:64, 1960.

8. PAPPAS, A. V. — *Proc. Intern. Conf. Peaceful Uses of Atomic Energy*, Geneva, 1955; vol. 7, págs. 19-26, Nações Unidas, 1956.

9. WAHL, A. C. — J. Inorg. Nucl. Chem., 6:275, 1958.

10. ELLINGER, F. H. — comunicação pessoal.

———☆———