

REATOR NUCLEAR RÁPIDO DE ALTÍSSIMA TEMPERATURA PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO NO BRASIL

JAMIL A. DO NASCIMENTO⁽¹⁾
SHIZUCA ONO⁽¹⁾
LAMARTINE N. F. GUIMARÃES⁽¹⁾

⁽¹⁾ Instituto de Estudos Avançados (IEAv), São José dos Campos, São Paulo, Brasil

RESUMO

Nos reatores de IV geração (GEN-IV), em fase de desenvolvimento para uso após 2030, predomina a tecnologia de reatores rápidos com altas temperaturas de saída para melhorar a eficiência de conversão termo elétrica e possibilitar aplicações do calor gerado em processos industriais. Atualmente, são estudados a eletrólise da água e processos termoquímicos em altíssimas temperaturas para produção de hidrogênio em larga escala e por longo tempo, no futuro. Com a possível escassez e alta do preço do petróleo e do aquecimento global, esta aplicação pode ter um papel importante na mudança da matriz energética mundial. Neste contexto, é proposto um conceito de reator rápido de altíssima temperatura de saída, ~ 1000 °C. O reator operará com ciclo de combustível fechado, será refrigerado por chumbo e carregado com combustível nitreto. Ele poderá ser usado para produção de hidrogênio, calor e energia elétrica no Brasil. É discutida uma estratégia para o desenvolvimento das tecnologias necessárias e são comentados alguns problemas importantes. O conceito proposto apresenta características que satisfazem os requisitos da IV geração de reatores.

ABSTRACT

The main nuclear reactors technology for the Generation IV, on development phase for utilization after 2030, is the fast reactor type with high temperature output to improve the efficiency of the thermo-electric conversion process and to enable applications of the generated heat in industrial process. Currently, water electrolysis and thermo chemical cycles using very high temperature are studied for large scale and long-term hydrogen production, in the future. With the possible oil scarcity and price rise, and the global warming, this application can play an important role in the changes of the world energy matrix. In this context, it is proposed a fast reactor with very high output temperature, ~ 1000 °C. This reactor will have a closed fuel cycle; it will be cooled by lead and loaded with nitride fuel. This reactor may be used for hydrogen, heat and electricity production in Brazil. It is discussed a development strategy of the necessary technologies and some important problems are commented. The proposed concept presents characteristics that meet the requirements of the Generation IV reactor class.

PALAVRAS CHAVE

Reator rápido; hidrogênio; alta temperatura, refrigerante chumbo, combustível nitreto.

1. INTRODUÇÃO

Os primeiros anos deste século têm mostrado que o crescimento da demanda de energia devido ao crescimento populacional, da economia mundial, e da melhoria do nível de vida da população de países como Rússia, Índia, China, etc. estão levando a uma escassez de fontes primárias como petróleo e gás. Mudanças climáticas acentuadas, em várias partes do mundo, como a

¹ Correspondência deverá ser enviada a Jamil A. do Nascimento:
Tel.: (12) 3947-5486; fax: (12) 3944-1177; e-mail: jamil@ieav.cta.br

ocorrência de furações no sul do Brasil, têm sido associadas ao efeito estufa. Embora este efeito não seja unanimidade na comunidade científica mundial.

Já há uma clara pressão de demanda em uma série de fontes de energia: petróleo, gás natural e combustível líquido para transporte, para o qual o mundo não está totalmente preparado. A partir de 2007 os preços do petróleo e do gás natural têm batido recordes sucessivos. Estes aumentos não parecem estar tendendo a um patamar de estabilidade. Este panorama sugere que a crise principal é o fornecimento seguro de energia, nas várias formas utilizadas em várias atividades humanas. Alguns autores pregam que há uma revolução em curso, que nossa sociedade passará da economia do petróleo para a economia do hidrogênio nas próximas décadas.

O Brasil não está imune aos problemas mencionados. Deve-se considerar, no entanto, que ele está em condição privilegiada e pode contribuir para as soluções. Há terra abundante para produção de alimentos e bio-combustíveis baseados na cana e oleoginosas; energias alternativas como solar e eólica podem ser utilizadas em localidades isoladas, com potencial de expansão para outras regiões; a energia nuclear já responde por ~3 % da produção de eletricidade, com tendência de aumento; as recentes descobertas de gás, e petróleo em águas profundas, pela Petrobras, garantirão a estabilidade no fornecimento do principal insumo atual para o bem estar e desenvolvimento do povo brasileiro. Esta situação assegurará ao País o tempo necessário para desenvolver uma fonte para geração de energia que tenha flexibilidade para fornecê-la em várias formas. Neste panorama, a fonte nuclear é uma candidata natural visto que é tecnologicamente provada para gerar energia em escala razoavelmente grande, por longo prazo e suficientemente versátil para disponibilizá-la na forma adequada para várias aplicações. Porém, mesmo esta somente não será capaz de solucionar a crise em curso, todas as fontes disponíveis terão que ser utilizadas de maneira coordenada e racional.

Atualmente a maior parte do hidrogênio produzido no mundo utiliza o processo que usa gás natural (metano) e água, reforma do metano, para gerar H_2 e CO_2 . A liberação do dióxido de carbono, o vilão do possível aquecimento global é a maior preocupação. A utilização da energia nuclear para produção de hidrogênio também vem ao encontro das aspirações da comunidade mundial de diminuir as emissões de CO_2 a fim de amenizar o efeito estufa.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é apresentar um conceito de reator nuclear rápido de altíssima temperatura, refrigerado por chumbo, para ser usado no futuro, após 2040, com versatilidade para gerar eletricidade e calor para processos industriais e usos gerais, inclusive produção de hidrogênio em larga escala. Na Seção 3 é racionalizada a escolha do reator rápido para estes fins e são comentados alguns processos para obtenção de H_2 usando alta temperatura. Na Seção 4 é apresentada a concepção para um reator rápido com altíssima temperatura de saída e esboçada uma estratégia para desenvolver sua tecnologia. São comentados, também sucintamente, alguns problemas. Por fim, na Seção 5 é feita a conclusão.

3. REATOR RÁPIDO E HIDROGÊNIO

Em 2000 o Departamento de Energia americano coordenou a criação do “Gen IV International Forum (GIF)” [1] para avaliar e propor conceitos emergentes de reatores e estabelecer um programa de desenvolvimento, com utilização prevista para após 2030. Em 2001, a comunidade nuclear mundial foi convocada a submeter conceitos de reatores que satisfizessem os objetivos estabelecidos pelo fórum, onde estão incluídos [2]:

- r1- utilização eficiente dos recursos naturais;
- r2- segurança baseada, principalmente, em processos inerentes e sistemas passivos;
- r3- gerenciamento adequado dos rejeitos radioativos;
- r4- resistência à proliferação;
- r5- competitividade econômica com outras fontes;
- r6- sustentabilidade; e
- r7- aceitação pública.

Nesta consulta, foram enviados mais de cem conceitos, que cobriam os tipos de reatores estudados à época. Nascimento e Santos [3] propuseram o “Integral Lead Reactor - ILR”, refrigerado por chumbo, com ciclo de combustível integrado ao sítio do reator. Neste esquema o reator é iniciado com urânio enriquecido e só sai do sítio rejeitos de alta atividade na forma adequada para disposição final; o reprocessamento é feito no local. Após uma avaliação criteriosa feita pelos comitês de avaliação, foram estabelecidos seis tipos de reatores [2], mostrados na Tabela 1, que englobavam as melhores características dos reatores propostos. As características do ILR foram consideradas para compor a classe do LFR (“Lead Fast Reactor”).

Tabela 1: Reatores definidos pelo GIF

Conceito	Comb.	Refr.	T _{saída} (°C)	P (MPa)	Ciclo	Aplicação
GFR	Carbeto	He	800-850	7-14	fechado	Eletr., H ₂
LFR	metal/cer.	Pb/Bi, Pb	550-800	0,1	fechado	Eletr., H ₂
MSR	Sal	Sal fundido	700-800	0,1	fechado	Eletr., H ₂
SFR	óxido/metal	Na	550	0,1	fechado	Eletr.
SCWR	óxido	H ₂ O	510-550	25	aberto	Eletr.
VHTR	óxido	He	1000	7-14		Eletr., H ₂

Esta tabela mostra que três reatores são rápidos: GFR, LFR e SFR, um é epitérmico (MSR), um térmico (VHTR) e um térmico ou rápido (SCWR). Os conceitos visam a geração elétrica e aplicações industriais. Todos apresentam temperaturas de saída maiores que nos reatores atuais o que possibilita o uso de ciclo a gás (Brayton) na conversão termo/elétrica e aumento no leque de aplicações industriais da alta temperatura.

Vários processos industriais requerem temperaturas elevadas para sua realização. A Tabela 2 é um exemplo de processos e temperaturas requeridas.

Tabela 2: Processos industriais e temperaturas necessárias

Temperaturas para alguns processos	> 700 °C	700 a 900 °C	900 a 1000 °C
Produção de eletricidade	Ciclo Rankine (vapor)	Ciclo Brayton (gás)	
Aplicações gerais	Desalinização da água do mar.	Produção de H ₂ a partir do gás metano	Produção termoquímica de H ₂
Indústria química e do petróleo	Produção de óleo pesado a partir do xisto e de óleo pesado sintético (Syncrude).	Produção de gás sintético para amônia e metanol	Produção termoquímica de H ₂

A ênfase do GIF no reator rápido é devida, principalmente, aos requisitos r1, r3, r6 e r7. O espectro rápido possibilita regenerar combustível com uma taxa de conversão e regeneração >1. Uma taxa de conversão ~1 permite projetar núcleos com vida longa, tempo de recarregamento de combustível > 10 anos. A regeneração e a conversão >1 implica que o sistema é sustentável por longo tempo (r6). Consequentemente, os recursos de urânio poderão ser gerenciados mais adequadamente: considerando uma dada necessidade de potência instalada, este tipo de reator requererá uma menor mineração de urânio, visto que ele poderá gerar mais combustível do que consome; por outro lado, a mesma reserva de urânio possibilitará um parque gerador maior, por longo tempo. Estes aspectos podem ser observados na Figura 1 que mostra uma estimativa do potencial de utilização da atual reserva brasileira de urânio, 309 000 t U₃O₈ [4], em um parque constituído de somente PWR, do tipo ANGRA-II – 1350 MWe, ou de ILR refrigerado por chumbo

ou, ainda, de um parque misto de PWR e ILR. Claramente a tecnologia do reator rápido, associada ou não a PWR, permite uma utilização mais eficiente das reservas de urânio.

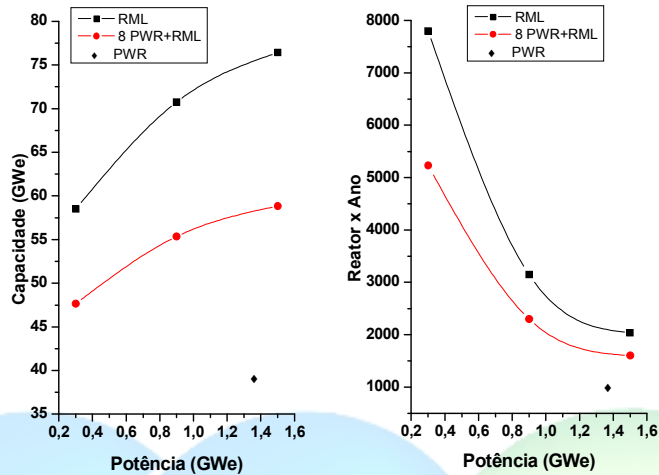


Figura 1. Estimativa da utilização da reserva brasileira de urânio em PWR e RML

No IRL todas as instalações do ciclo do combustível: enriquecimento, fabricação, reator, reprocessamento e tratamento de rejeitos ficam no mesmo sítio. Só entra urânio enriquecido para as cargas iniciais até a regeneração gerar o material necessário para os ciclos remanescentes e só sai do sítio rejeitos adequadamente condicionados para a disposição final. Neste esquema a circulação de material sensível fica restrita ao local, isto resulta em uma boa segurança contra desvios. Além disso, o tipo de reprocessamento usado separa, conjuntamente, plutônio e actínidos menores o que o torna o material recuperado impróprio para outros usos e impossível o seu desvio. Estas características atendem adequadamente os requisitos r4 e r7.

O IRL também tem potencialidade para ser um sistema radiologicamente limpo, resultado do esquema de partição/transmutação escolhido: reciclagem via seca, piroprocesso, que recupera os elementos transurânicos (TRUs) com alta eficiência (>0.999) [5] e estes, por sua vez, retornam ao núcleo para serem queimados. A Tabela 3 apresenta a razão entre as seções de choque de captura e fissão (σ_c/σ_f) de isótopos importantes presentes no combustível queimado e que são considerados rejeitos de alta atividade no sistema sem reciclagem; uma razão maior que 1 significa um acúmulo do isótopo. No espectro rápido os TRUs são combustíveis enquanto no espectro térmico a sua reciclagem é limitada. Por conseqüência, o gerenciamento do rejeito de alta atividade será facilitado visto que a necessidade de armazenamento será diminuída de milhões para algumas centenas de anos. Então, o risco de contaminação do meio ambiente por rejeito radioativo será menor e a aceitação pública poderá ser mais favorável.

Tabela 3. Razão σ_c/σ_f para alguns TRUs em diferentes reatores (adaptado da Ref. 6)

Reator	PWR	LMFBR	LCR
²³⁷ Np	61,7	3,67	0,42
²³⁸ Pu	14,1	0,58	0,14
²⁴⁰ Pu	179	1,14	0,14
²⁴² Pu	62,1	1,29	0,16
²⁴¹ Am	94,5	3,83	0,51
²⁴⁴ Cm	15,9	1,61	0,21

O reator rápido refrigerado por chumbo foi primeiramente proposto pelos russos em meados da década de 80 [7]. Esta proposta foi baseada na experiência russa adquirida com o uso de reatores refrigerados por chumbo/bismuto em submarinos nucleares. No início dos anos 90 renovou-se o interesse por conceito híbrido acelerador/reator para produção de energia ou redução dos problemas com o rejeito de alta atividade [8]. O uso do chumbo nestes sistemas deve-se às suas

boas propriedades térmicas e alta produção de nêutrons pela reação de “spallation” com prótons com energias da ordem de 1 GeV.

Atualmente, o chumbo é uma alternativa ao sódio [2] como refrigerante do reator rápido. Ele melhora a segurança e os custos destes reatores. Seu alto ponto de ebulição, 1740 °C permite imaginar aplicações do ILR em áreas que utilizam energia intensivamente, como fonte de calor para processos industriais e propulsão marítima [9; 10].

As conclusões do GIF indicam que os reatores avançados para produção de energia elétrica terão temperaturas de saída maiores que as atuais. No caso do reator rápido refrigerado por sódio a temperatura de saída fica limitada pela temperatura de ebulição deste elemento, 883 °C. Conseqüentemente, as aplicações em processos industriais de altíssimas temperaturas, ~1000 °C, como as requeridas por eficientes processos de geração de hidrogênio, ficam inviabilizadas.

Reatores de alta temperatura (HTGR) são pesquisados no mundo desde os anos 50. Na década seguinte os primeiros reatores deste tipo entraram em operação: Dragon no Reino Unido e Peach-Bottom nos EUA. A crise do petróleo em 1973 aumentou o interesse mundial neste reator, dada a sua possibilidade de utilização em processos de obtenção de petróleo a partir de xisto ou areia impregnada de óleo. É desta época os primeiros trabalhos que mencionam a utilização deste reator para produção de hidrogênio em larga escala, inclusive no Brasil [11]. Nos anos 80 e 90 o interesse no HTGR seguiu a tendência mundial de declínio da energia nuclear, os programas americano, inglês, francês e alemão foram encerrados. O desenvolvimento deste reator continuou na Ásia com os projetos HTTR no Japão e HTR-10 na China. A empresa sul-africana ESKOM comprou a tecnologia PBMR (“Pebble Bed Modular Reactor”) desenvolvida pelos alemães e, atualmente, busca fundos para construir um demonstrador na África do Sul. A Tabela 4 mostra os principais reatores de alta temperatura construídos e alguns dados relevantes, todos eles são reatores térmicos refrigerados por hélio.

O reator rápido a gás também já foi estudado nos EUA, França e Reino Unido, nas décadas de 60 e 70. Projetos detalhados foram realizados mas, pelos mesmos motivos citados anteriormente, nenhum reator foi construído, visto a sua inferioridade em segurança, relativamente ao reator refrigerado por sódio. Atualmente, renasceu o interesse neste tipo de reator para geração de eletricidade via ciclo Brayton e para produção de hidrogênio.

Tabela 4: Reatores de alta temperatura construídos até 2008

Reator	Dragon	Peach-Bottom	AVR	Fort-St-Vrain	THTR300	HTTR	HTR-10
País	Reino Unido	EUA	Alemanha	EUA	Alemanha	Japão	China
Criticalidade	1964	1966	1966	1974	1983	1998	2001
Última operação	1975	1974	1988	1989	1989		
Potência MW _t	20	115,5	46	842	750	30	10
Temperatura saída (°C)	835	715	850	785	750	850-950	700-900
Elemento Combustível	Bloco grafite	Bloco grafite	Bolas grafite	Bloco grafite	Bolas grafite	Bloco grafite	Bolas grafite
Combustível		U-Th	²³⁵ U-Th	²³⁵ U-Th	²³⁵ U-Th	²³⁵ U- ²³⁸ U	²³⁵ U- ²³⁸ U

A diferença de projeto entre reatores rápidos refrigerados por gás (RRG) ou metal líquido tem origem, principalmente, nas diferenças entre as propriedades termo físicas destes refrigerantes. As propriedades térmicas do He são muito inferiores, ordens de grandeza, as do metal líquido. Esta diferença impacta todo o projeto do sistema primário do reator. Para melhorar a remoção de

calor o circuito a gás necessita trabalhar com alta pressão e canais de refrigeração, relativamente, largos e a potência de bombeamento necessária é grande. Neste reator dois acidentes, o de perda de vazão e o de despressurização, requerem um projeto de circuito primário resistente as suas conseqüências. No acidente de perda de vazão com desligamento do reator, o calor de decaimento no núcleo precisa ser retirado, o que complica o projeto. Já o IRL trabalha com pressão, aproximadamente, atmosférica no primário, a circulação natural é uma possibilidade concreta e, caso haja circulação forçada, a sua perda pode não ter impacto significativo visto que o metal líquido somente consegue retirar o calor de decaimento sem comprometer a integridade do combustível, há uma grande inércia térmica neste caso. Esta situação satisfaz melhor os objetivos para os reatores da próxima geração. Além disso, para uma mesma potência, o RRG tem dimensões maiores que o ILR, e isto é uma desvantagem visto que os aspectos de fabricação e transporte penalizarão este conceito. Unidades compactas e transportáveis para potências significativas, centenas de MWe, são penalizadas nestas questões.

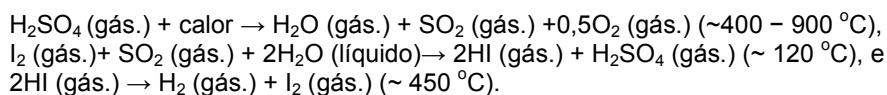
3.1. PRODUÇÃO DE H₂

O hidrogênio vem sendo produzido no mundo por mais de um século por meio de vários processos. Todos eles utilizam água, ou outro composto químico rico em hidrogênio, e energia em alguma de suas formas. Atualmente, o processo denominado reforma do gás natural ($\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$, $T \sim 700^\circ\text{C}$) produz 95 % do H₂ consumido no mundo. Neste processo a fonte de calor utilizada é o próprio gás com liberação de CO₂ na atmosfera [12]. Se a fonte de calor for de origem nuclear a liberação de CO₂ diminuirá drasticamente.

A eletrólise em si é um processo eficiente de produção de H₂, porém, a eficiência do sistema gerador da eletricidade, normalmente, é baixa, da ordem de 30 %, o que resulta em uma eficiência final da ordem de 25 %, neste processo. No Brasil, a utilização de hidroeletricidade, fora do horário do pico de demanda, pode ser uma alternativa para produzir H₂; ele pode ser armazenado e utilizado no horário de pico para gerar eletricidade e dar estabilidade à rede. Esta alternativa precisa ser considerada em um cenário de escassez de água doce, onde a própria água terá aplicações mais nobres, como irrigação, e o seu valor social e econômico aumentado.

No longo prazo, os dois processos citados anteriormente, eletrólise em alta temperatura e os ciclos termoquímicos, assistidos por fonte externa de calor, são considerados os mais promissores para produção de hidrogênio em larga escala [13].

Ciclos termoquímicos vêm sendo pesquisados há algumas décadas. O processo básico usado é a dissociação da água utilizando calor e reações químicas. Os reagentes químicos são recicláveis e não deixam o ciclo, a alimentação é somente de água e os produtos são hidrogênio e oxigênio. Para estas reações e temperaturas no intervalo 700-1000 °C a eficiência esperada do processo está no intervalo 40-50 % [12]. O resultado líquido destes esquemas pode ser considerado como: $2\text{H}_2\text{O} + \text{calor} \leftrightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$. Embora mais de uma centena de ciclos tenham sido estudados os esquemas mais promissores pesquisado atualmente são: o processo ácido sulfúrico-iodo (IS) e o ciclo UT-3 [13] que envolve reações com cálcio e bromo. Os japoneses já demonstraram em escala de laboratório a viabilidade do esquema IS com produção de 30 litros/h e programam a demonstração de escala industrial usando o calor do HTTR que está em operação. O esquema IS é apresentado em seguida:



A eletrólise em alta temperatura é um processo atrativo, utilizando somente vapor, calor e eletricidade. O processo consiste em quebrar a molécula de água usando temperaturas entre 700 e 1000 °C. Este processo apresenta três vantagens [13] sobre a eletrólise convencional: menor necessidade de energia dada a cinética das reações em alta temperatura; permite operações com altas densidades de corrente resultando em alta capacidade de produção em um volume pequeno (compacto); e nos custos, visto que utiliza uma significativa fração da energia na forma de calor que tem custo menor que a eletricidade.

Pelo exposto fica evidente que em uma sociedade com grande demanda por hidrogênio há a necessidade de se disponibilizar uma fonte de energia para produção de hidrogênio em larga escala. O reator nuclear rápido de altíssima temperatura é um candidato a ser esta fonte porque apresenta todas as características requeridas: alta densidade de energia; temperaturas de saída no intervalo necessário; eficiente utilização dos recursos de urânio; adequado gerenciamento dos rejeitos de alta atividade; possibilita um parque gerador com potencia razoável no Brasil, ver Figura 1, e maior que aquele com os reatores térmicos somente, por longo tempo; podem ser projetadas unidades de grande e pequeno porte, etc. Além disso, uma geração de energia e produção de H₂, descentralizadas (local), possibilita gerenciar adequadamente uma rede de abastecimento, atender regiões de difícil acesso, isto resultará em menores custos.

4. REATOR RÁPIDO DE ALTÍSSIMA TEMPERATURA

O conceito aqui proposto é uma evolução dos estudos feitos anteriormente [14] para o ILR. Este último, por sua vez, é uma associação da melhores características do IFR desenvolvido nos EUA e do LCR na Rússia. Na primeira concepção para o ILR o combustível inicial é o U-10%Zr que após várias reciclagens passa a ser o U-TRU-Zr, o refrigerante é o chumbo. Com estas características a temperatura projetada do refrigerante na saída do núcleo é ~550 °C, uma temperatura muito inferior aquelas requeridas pelos processos de produção de hidrogênio mencionados anteriormente.

O que se propõe atualmente é substituir o combustível metálico do ILR pelo nitreto e utilizar materiais estruturais que suportem as condições de operação: alta temperatura e radiação intensa, por longo tempo sem comprometimento de suas funções estruturais. O refrigerante principal é o chumbo com participação do hélio. Com estas mudanças, em princípio, as temperaturas requeridas nos processos industriais mencionados serão possíveis de serem obtidas na saída do núcleo. No entanto, isto só será possível no longo prazo e após um grande esforço de P&D. Com o sucesso da iniciativa, o País estaria em condições de entrar no que tem sido propalado ser a era do hidrogênio. Nos EUA foi proposto um conceito similar com temperatura de saída de ~ 800 °C e trocador de calor Pb/He convencional, tubos em U [15].

O reator rápido proposto é iniciado com urânio enriquecido e passa paulatinamente para o combustível U-TRU-N. O TRU contém todos os transurânicos recuperados no reprocessamento. Em um parque de reatores estabelecidos só será necessário urânio enriquecido para iniciar um reator novo. Com um projeto adequado de núcleo poderá ser obtido combustível para outro reator além daquele em operação, permitindo o crescimento do parque gerador, sem a necessidade de urânio. Os materiais candidatos para as estruturas internas do circuito primário são os metais refratários, superligas, ligas com alto teor de cromo, ligas com óxidos dispersos, etc.

O sistema primário do reator é do tipo piscina com todos os equipamentos inseridos dentro da piscina. O vaso da piscina é construído com parede dupla, com gás entre as paredes. No caso de parada normal ou acidental do reator, o calor de decaimento passa pelas estruturas até atingir a parede externa da piscina, que é refrigerada por ar. A piscina é constituída de uma parte "fria" e uma parte quente, separadas por uma cuba interna. O núcleo do reator é inserido dentro da cuba interna, piscina quente. O núcleo é projetado para reatividade mínima [14] tal que o acidente TOP seja amenizado. Os sistemas de controle de reatividade são redundantes. Dependendo da potência, o núcleo pode ser do tipo pilha, após a queima por longo tempo, ele é retirado do reator e substituído por um núcleo novo. Este tipo de reator é particularmente atrativo para ser usado em regiões que não estão inseridas na rede elétrica nacional e de difícil acesso, como na Amazônia brasileira.

A circulação do refrigerante é como segue: o chumbo, a ~500–600 °C, entra pela parte de baixo da piscina quente e passa pelo núcleo aquecendo-se até ~1000 °C. Acima do núcleo é colocado um dispositivo para inserir He que em contacto direto com o chumbo retirará o calor acumulado. Neste esquema não há trocador de calor convencional, como no conceito especificado na referência [15]. A partir deste ponto há variantes a serem exploradas. O He poderá ser usado para produzir hidrogênio, eletricidade usando turbina a gás (Brayton), ou ambos. O chumbo ainda

quente poderá ser usado para produção de energia elétrica, via trocador de calor convencional usando ciclo de vapor, ou via magnetohidrodinâmica (MHD). Estas alternativas precisam ser mais bem pesquisadas e avaliadas. A inserção de He na piscina quente melhorará a circulação natural e há a possibilidade, para um projeto adequado de núcleo, que não seja necessária circulação forçada no primário. A Figura 2 apresenta um esboço do sistema primário do reator e algumas características. A potência do núcleo pode ir de dezenas até centenas de MWe.

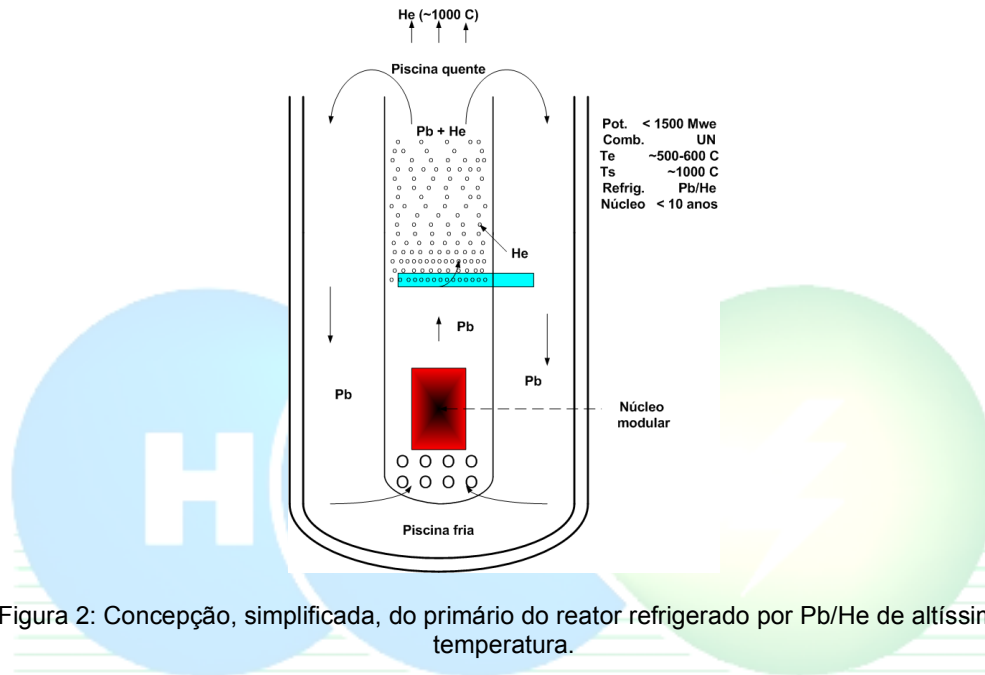


Figura 2: Concepção, simplificada, do primário do reator refrigerado por Pb/He de altíssima temperatura.

A concepção mostrada apresenta grandes desafios de P&D. Na área de combustível há alguma experiência com o nitreto de urânio, mas a sua qualificação para queimas comerciais ainda está por ser feita. Não existem materiais estruturais resistentes às temperaturas aqui mencionadas e a radiação, qualificados para ciclos longos de utilização. Há vários materiais em testes e a comunidade nuclear mundial está fazendo este desenvolvimento. O refrigerante chumbo apresenta vários problemas que ainda requerem estudos, como: corrosão e erosão dos materiais estruturais, compatibilidade química e física com estes materiais, etc. A corrosão foi resolvida pelos russos, para temperaturas de ~500 °C, com a criação de uma camada de óxido nos materiais estruturais em contacto com ele, no entanto, o controle e a estabilidade desta camada, em operação, é um problema que se agrava em temperaturas mais elevadas. A erosão é contornada adotando-se uma baixa velocidade do refrigerante, esta solução precisa ser testada em altíssimas temperaturas e considerando longos tempos de operação.

Embora seja necessário resolver inúmeros problemas para viabilizar o sistema aqui apresentado sucintamente, pode-se adotar uma estratégia para obtê-lo e iniciar a transição para uma nova economia. Primeiramente, o horizonte para utilização deste reator é 30-40 anos no futuro, portanto há tempo. Segundo, é recomendável utilizar todos os desenvolvimentos já feitos e incrementar a experiência para dar o passo seguinte. Com estas considerações é possível estabelecer um programa de P&D que leve ao reator rápido de altíssima temperatura para ser usado após 2040 para gerar eletricidade, calor e hidrogênio. Considerando-se que haveriam esforços nacionais coordenados para se chegar as tecnologias necessárias para o sistema aqui proposto, uma estratégia possível seria a seguinte:

(1) no curto prazo, 10 ~ 15 anos, criam-se programas de P&D nas áreas afins como: processos mais promissores para produção de hidrogênio em altas temperaturas, combustíveis avançados, reprocessamento de combustível queimado, separação isotópica de isótopos estáveis, desenvolvimento de materiais estruturais resistentes a alta temperatura e a radiação, química e

física do chumbo e do hélio, inicia-se o projeto de um demonstrador de conceito para ser operado no médio prazo com tecnologias possíveis de serem obtidas no País ou no exterior, etc. Nesta etapa é preciso relaxar a temperatura de saída e usar materiais já qualificados. Parece ser possível ter temperaturas de saída em torno de 650 °C, com combustível UO_2 e material ferrítico com óxidos dispersos;

(2) no médio prazo, 15 a 30 anos, construção e operação do reator de demonstração de conceito com temperaturas de saída de ~ 650 °C. Após testes iniciais de verificação de desempenho usar o reator como uma instalação de testes e qualificação de sistemas, de fornecedores, de materiais combustíveis e estruturais avançados, etc. Qualificar e aprovar o reprocessamento do combustível queimado no sítio. Nesta fase o reator poderá ser usado para demonstrar a geração de hidrogênio via reforma do metano ou ciclo com altas temperaturas. Toda a problemática da interface nuclear/geração de hidrogênio poderá ser verificada e melhorada. A geração elétrica via ciclo Brayton ou MHD poderá ser testada, verificada e qualificada. Iniciar o projeto do reator de altíssima temperatura em condições mais realísticas; e

(3) no longo prazo, >30 anos, construir e operar um reator rápido refrigerado por Pb/He padrão de altíssima temperatura com instalações para geração de energia elétrica via ciclo Brayton ou MHD, calor e produção de hidrogênio em larga escala. Nesta época toda uma nova infraestrutura industrial e de P&D em várias áreas correlatas terão sido estabelecidas e aptas a continuar a evolução do que foi feito.

A estratégia esboçada acima está longe de esgotar o que seria necessário desenvolver para dominar as tecnologias envolvidas em um sistema complexo como o proposto. Ela está simplificada, mas a idéia central é partir de possibilidades concretas, ter ousadia para ganhar experiência significativa em prazos razoáveis, buscar conhecimento onde estiver disponível e desenvolver o que não estiver disponível, e ter perseverança na busca do objetivo. Todos os países desenvolvidos na área nuclear de alguma maneira estão criando programas e condições, via nuclear, para entrar na era do hidrogênio [2,13,15].

5. CONCLUSÕES

Neste século haverá importante mudança na matriz energética mundial, motivada pelo esgotamento de fontes convencionais, crescimento e melhoria do padrão de vida da população mundial, mudanças climáticas, problemas ambientais e novas tecnologias. Todas as fontes, renováveis ou não, em estudo atualmente deverão contribuir de alguma forma e quantidade para esta mudança. Neste panorama, a produção de hidrogênio, via processos que envolvem altíssimas temperaturas, tem sido indicado pela comunidade científica mundial como um meio importante para disponibilizar energia em várias formas e de maneira distribuída, por longo tempo. O hidrogênio não é encontrado na natureza e não é uma fonte e sim um vetor de distribuição de energia. Sua produção em larga escala e por tempo longo, exigirá uma fonte de energia com grande potencial. Atualmente a única fonte com densidade energética suficiente e adequada para este fim é a nuclear obtida em reatores de fissão.

A tecnologia do reator térmico de alta temperatura fornece temperaturas de saída próximas das exigidas pelos ciclos propostos para produção de hidrogênio, mas precisam ainda de novos desenvolvimentos para atingir as temperaturas ideais e apresentam desvantagens significativas relativamente à tecnologia de reator rápido. Esta última está em fase de desenvolvimento e é a principal linha de P&D para os reatores de IV geração definidos pelo GIF, para uso após 2030. Deste modo, um programa de desenvolvimento de reatores rápidos de altíssima temperatura, ~ 1000 °C, refrigerado por chumbo, com combustíveis avançados, para produção de hidrogênio, geração de energia elétrica via ciclo a gás (Brayton) ou calor, aqui proposto para ser desenvolvido no Brasil, é adequado e oportuno. O País, e o mundo, não possuem conhecimento, nem base tecnológica, para construir um sistema deste tipo. A estratégia proposta para obter as tecnologias necessárias está baseada em planejamento de curto, médio e longo prazo, com demonstrações de ganhos e evoluções de uma etapa para outra. Todos os países desenvolvidos estão perseguindo tecnologias avançadas de reatores nucleares para geração de energia em várias formas e produção de hidrogênio em larga escala e por longo tempo, no futuro.

Na área nuclear o mundo está dividido em países com e sem tecnologias. Mecanismos e convenções internacionais, como o NSG (“Nuclear Suppliers Group”) e o Protocolo Adicional ao tratado de não proliferação nuclear, dificultarão cada vez mais a obtenção de tecnologias nesta área. O Brasil possui um programa de construção de reatores PWR, mas não possui um programa nacional de P&D em tecnologias de reatores avançados. É necessário iniciar agora a preparação desta base tecnológica. De outra forma, a falta de tecnologias nacionais para reatores nucleares avançados poderá ser um ônus que as gerações futuras de brasileiros terão que pagar.

6. REFERÊNCIAS

- [1] [http:// www.gen-4.org](http://www.gen-4.org)
- [2] **A technology roadmap for generation IV nuclear energy systems**, US DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum, GIF-002-00, 2002.
- [3] NASCIMENTO, J. A. e SANTOS, A., **Integral lead reactor concept (ILR)**, Proposta enviada ao GIF, 2001.
- [4] **Plano nacional de energia 2030**, Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia, 2007.
- [5] LAIDLER, J. J., et al, **Development of pyroprocessing technology**, Prog Nuc Energy, Vol 31, 1997.
- [6] KOCHEROV, N. P.; RIMSKI-KORSAKOV, A. A.; KHOPIN, V. G., **Data needs for modeling of fuel cycle concepts for fast lead cooled reactors**, INDC(NDS)-428, 2001.
- [7] ADAMOV, E.; et al, **The next generation of fast reactor**, Nuc Eng Des, Vol. 173, 1997.
- [8] CARMINATI, F.; et al, **An Energy Amplifier for Cleaner and Inexhaustible Nuclear Energy Production Driven by a Particle Beam Accelerator**, CERN/AT/94-47(ET), 1993.
- [9] MYASNIKOVM, V. O.; et al, **Conceptual design of module fast reactor of ultimate safety cooled by lead-bismuth alloy**, Transactions of the American Nuclear Society, Vol. 67, 1993.
- [10] TUPPER, R. B.; WETT, J. F., **The market potential for heavy metal cooled reactors**, Transactions of the American Nuclear Society, Vol. 67, 1993.
- [11] PESSINE, R. T., **Utilização de um reator tipo HTR como fonte de calor para processamento do xisto pirotetumioso pelo método Petrosix**. Instituto de Energia Atômica – IEA, Dissertação e Tese- IEA 031, 1977.
- [12] WALTERS, L.; WADE, D.; LEWIS, D., **Transition to a nuclear/hydrogen energy system**, World Nuclear Association Annual Symposium, London, September, 2002.
- [13] GALLET, D.; GRASTIEN, R., **Thermochemical water splitting cycles**, Commissariat à l’énergie atomique, CLEFS CEA – 50/51, 2005.
- [14] SANTOS, A., NASCIMENTO, J. A., **An Integral Lead Reactor Concept for Developing Countries**, Nuclear Technology, Vol 44(3), December, 2002.
- [15] WADE, D. C.; DOCTOR, R.; PEDDICORD, K. L. STAR-H2: **The secure transportable autonomous reactor for hydrogen production and desalinization**, Proceedings of ICONE-10, Arlington, V., USA, April, 2002.