

A ENERGIA NUCLEAR E A ECONOMIA DO HIDROGÊNIO

Autor: W.LEPECKI

INEE

26/1/2011

RESUMO

Este trabalho é uma resenha da literatura que trata do uso da energia nuclear e do hidrogênio, para fins energéticos. Consta de duas Partes. Na Parte I, apresenta-se uma visão global e, na Parte II, o lado nuclear da simbiose “nuclear/hidrogênio”, com um exemplo real (uso do PBMR pela África do Sul).

Resumo da Parte I

O hidrogênio apresenta uma grande capacidade de armazenamento de energia e, por este motivo seu uso para geração de energia elétrica e como fonte de calor vem sendo amplamente pesquisado. Além disso, a queima de hidrogênio para a produção de energia produz menos poluentes atmosféricos que os combustíveis fósseis. O hidrogênio normalmente existe combinado com outros elementos, como o oxigênio na água, o carbono no metano e demais compostos orgânicos. Como é quimicamente muito ativo, raramente permanece elementarmente puro. O hidrogênio ligado em compostos orgânicos e na água constitui 70% da superfície terrestre. A quebra destas ligações químicas permite produzir hidrogênio e, então, utilizá-lo como combustível. A seguir são descritos alguns métodos para a produção de hidrogênio, em uso ou em pesquisa e desenvolvimento.

A maior parte do hidrogênio obtido atualmente (principalmente nos Estados Unidos) em escala industrial baseia-se no processo de reforma de vapor que utiliza energia térmica para dissociar o hidrogênio. Esta energia, cuja origem é predominantemente a queima de combustíveis fósseis, é responsável pela emissão de grande quantidade de gases de efeito estufa e, portanto, ambientalmente inaceitável em longo prazo. Outro modo usual de produzir hidrogênio é a eletrólise, pela qual o hidrogênio e o oxigênio que constituem as moléculas de água, são dissociados pela passagem de uma corrente elétrica, método este que igualmente utiliza energia, mas não necessariamente de origem térmica, podendo ser hidráulica ou nuclear ou de outra fonte não-polvente da atmosfera. Entretanto, o processo é muito pouco eficiente.

Uma **economia de hidrogênio** poderia ser definida como um sistema em que o hidrogênio seria usado, inicialmente, para o emprego mais eficiente dos atuais recursos de hidrocarbonetos e, posteriormente, com o objetivo final de substituir a gasolina e o diesel derivados do petróleo por um combustível menos poluente. Por outro lado, o uso do hidrogênio como transportador (vetor) de energia reduziria a dependência do petróleo, (especialmente importante se ele for importado), simultaneamente reduzindo a poluição e as emissões de gases de efeito estufa, desde que a fonte primária de energia para sua produção não seja um combustível fóssil. Uma conquista recente e fundamental neste sentido foi o desenvolvimento do conversor de energia baseado na **célula de combustível**.

Enfatize-se que o hidrogênio é um transportador (vetor) e não uma fonte de energia, já que energia deve se **consumida** para obtê-lo. A produção econômica e limpa do hidrogênio permanece o maior desafio da concretização de uma economia do hidrogênio (sem minimizar os custos relacionados ao seu transporte e armazenamento).

O hidrogênio, quando produzido a partir de combustíveis fósseis, não se constitui em solução em longo prazo, porque a compatibilidade ambiental ou a independência energética não serão atingidas. As energias eólica, solar e geotérmica podem contribuir para a produção do hidrogênio livre de emissões de carbono, mais facilmente do que para a produção de eletricidade (que não pode ser armazenada), mas elas simplesmente não possuem a densidade energética requerida para gerar as grandes quantidades de hidrogênio necessárias para sociedades plenamente industrializadas. A energia nuclear, paralelamente com as contribuições dos recursos hidráulicos, solares, eólicos e geotérmicos atenderia os critérios ambientais e de independência energética para desempenhar um papel significativo na transição para a economia do hidrogênio.

Resumo da Parte II

Reatores nucleares específicos para a obtenção de hidrogênio se caracterizam pelo uso de materiais que permitam temperaturas elevadas do fluido refrigerante. Isso leva ao uso de reatores a gás/grafita de alta temperatura. Muito desenvolvimento foi e está sendo feito, no mundo todo, deste tipo geral de reator, em diversas variantes.

Focar-se-á o PBMR (Pebble Bed Modular Reactor), desenvolvido e operado inicialmente na Alemanha e que, há vários anos, está novamente sendo ativamente desenvolvido pela África do Sul, em colaboração com empresas de vários países.

O projeto compreende um reator de alta temperatura com um núcleo formado por um leito de esferas ("Pebble bed") de combustível, - cada esfera do tamanho de uma bola de bilhar - e uma turbina convencional a gás hélio, operando a altas temperaturas (~900°C).

Segundo os seus idealizadores, este tipo de usina apresenta uma série de vantagens, sendo as principais, o baixo custo de investimento (por ser composto de pequenos módulos), de no máximo duas centenas de milhões de dólares - e, portanto, compatível com os recursos próprios das empresas de energia elétrica de pequeno e médio porte - o pequeno prazo de construção, a operação praticamente contínua da usina sem a necessidade de parada para a troca de combustível (carregamento do combustível em carga), o uso de turbinas a gás convencionais, as características avançadas de segurança, e as suas características antiproliferantes. Outra vantagem é que este tipo de usina pode ser instalado em qualquer lugar, independentemente de disponibilidade de água para a refrigeração, como se verá no corpo do trabalho.

A estratégia da África do Sul para utilização do PBMR foi delineada da seguinte maneira:

- Em *curto prazo*, seria o uso da tecnologia PBMR para substituir o gás natural como calor de processo para a reforma vapor-metano, o que reduziria a demanda de gás natural em cerca de 20% e conseqüentemente as emissões de CO₂. Alternativamente, a energia elétrica das usinas PBMR (a eficiências > 41%) poderia também, em curto prazo, ser usada para gerar hidrogênio a partir da eletrólise alcalina convencional ou *eletrólise a alta pressão*;
- Em médio prazo, seria o uso do calor de processo do PBMR para obter hidrogênio a partir do processo de separação de água pelo método de enxofre híbrido (hybrid sulfur water-splitting) ou o uso da tecnologia de eletrólise a vapor de alta temperatura. O hidrogênio puro pode ser usado para produzir combustíveis líquidos mais limpos a serem usados no atual sistema de transporte (motor a combustão interna).
- Em longo prazo, seria o uso do calor de processo do PBMR para gerar hidrogênio a partir dos processos do enxofre híbrido e/ou eletrólise alta a vapor (sulfur and/or high steam electrolysis) a serem usados como alimentação das células combustíveis de hidrogênio para transporte.

Aparentemente, e tendo em vista as dificuldades de transportar hidrogênio e de alcançar altas eficiências em células a combustível embarcadas, nas quais o calor produzido dificilmente é aproveitado, (o que não acontece em instalações estacionárias), a África do Sul estaria buscando um caminho para aproveitar seu carvão e produzir um hidrocarboneto mais limpo para uso automotivo, a partir do hidrogênio obtido a partir de uma fonte limpa. Não é, propriamente, mais do mesmo, pois estão substituindo carvão de processo por energia nuclear. A África do Sul procuraria técnicas para melhor aproveitar, não apenas as suas vastas reservas de carvão, mas também as de urânio. A utilização do hidrogênio permite caminhar na direção destes dois objetivos.

A decisão final do Governo da África do Sul sobre o futuro do PBMR e a respectiva estratégia foi tomada em setembro de 2010, como indicado no corpo do artigo.

I Parte - Visão Global da Simbiose Nuclear/hidrogênio

1. O HIDROGÊNIO E SEU USO ENERGÉTICO

O hidrogênio apresenta uma grande capacidade de armazenamento de energia, e por este motivo seu uso como fonte de energia elétrica e calor vêm sendo amplamente pesquisado.

Os usos atuais do hidrogênio incluem processos industriais, combustível para foguetes e propulsão para cápsulas espaciais. Com pesquisa e desenvolvimento mais avançados, este combustível também pode ser utilizado como uma fonte alternativa de energia para o aquecimento e iluminação de residências, geração de eletricidade e como combustível de automóveis.

O hidrogênio possui a maior quantidade de energia por unidade de massa que qualquer outro combustível conhecido. Além disso, quando resfriado ao estado líquido, este combustível de baixo peso molecular ocupa um espaço extremamente menor do que o que ocuparia no estado gasoso. No estado natural e sob condições normais, o hidrogênio é um gás incolor, inodoro e insípido. O hidrogênio normalmente existe combinado com outros elementos, como o oxigênio na água, o carbono no metano e nos demais compostos orgânicos. Como é quimicamente muito ativo, raramente permanece elementarmente puro. Quando queimado num ambiente de oxigênio puro, os únicos produtos são calor e água. Quando queimado na atmosfera, constituída por cerca de 70% de nitrogênio, alguns óxidos de nitrogênio (NOX) são formados. Ainda assim, a queima de hidrogênio produz menos poluentes atmosféricos que os combustíveis fósseis.

O hidrogênio ligado em compostos orgânicos e na água constitui 70% da superfície terrestre. A quebra destas ligações na água permite produzir hidrogênio e então utilizá-lo como combustível. Existem muitos processos que podem ser utilizados para quebrar estas ligações. A seguir estão descritos alguns métodos para a obtenção de hidrogênio, em uso ou em pesquisa e desenvolvimento.

A maior parte do hidrogênio produzido no mundo, principalmente nos Estados Unidos, em escala industrial, é pelo processo de **reforma de vapor**, ou como subproduto do refino de petróleo e produção de compostos químicos. A reforma de vapor **utiliza energia térmica** para separar o hidrogênio do carbono no **metano** ou metanol, e envolve a reação destes combustíveis com vapor em superfícies catalíticas. O primeiro passo da reação decompõe o combustível em água e monóxido de carbono (CO). Então, uma reação posterior transforma o monóxido de carbono e a água em dióxido de carbono (CO₂) e hidrogênio (H₂).

Outro modo de produzir hidrogênio é por **eletrólise**, onde os elementos da água, o hidrogênio e o oxigênio, na presença de um catalisador, são separados pela passagem de uma corrente elétrica.

2. O PAPEL DO HIDROGENIO NO ATENDIMENTO DA DEMANDA DE ENERGIA

Prevê-se que a demanda global de energia cresça cerca de 60% nos próximos 20 anos, até 2030. A preocupação global causada por este aumento de demanda, pelo aumento dos custos dos recursos fósseis, pela segurança do abastecimento e pela degradação ambiental está valorizando o uso da energia nuclear e do hidrogênio para alavancar as reservas existentes de hidrocarbonetos. Atualmente, hidrocarbonetos valiosos (carvão, gás natural e óleo) são desperdiçados pelo seu uso como fontes energéticas para geração de eletricidade e calor de processo, bem como fonte para geração de hidrogênio. A energia nuclear atualmente fornece 16% da geração elétrica mundial e **já é a opção mais barata para geração elétrica** em vários segmentos do mercado mundial de energia, em rápida expansão, como na França, Finlândia, Japão, Coréia

A Tabela 1 fornece a composição das emissões globais de CO₂ por setores. A energia nuclear atualmente só é usada na geração de eletricidade, mas poderia também desempenhar um papel significativo no setor industrial e de transporte ao fornecer calor de processo. O uso de calor de processo nuclear reduziria as emissões globais de CO₂ (potencialmente mais CO₂ seria evitado do que o objetivo de Kyoto).

<i>Origem</i>	<i>%</i>
Energia elétrica	33
Uso industrial	25
Transporte	24
Refinarias	13
Outros	5

Tabela 1. - Emissões globais de CO₂ por setor energético (Jancovici, 2003, cit. por Greyvenstein, 2008)¹.

Uma **economia de hidrogênio** poderia ser definida como aquela em que o hidrogênio seria destinado para o uso mais eficiente dos atuais recursos de hidrocarbonetos (com o objetivo final de substituir a gasolina e o diesel derivados apenas do óleo cru por um combustível derivado de hidrogênio). O aumento do uso do hidrogênio como transportador de energia reduziria a dependência da importação de petróleo, simultaneamente reduzindo a poluição e as emissões de gases de efeito estufa. Hoje, cerca de 50 milhões de toneladas de hidrogênio são produzidas anualmente com 90% do hidrogênio comercial destinado a aplicações industriais (Fig.6). A atual indústria de hidrogênio o utiliza para obter produtos químicos e no refino de petróleo, e para fabricar produtos tais como amônia, metanol, combustível de foguetes, fertilizantes e outros. Entretanto, no futuro, o hidrogênio poderia ser usado em veículos com motores de combustão interna, acionar veículos elétricos a partir de células de combustível, substituir o gás natural no aquecimento e refrigeração domésticos, alimentar geradores elétricos estacionários, entre outros.

¹ Greyvenstein,R., Correia,M., Kriel,W., "South Africa's opportunity to maximize the role of nuclear power in global hydrogen economy", Nuclear Engineering and Design 238 (2008)3031-3040

O hidrogênio é um transportador e não uma fonte de energia e, portanto energia deve se **consumida** para separá-lo dos elementos aos quais esteja quimicamente ligado. O uso do hidrogênio como transportador de energia ou como combustível em grande escala requer desenvolvimento em vários setores, inclusive produção, transporte, armazenamento e utilização do hidrogênio, dependendo de qual o seu uso final. A produção econômica e limpa do hidrogênio permanece o maior desafio da concretização de uma economia do hidrogênio. Virtualmente todo o hidrogênio hoje é produzido a partir de combustíveis fósseis que dão origem a emissões de CO₂. O hidrogênio produzido a partir da água pode ser uma solução sustentável e limpa, a depender da fonte de energia que venha a ser empregada em sua obtenção. Entretanto, não há um processo de produção de hidrogênio limpo, de grande porte, econômico e prontamente disponível para comercialização. O aumento da sustentabilidade do fornecimento de energia primária exige um maior uso da energia nuclear e um maior conteúdo em hidrogênio dos combustíveis. Estes podem ser obtidos sinteticamente, utilizando hidrogênio obtido de modo limpo e sustentável. Um desafio fundamental é desenvolver um método de produção limpo e econômico que seja compatível com a energia nuclear.

3. TRANSIÇÃO PARA UM SISTEMA ENERGÉTICO SIMBIÓTICO NUCLEAR / HIDROGENIO²

3.1 Introdução

A energia nuclear, paralelamente com as contribuições dos recursos hidráulicos, solares, eólicos e geotérmicos, atende os critérios ambientais e de independência energética para desempenhar um papel significativo na transição para a economia do hidrogênio. Entretanto, a energia nuclear é o único destes recursos que possui uma densidade energética suficientemente elevada para gerar quantidades de hidrogênio em grande escala.

3.2 Motivação para um sistema simbiótico de Energia Nuclear/hidrogênio

A tecnologia para a produção de hidrogênio a partir da água esteve disponível por mais de um século. Por que, então, não o usamos como uma importante fonte de energia? Simplesmente, o custo interno de produção de combustível fóssil é mais barato. Os custos internos excluem os custos que a sociedade em que pagar devido ao impacto sobre o meio ambiente e a saúde – as externalidades negativas. Além do mais, em todos os casos, é importante considerar a diferença entre a quantidade de energia usada para produzir o hidrogênio e a daquela que é liberada quando este é utilizado.

Assim, ao longo do último século, ao depender do uso de energia para o crescimento da economia e para a elevação do padrão de vida, passou-se a se tornar cada vez mais dependente do uso direto de combustíveis fósseis e ainda mais dependente das decisões de muito poucos países e empresas que controlam a sua produção e distribuição. Isto trouxe como consequência a procura de alternativas pela sociedade.

² Walters, L., Wade, D., Lewis, D., "Transition to a Nuclear/Hydrogen Energy System", World Nuclear Association, Annual Symposium, 2002.

Nos EUA, há um consenso de que o hidrogênio desempenhará um papel importante no seu futuro energético. Mais de 1/3 das emissões de CO₂ nos EUA vem do setor de transportes. O uso do hidrogênio como combustível trará uma melhor eficiência de combustível, sem ser danoso ao meio ambiente. O que de melhor poderíamos desejar? Bem, que tal um método ambientalmente amigável, energeticamente eficiente e econômico de **produzir** hidrogênio?

O hidrogênio é o terceiro elemento mais abundante na superfície da terra, onde é encontrado principalmente na água (H₂O) e em compostos orgânicos. Mas o problema é que, não existindo em estado livre na natureza, precisa ser obtido mediante sua separação de outros elementos aos quais esteja combinado.

Hoje, produzimos hidrogênio quase que exclusivamente pela reforma a vapor do metano. O metano, principal componente do gás natural, reage com água à alta temperatura para formar hidrogênio e dióxido de carbono. Este último produto obrigatório do processo de fabricação do hidrogênio deve ser considerado em qualquer discussão sobre a aceitabilidade ambiental do hidrogênio. Não haverá redução de gases de efeito estufa se tudo que fizermos for alterar o lugar onde eles são emitidos – do veículo para a usina de produção do hidrogênio. Eis porque fontes renováveis ou nucleares estão sendo pesquisadas para substituir a reforma por vapor do metano na fabricação do hidrogênio.

Planejar um futuro eficaz para o hidrogênio exige que endereçemos as seguintes duas questões:

- O processo de obtenção tem escala suficiente para atender, em escala mundial, a sua demanda energética?
- O ciclo completo de uma economia do hidrogênio, desde o recolhimento do recurso energético até a produção, distribuição, uso e limpeza do hidrogênio atende nossos padrões ambientais?

Apenas quando tivermos atingido respostas adequadas a estas duas questões teremos criado uma estratégia efetiva para a inclusão do hidrogênio na matriz energética.

3.3 Transição para uma Economia Simbiótica Nuclear/hidrogênio

Um sistema de transporte baseado em hidrogênio produzido através da energia nuclear não começará a se firmar enquanto a energia nuclear não for aceita como tal. Em primeiro lugar, ela tem que ser economicamente competitiva com outras fontes de energia. Em termos de segurança, nos últimos 25 anos o desempenho permanece impecável. Por outro lado, **a confiança do público** na segurança nuclear é ainda frágil. Lixo radioativo e não-proliferação, embora estejam tecnicamente sob controle, com vários caminhos alternativos possíveis, permanecem como uma forte preocupação para uma parte considerável do público. Estes aspectos terão que diminuir em importância, à medida que a percepção dos benefícios da energia nuclear começar a sobrepujar a dos riscos. É até possível que a visão de uma fonte nuclear essencialmente inesgotável, acoplada com a produção do hidrogênio ambientalmente aceitável, seja o catalisador para uma nova onda de desenvolvimento da energia nuclear.

A transição para uma economia completa nuclear/hidrogênio poderá levar três ou mais décadas. A **Fig.1** sumariza a evolução no tempo das possíveis opções do hidrogênio nuclear.

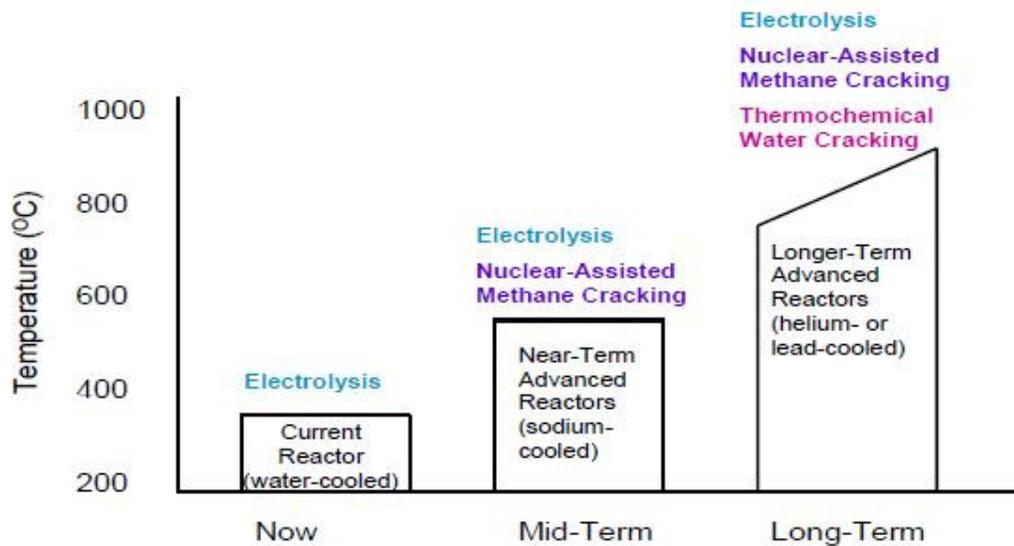


Fig. 1 Deployment of Nuclear-Generated Hydrogen

Figura1 – Implementação do hidrogênio Gerado por Energia Nuclear

Os 437 reatores hoje operando no mundo poderiam ser empregados desde já, aproveitando os períodos fora do pico para produzir hidrogênio por eletrólise. As usinas nucleares não operam necessariamente na base. A própria central nuclear de Angra é despachada pelo ONS. Na França, com ~80% da energia elétrica gerada por nucleares, elas são seguidoras de carga, necessariamente, dada sua elevada participação no atendimento da carga.

Em duas décadas, existindo vontade política, o hidrogênio poderia ser produzido por reatores rápidos a sódio, seja através da eletrólise, seja usando o calor nuclear para auxiliar o craqueamento de metano clássico. Finalmente, daqui a 3 ou 4 décadas reatores poderiam estar disponíveis com temperaturas de saída suficientemente elevadas para que qualquer dos métodos de produção de hidrogênio pudesse ser uma opção. Estes poderiam operar em simbiose com os reatores rápidos a sódio para estender a utilização dos recursos de urânio.

Em última análise, a visão é que a energia nuclear se torne o elo vital na cadeia de fornecimento de energia. Precisamente foi esta a visão que emergiu como um dos elementos nas deliberações do Departamento de Energia dos EUA sobre os Reatores da IV Geração. Em colaboração com o Fórum Internacional de 10 nações³ sobre a Geração IV, esta iniciativa está considerando a P&D necessária para a próxima fase da energia nuclear. No planejamento da Geração IV, a energia nuclear não é mais considerada apenas como uma fonte da energia nuclear de eletricidade para a rede, mas adequada para outros serviços também. A **Fig.2** reflete esta visão.

³ Inclusive o Brasil.

Esta figura indica que um imenso mercado pode surgir para os produtos não-elétricos da energia nuclear.

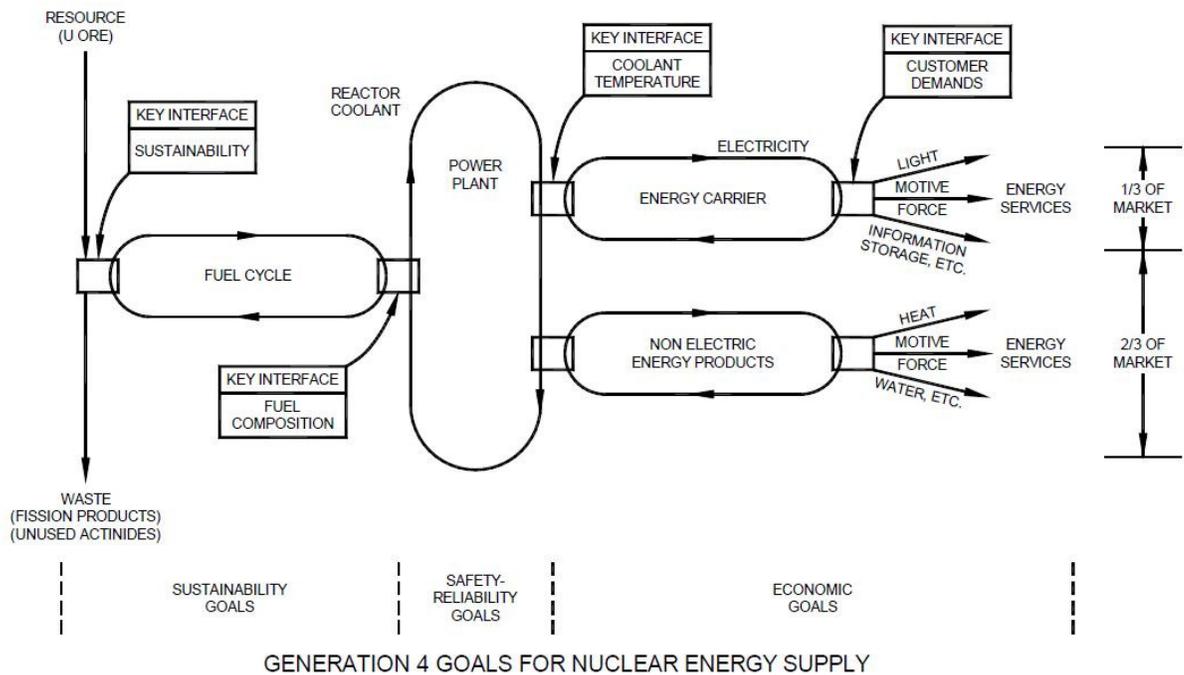


Fig. 2 Nuclear as a Link in the Energy Supply Chain

Figura 2 – A Energia Nuclear como um Elo na Cadeia de Fornecimento de Energia

A **Fig.3** reflete o acoplamento das tecnologias da energia nuclear e do hidrogênio de uma maneira tal que esteja colocado em relevo o seu papel na sustentabilidade; enfatiza muitos dos pontos levantados anteriormente. De especial significado em relação à sustentabilidade, está a visão exposta na figura, que quando estas duas tecnologias estiverem acopladas adequadamente, o impacto líquido sobre o meio ambiente será essencialmente neutro.

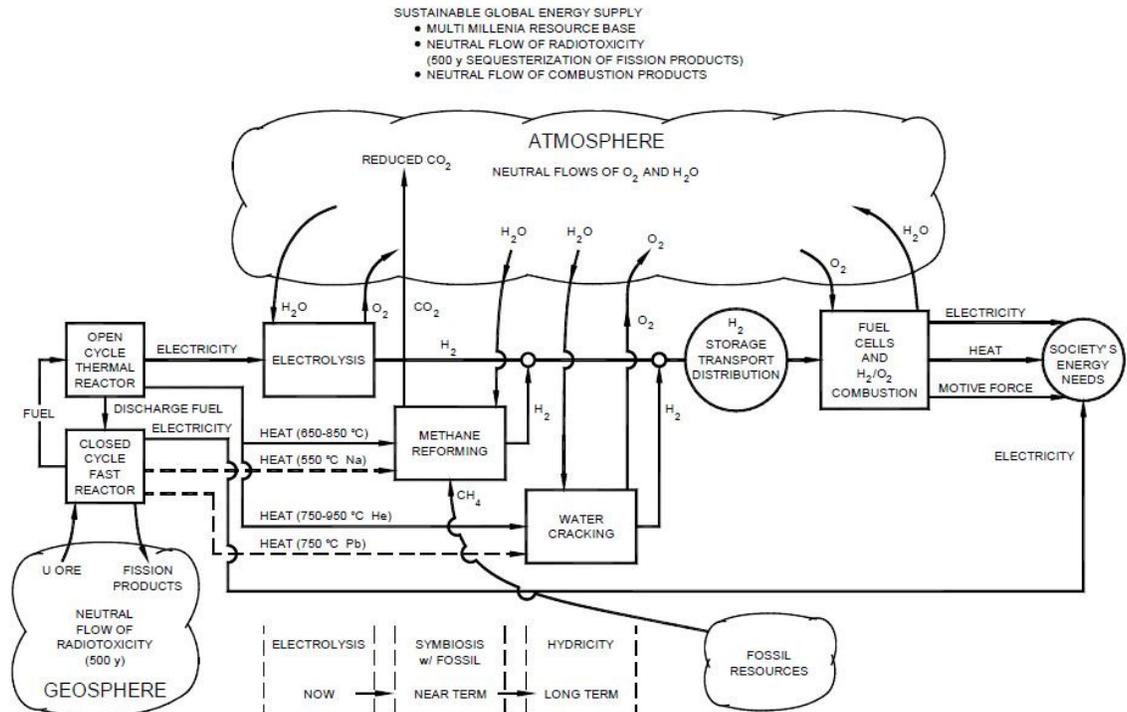


Fig. 3 Transition to Sustainability

Figura 3 – Transição para a Sustentabilidade

3.4 Conclusões

No limiar do século XXI surgiram as condições para incentivar o uso do hidrogênio como transportador de energia. Estes incentivos decorrem da sensibilidade social generalizada quanto à proteção do meio ambiente. Mais importante, muitas nações vêem urgência em desenvolver suas economias independentemente de suprimentos de óleo importado e livres de fontes de energia de duração limitada. Uma conquista recente e fundamental foi o desenvolvimento do conversor de energia baseado na célula de combustível.

O hidrogênio, quando produzido a partir de combustíveis fósseis, não é a resposta em longo prazo para estas preocupações, porque a compatibilidade ambiental ou a independência energética não serão atingidas. As energias eólica, solar e geotérmica podem contribuir para a produção do hidrogênio livre do carbono mais facilmente do que para a produção de eletricidade (que não pode ser armazenada), mas elas simplesmente não possuem a densidade energética requerida para gerar as grandes quantidades de hidrogênio necessárias para sociedades plenamente industrializadas. Assim, a fissão nuclear se torna a única fonte de energia primária que pode gerar hidrogênio em quantidade suficiente para abastecer as economias do mundo de um modo livre de dióxido carbônico.

A modesta taxa de crescimento prevista para energia nuclear aumentará consideravelmente no caso desta visão de uma economia nuclear/hidrogênio se concretizar. Os recursos de urânio se esgotariam em poucas décadas sem o desenvolvimento de reatores rápidos em simbiose com os de tipo existente e em desenvolvimento. Assim, para a transição para uma economia de hidrogênio impulsionada pelo nuclear seja sustentável, o lado nuclear da equação deve incluir não só a ligação com a geração de hidrogênio, como também a super-regeneração de material físsil a partir do urânio em reatores rápidos, para assegurar o suprimento em grande escala de combustível nuclear.

II Parte - O Lado Nuclear da Simbiose “Nuclear/hidrogênio”: Caso Concreto do Reator PBMR

1. O arranjo dos materiais em um reator nuclear

O único material de que se dispõe na natureza para promover uma reação nuclear em cadeia é o Urânio, que ocorre na natureza com a composição isotópica de 99,3% de U238 e 0,7% de U235⁴: assim, o chamado urânio natural tem apenas 0,7% de U235, que é a parte que mais interessa na geração de energia.

O Urânio elementar é um metal. Por ocasião de uma fissão de um núcleo de urânio provocada pela colisão de um nêutron, há a liberação de 2 ou 3 novos nêutrons, emitidos a alta velocidade, que vão se chocando com outros núcleos de urânio, podendo provocar novas fissões, ou ser absorvidos (“capturados”) sem fissão ou sofrer choques e perdendo velocidade. A distribuição destes eventos é probabilística e depende também da velocidade (energia) dos nêutrons. Os nêutrons que apenas sofrem choques com perda de velocidade acabam ficando em equilíbrio térmico com o meio ambiente, no caso, o urânio metálico. A estes nêutrons damos o nome de “nêutrons térmicos”. Eles têm probabilidade de fissão com o U238 negligenciável, mas com o U235, considerável.

A frenagem dos nêutrons rápidos até chegarem a térmicos é a melhor maneira para provocar novas reações de fissão no urânio natural. Ocorre que, numa massa de urânio puro, os nêutrons de velocidade intermediária entre a rápida e a térmica são preferencialmente absorvidos pelos átomos de urânio (sem fissão). Assim, os nêutrons que chegam à velocidade térmica são insuficientes para provocarem novas fissões em número adequado para manter uma “reação em cadeia”. Há duas soluções para este problema.

- a) Inserir o urânio em uma substância que modere a velocidade dos nêutrons rápidos sem absorvê-los, de tal modo que quando eles estivessem na perigosa velocidade intermediária, eles se encontrassem fora da massa de urânio, percorrendo um espaço relativamente longo dentro desta massa moderadora antes de dela sair e reentrar no urânio já à “boa” velocidade, a térmica. Esta solução gerou os reatores chamados “térmicos” (por causa da velocidade preponderante dos nêutrons). Eles se caracterizam justamente por possuírem um “moderador”. Os moderadores devem ser constituídos de

⁴ U-238: núcleo atômico composto de 238 nucleons-92 prótons e 146 nêutrons.
U-235: núcleo atômico composto de 235 nucleons-92 prótons e 143 nêutrons.

átomos leves, que produzam a maior perda de velocidade por colisão. Também não devem ser absorvedores de nêutrons, é claro. Na prática usam-se como moderadores a água (átomos de hidrogênio), a água pesada (átomos de deutério ou hidrogênio pesado) ou grafita (átomos de carbono). No caso do uso de água leve, é necessário aumentar a proporção do isótopo físsil U-235 (“enriquecer” o urânio), para compensar a propriedade absorvedora de nêutrons da água leve, em comparação com outros moderadores.

- b) Opostamente à solução anterior, evitar um moderador e obrigar a que a maioria das fissões ocorra com os nêutrons rápidos, envolvendo, assim, os dois isótopos de urânio – o abundante U238 e o escasso U235. . Esta solução gerou os reatores chamados “rápidos” (por causa da velocidade rápida preponderante dos nêutrons).

Hoje, a totalidade dos reatores comerciais de geração de eletricidade é da primeira classe, reatores térmicos. Os reatores rápidos encontram-se ainda em desenvolvimento.

O problema seguinte, no reator, é a retirada do calor gerado na massa urânio/moderador, tanto para proteger o reator de uma fusão como para conduzir o calor sob forma aproveitável para usos industriais - eletricidade ou calor industrial. Nos reatores moderados a água, seja leve ou pesado, o fluido refrigerante é a própria água. Nos reatores moderados a grafita, o fluido refrigerante ou arrefecedor é um gás – CO₂ ou Hélio. Os reatores a alta temperatura, importantes na produção de hidrogênio, são do tipo moderado a grafita e refrigerado a hélio.

Resumindo, o arranjo dos materiais no reator nuclear se caracteriza por:

Reator térmico:

- combustível - urânio (metálico ou óxido),
- moderador - água (leve ou pesada) ou grafita
- refrigerante-água ou gás.

Reator rápido:

- combustível - urânio e/ou plutônio (Pu)
- moderador - inexistente
- refrigerante – metal fundido (sódio ou chumbo) ou gás natural.

A tabela abaixo indica os tipos de reatores em função do arranjo combustível/moderador/refrigerante.

TABELA I - TIPOS DE REATORES

	PWR	BWR	GCR	AGR	PHWR (Candu)	LWGR (RBMK)	FBR
Combustível	UO2 Enriq.	UO2 Enriq.	U- metálico natural	UO2 Enriq.	UO2 Natural	UO2 Enriq.	Pu/UO2
Moderador	H2O	H2O	Grafita	Grafita	D2O	Grafita	Não há
Refrigerante	H2O	H2O	CO2	CO2	D2O	H2O	Sódio
Nr. em operação ⁵	264	92	4	14	44	16	2

Após esta introdução geral, vamos abordar alguns reatores específicos sendo objeto de desenvolvimento para aplicação na fabricação de hidrogênio e, em especial, no uso do calor industrial. Eles se caracterizam pelo uso de materiais que permitam temperaturas elevadas do fluido refrigerante e, portanto, do material moderador. Isso leva ao uso do moderador grafita e a refrigerante gasoso. Muito desenvolvimento foi – e está sendo - feito no mundo todo deste tipo geral de reator, em diversas variantes. Começaremos com o PBMR, desenvolvido e operado inicialmente na Alemanha e que, há vários anos, está novamente sendo ativamente desenvolvido pela África do Sul, liderada pela ESKOM⁶ em colaboração com empresas de vários países.

Os próximos itens tratam do estado atual e perspectivas de desenvolvimento de usinas nucleares com reatores PBMR. Começaremos com o PBMR, desenvolvido e operado inicialmente na Alemanha e que, há vários anos, está novamente sendo ativamente desenvolvido pela África do Sul, em colaboração com empresas de vários países. Os próximos itens tratam do estado atual e perspectivas de desenvolvimento de usinas nucleares com reatores PBMR.

2. O ESTADO ATUAL E PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTO DE USINAS NUCLEARES COM REATORES PBMR⁷⁸

2.1 Introdução

Hoje em dia, devido principalmente aos altos custos de investimentos das usinas de grande porte, da ordem de US\$ 2 bilhões ou mais, existem planos em diversos países de desenvolver unidades menores, que poderiam ser construídas independentemente ou como módulos de um complexo maior, com a capacidade sendo aumentada à medida das necessidades.

⁵ PWR=Pressurized Water Reactor, Reator a Água Pressurizada BWR=Boiling Water Reactor, Reator a Água Fervente Os LWR e BWR são coletivamente designados de LWR=Light Water Reactors, Reatores a Água Leve GCR=Gas Cooled Reactor, Reator a Gás-Grafita AGR=Advanced Gas-cooled Reactor, Reator Avançado a Gás-Grafita PHWR=Pressurized Heavy Water Reactor, Reator a Água Pesada Pressurizada LWGR=Light Water Graphite Reactor, Reator a Água Leve-Grafita RBMK=sigla russa do LWGR (tipo Tchernobyl) FBR= Fast Breeder Reactor, Reator Rápido Super-regenerativo.

⁶ A ESKOM, empresa de energia elétrica da África do Sul, responsável por 98% da geração no país, tem atualmente uma capacidade instalada da ordem de 40 000 MW, inclusive uma usina nuclear de duas unidades PWR de 900 MWe cada.

⁷ Status em 01/06/09

⁸ Souza, J.A.M., o estado atual e perspectivas de desenvolvimento de usinas nucleares com reatores PBMR”, ELETRONUCLEAR, agosto de 2001.

O projeto atual mais proeminente nesta categoria e que vem merecendo atenção mundial é o de usina com um reator PBMR (“Pebble Bed Modular Reactor”), que se constitui em um projeto comercial em desenvolvimento por um grupo internacional liderado pela empresa de energia elétrica da África do Sul, ESKOMvii. O projeto compreende um reator de alta temperatura com um núcleo formado por um leito de esferas (“Pebble bed”) de combustível, - cada esfera do tamanho de uma bola de bilhar - e uma turbina convencional a gás, utilizando hélio, operando a altas temperaturas e com uma potência térmica de cerca de 260 MWt e uma potência elétrica líquida de aproximadamente 110 MWe.

Segundo os seus idealizadores este tipo de usina apresenta uma série de vantagens, sendo as principais, o baixo custo de investimento, de no máximo duas centenas de milhões de dólares - e, portanto, compatível com recursos próprios das empresas de energia elétrica de pequeno e médio porte-, o pequeno prazo de construção, a operação praticamente continua da usina sem a necessidade de parada para a troca de combustível (carregamento do combustível em carga), o uso de turbinas a gás convencionais, as características avançadas de segurança, e as suas características antiproliferantes. Outra vantagem é que este tipo de usina pode ser instalado em qualquer lugar, independentemente de disponibilidade de água para a refrigeração.

2.2 Características técnicas das usinas PBMR

O reator PBMR é um reator a alta temperatura, refrigerado a hélio e moderado a grafite. O reator consiste de um vaso de pressão de aço, vertical, de 6m de diâmetro e cerca de 20 m de altura. Este vaso é revestido no seu interior com uma camada de cerca de 1 m de tijolos de grafite, que serve como “refletor” e um meio passivo de transferência de calor. O revestimento de tijolos de grafite contém orifícios para abrigar as barras de controle.

O combustível do PBMR utiliza partículas de óxido de urânio enriquecido, a cerca de 8%, com cobertura de carbeto de silício e carbono pirolítico. Estas partículas são encapsuladas em grafita formando uma esfera combustível do tamanho aproximado de uma bola de bilhar ou bola de tênis. (Figs. 1 e 2).

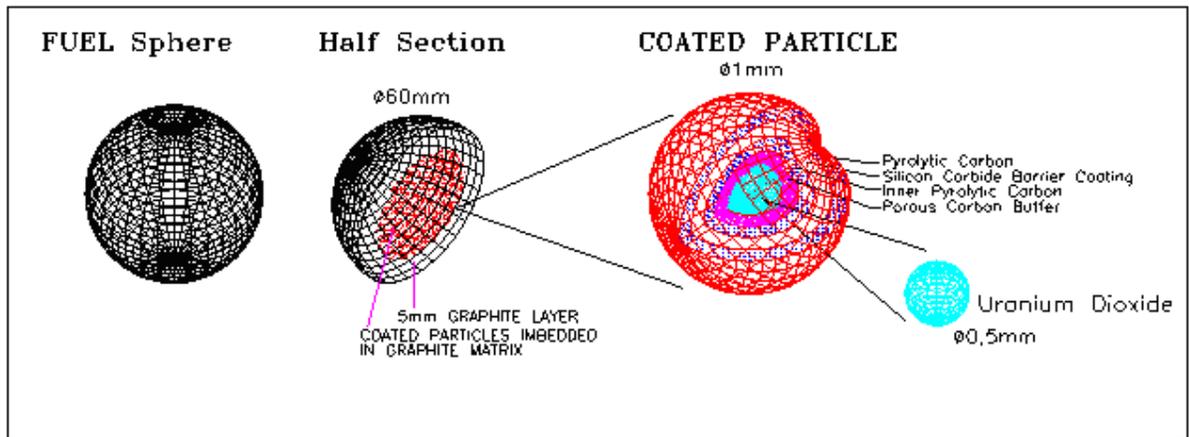


Figura 1- O combustível do PBMR estrutura



Figura 2 – As esferas de combustível do PBMR

O hélio é utilizado como refrigerante e meio de transferência de calor para uma turbina a gás a ciclo fechado acoplada a um gerador elétrico. Quando carregado o núcleo conterá cerca de 330.000 esferas de combustível e 110.000 esferas de puro grafite, estas últimas servindo como moderador adicional.

As 330.000 esferas de combustível reciclam continuamente pelo reator até que atinjam uma queima (taxa de irradiação) de cerca de 80.000 MWd/tU e o enriquecimento do combustível tenha caído para 5-6%.

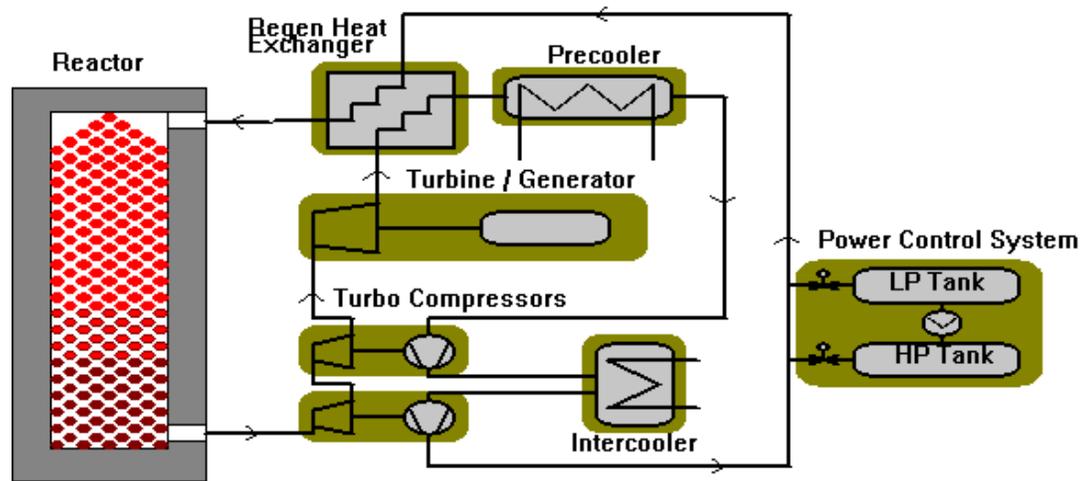


Figura 3 – Fluxograma esquemático da usina com reator PBMR

O acoplamento de uma turbina a gás convencional diretamente ao reator refrigerado a hélio só se tornou possível recentemente, devido aos avanços ocorridos na tecnologia de turbinas a gás.

A troca de combustível em operação (“on-line refueling”) constitui-se em uma característica fundamental das usinas PBMR. Com a usina operando a plena carga, e ocorrendo a diminuição da reatividade do núcleo inicial, adicionam-se simplesmente novas esferas combustíveis no topo do reator, para aumento da reatividade. O objetivo é operar uma usina comercial por seis anos antes da parada para manutenção programada.

Para remoção do calor, o hélio entra no reator a uma temperatura de cerca de 540°C e a uma pressão de 70 bars. O refrigerante circula de cima para baixo, entre as esferas de combustível quentes, absorvendo calor e saindo por baixo do vaso a uma temperatura de cerca de 900°C.

O gás aquecido entra então na primeira das três turbinas a gás, operando em série, com eixos separados e na vertical. As duas primeiras acionam compressores (turbo - compressores) e a terceira, o gerador elétrico. O gás deixa a última turbina a uma temperatura de cerca de 550°C e a uma pressão de cerca de 26 bars, sendo a seguir refrigerado, recomprimido, reaquecido e levado de volta ao reator.

O ciclo térmico do processo utilizado é aproximadamente o ciclo ideal padrão de Brayton (ou Joule) com um circuito fechado. Utiliza-se um recuperador de alta eficiência (“Regen Heat Exchanger”) após a saída da turbina geradora, para recuperar a energia térmica (Figura 3). O hélio com baixa energia é passado pelo pré- refrigerador, inter-refrigerador e turbo - compressores de baixa e alta pressão e então, passa pelo recuperador antes de voltar ao núcleo do reator. A seção convencional do ciclo da turbina a gás pode ser tanto refrigerada a água como refrigerada a ar, o que é uma consideração importante no aspecto de localização.

O resultado principal das altas temperaturas e pressão do refrigerante (hélio) é a alta eficiência térmica da usina. À guisa de comparação, as turbinas a vapor das usinas

com reatores a água leve (LWR) operam com pressões e temperaturas tão baixas que elas são muito mais caras e menos eficientes que as turbinas de usinas térmicas convencionais, que operam com pressões e temperaturas maiores. Enquanto uma usina típica LWR tem um rendimento térmico de cerca de 33%, o rendimento de uma usina PBMR será de no mínimo 42%. Com o desenvolvimento do combustível, antecipa-se que se poderá operar com temperaturas ainda maiores, atingindo-se rendimentos da ordem de 50%.

O acoplamento de uma turbina a gás convencional diretamente ao reator refrigerado a hélio só se tornou possível recentemente, devido aos avanços ocorridos na tecnologia de turbinas a gás.

A troca de combustível em operação (“on-line refueling”) constitui-se em uma característica fundamental das usinas PBMR. Com a usina operando a plena carga, e ocorrendo a diminuição da reatividade do núcleo inicial, adicionam-se simplesmente novas esferas combustíveis no topo do reator, para aumento da reatividade. O objetivo é operar uma usina comercial por seis anos antes da parada para manutenção programada.

2.3 A experiência internacional, base da tecnologia utilizada nas usinas PBMR

Deve-se notar que a tecnologia utilizada na usina PBMR não é nova. Ela está em desenvolvimento por mais de 40 anos, com programas realizados nos Estados Unidos, Reino Unido e República Federal da Alemanha. O projeto do PBMR baseia-se nesta experiência anterior através de transferência de tecnologia, e mais importante, através da participação direta e suporte de engenheiros e cientistas que trabalharam nos programas de desenvolvimento dos reatores de alta temperatura em todo o mundo.

Quando a ESKOM decidiu iniciar o projeto PBMR em 1993, já havia uma experiência internacional considerável relativa aos reatores à alta temperatura. Os projetos mais importantes desenvolvidos nos últimos 40 anos são:

AVR 15MWe Usina experimental “pebble bed”, operou por 22 anos na RFA
THTR 300 MWe Usina com reator “pebble bed” de demonstração e turbina a vapor.
Operou por 5 anos na RFA
Fort St Vrain 330 MWe Usina HTGR. Operou por 14 anos nos EUA.
HTTR 30 MWth Reator HTGR que ficou crítico em 1998 no Japão
HTR-10 Reator HTGR de 10 MWth que ficou crítico em 1999 na China
HTR-MODUL 80 MWe Projeto de usina modular “pebble bed” da Siemens/Interatom, licenciado em 1987.
HTR-100 100 MWe. Projeto de usina “pebble bed” da HRB/BBC, RFA
GT - MHR 300 MWe Projeto de usina HTGR, com turbina a hélio. EUA.
PROTEUS Instalação crítica para testes, Suíça.

Havia, portanto, uma base tecnológica importante para ser empregada no PBMR. A ESKOM estabeleceu então associações com vários institutos de desenvolvimento e empresas que participaram no passado ou estão atualmente participando no desenvolvimento de vários projetos, como indica a Tabela II.

TABELA II - ORGANIZAÇÕES ATUALMENTE ASSOCIADAS COM A ESKOM NO PROJETO PBMR

HTR GmbH (Siemens/ABB)	RFA
AEA Technology PLC	Reino Unido
NRG	Holanda
Kurchatov/OKBM/Minatom	Rússia
INET	China

A tecnologia adotada no desenvolvimento das usinas PBMR foi a desenvolvida na República Federal da Alemanha (RFA). A tecnologia dos reatores a alta temperatura (“High-temperature Reactor”-HTR) foi desenvolvida com sucesso na metade dos anos 80 na RFA com a construção da usina de demonstração e pesquisas AVR e da usina nucleoeleétrica com um reator a tório de alta temperatura (“Thorium High-Temperature Reactor”-THTR).

Algumas concepções adotadas pelo THTR-300 e que causaram dificuldades, foram abandonadas no projeto do PBMR: o vaso de pressão de concreto, as barras de controle no núcleo e o grande tamanho do reator.

Havia uma larga faixa de projetos de combustível para as usinas AVR e THTR, em termos de revestimentos e dimensões do “kernel”. O projeto do combustível adotado pelo PBMR está dentro dos parâmetros de projeto de combustível do programa alemão, entretanto o projeto final adotado é o do projeto do módulo MODUL da Interatom/Siemens, que foi qualificado e certificado na RFA.

Durante a operação dos reatores alemães, não ocorreram problemas maiores com o combustível. Todo o combustível operou dentro da gama esperada de desempenho. Quanto aos turbogeradores, a AAB Alstom Power Generation foi a empresa escolhida por concorrência internacional para realizar o projeto de engenharia para a usina PBMR

2.4 Segurança do PBMR

A concepção do núcleo do reator foi baseada no reator de alta temperatura AVR, concepção esta plenamente demonstrada na RFA: o AVR operou por **aproximadamente** 22 anos. As características de segurança chegaram a ser demonstradas em testes públicos e que foram devidamente documentados, inclusive filmados, quando o fluxo do refrigerante através do reator foi interrompido e as barras de controle mantidas retiradas, como em um uso normal de operação. Foi demonstrado que o reator cessa automaticamente de funcionar em alguns minutos e provado posteriormente que não houvera deterioração do combustível nuclear. Este teste demonstrou que a fusão do núcleo é um evento improvável e que o objetivo de projeto de um reator inerentemente seguro fora atingido.

O PBMR é **concebido** de tal maneira que o envolvimento humano seja extremamente limitado e que qualquer falha humana não possa causar acidentes radiológicos que possam causar ameaças à usina, aos operadores e ao público em geral.

ANEXO I
DADOS PRINCIPAIS DE UM MÓDULO PBMR

Descrição	Valor
Potência térmica máxima do núcleo	265 MWt
Potência elétrica bruta máxima	116,3
Rendimento térmico do ciclo hidráulico	MWe
Rendimento bruto da usina	45,3%
Rendimento líquido da usina	44,1%
Altura do núcleo	42,7%
Diâmetro do núcleo	8,44m
Enriquecimento do combustível	3,5m
Urânio na esfera combustível	7,8-8,3%
Temperatura na entrada do núcleo	9g/esfera
Temperatura na saída do núcleo	536o C
Fluxo de massa do hélio no núcleo	900o C
Pressão nominal na saída do núcleo	140 kg/s
Queda de pressão através do núcleo	7 MPa
Densidade média de potência nas esferas combustíveis	0,175 MPa
Razão de pressão do ciclo de Brayton	4,3
Rendimentos dos compressores de alta e baixa pressão	MWt/m3 2,7
Rendimentos das turbinas de alta e baixa pressão	89%
Rendimento da turbina geradora	89%
Rendimento do gerador elétrico	90%
Taxa de seguimento de carga em rampa entre 0 e 100% pot. max.	98,5% 10% pot max/min

3. ESTRATÉGIA DA ÁFRICA DO SUL PARA A UTILIZAÇÃO DO PBMR⁹

3.1 A estratégia Global

A Fig.4 apresenta graficamente a estratégia proposta para atender ao desenvolvimento econômico, às preocupações ambientais e à diversificação da matriz energética, baseando-se em recursos e tecnologias nacionais. Em resumo:

- Em *curto prazo* seria o uso da tecnologia PBMR para substituir o gás natural como calor de processo para a reforma vapor-metano, o que reduziria a demanda de gás natural em cerca de 20% e conseqüentemente as emissões de CO₂. Alternativamente, a energia elétrica das usinas PBMR (a eficiências > 41%) (Fig.6) poderia também, em curto prazo, ser usada para gerar hidrogênio a partir da eletrólise alcalina convencional (à eficiência de 73%) ou *eletrólise a alta pressão (HPE)* (à eficiência de 77-83%), portanto a eficiências globais entre 30% e 34%. Entretanto, P&D são necessárias para aumentar a escala das pequenas unidades atuais de HPE.
- Em *médio prazo* seria o uso do calor de processo do PBMR para gerar hidrogênio (Fig. 4) a partir do processo de separação de água pelo método de

⁹ R. Greyvenstein et al. / Nuclear Engineering and Design 238 (2008) 3031–3040.

enxofre híbrido (*hybrid sulfur water-splitting*) a eficiências globais acima de 41% ou o uso da tecnologia de eletrólise a vapor de alta temperatura. Entretanto, P&D são necessárias para a comercialização dos processos acima mencionados.

O hidrogênio limpo pode ser usado para produzir combustíveis líquidos mais limpos a serem usados no atual sistema de transporte (IC Engine= Motor a Combustão Interna) (Fig.4). A solução em médio prazo (hidrogênio a ser produzido a eficiências globais bem mais altas) é esperada produzir hidrogênio mais eficazmente, em termos de custo, do que a solução em curto prazo.

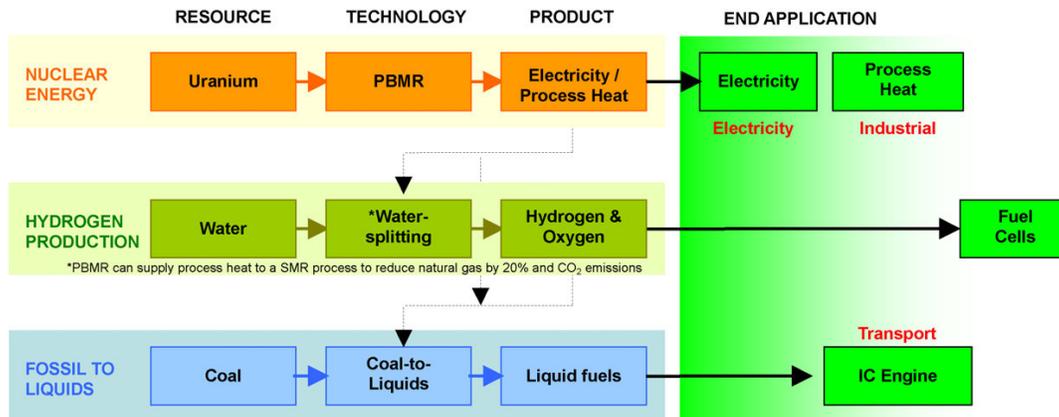


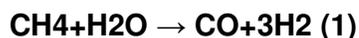
Fig.4 Estratégia proposta para a África do Sul para gerar hidrogênio limpo

3.2 Produção de hidrogênio

O hidrogênio poderia ser produzido a partir da energia nuclear por vários métodos. Os processos identificados pela PBMR (Pty) Ltd como os mais promissores incluem a reforma de metano (steam-methane reforming (SMR)), eletrólise convencional de água, eletrólise de vapor a alta temperatura (High Pressure Electrolysis (HPE)), e duas tecnologias do tipo separação de água termo-químico (thermo-chemical water splitting), os processos enxofre híbrido (hybrid-sulfur) e o enxofre-iodo (sulfur-iodine). A separação de água termo-químico (thermo-chemical water splitting) promete altas eficiências. Os ciclos de separação de água (water splitting) que envolvem pelo menos um passo de uma reação eletroquímica são classificados como ciclos termoquímicos híbridos.

Em um processo termoquímico, todos os reagentes, exceto a água, são regenerados e reciclados. A reforma de metano (steam-methane reforming (SMR)) produz syngas ($\text{CO}_2 + 3\text{H}_2$), ao reformar metano com vapor. Syngas como alimentador pode ser usado para produzir hidrogênio, amônia, metanol e outros produtos. O calor do reator PBMR pode ser usado para substituir aproximadamente 20% do gás natural, que é queimado para fornecer calor à reação endotérmica de reforma. O SMR, aquecido nuclearmente, reduziria o CO_2 e estenderia a vida das reservas de gás natural. Análises econômicas têm mostrado que o SMR a partir do PBMR é competitivo com instalações industriais novas de SMR aos preços atuais de gás natural na maioria dos mercados internacionais.

A fórmula que simboliza o acima descrito é:



A eletrólise da água fraciona a água em seus componentes (hidrogênio e oxigênio) ao carregar a água com uma corrente elétrica à temperatura ambiente ou um pouco mais elevada e a baixa pressão. Eletricidade nuclear pode ser fornecida seja de um reator LWR ou HTGR. O HPE (High Pressure Electrolysis) fraciona a água em seus componentes ao carregar a água com corrente elétrica a pressões elevadas.

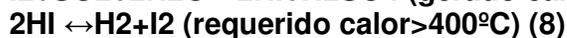
Em equações:



O processo enxofre-híbrido (hybrid sulfur (HyS)) usa duas reações químico-eletrolíticas que se somam à dissociação da água. O processo enxofre-híbrido (hybrid sulfúrio) o mesmo passo de decomposição a ácido sulfúrico a alta temperatura que o processo enxofre-iodo (sulfur-iodine) (abaixo), mas substitui a seqüência de reação de iodo por uma conversão eletrolítica de SO₂ em H₂SO₄. Os custos estimados do processo enxofre-híbrido (hybrid sulfúrio) são apresentados no trabalho de Lahoda et al. (2006) 10. Em equações:



O processo enxofre-iodo (sulfur-iodine (S-I)) usa três reações termoquímicas que somam à dissociação da água). O processo enxofre-iodo (sulfur-iodine) é atualmente a mais pesquisada tecnologia de separação de água termo-química (thermo-chemical water splitting) a nível internacional. O processo enxofre-iodo (sulfur-iodine) tem o mesmo passo de decomposição a alta temperatura que o processo enxofre-híbrido (hybrid sulfúrio). Em equações:



A eletrólise a vapor a alta temperatura (HTSE) melhora a eficiência da eletrólise convencional da água ao adicionar calor externo à reação. A temperatura de operação mais elevada reduz a voltagem da célula eletrolítica de 1,6V para 0,9-1,3V, com uma redução correspondente na demanda elétrica. Isso, por sua vez, reduz as ineficiências associadas com a conversão da energia térmica em eletricidade. A energia elétrica nuclear pode ser suprida seja por um LWR ou um HTGR. Ver o trabalho de Herring et al. (2005) 11 para um relatório de progresso pelos Idaho

¹⁰ Lahoda, E.J., McLaughlin, D.F., Mulik, R., Kriel, W. Kuhr, R., Bolthrunis, C., Corbett, M., 2006. Estimated costs for the improved HyS flowsheet. In: Proceedings of the Third International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, Paper C00000068, October 2006.

¹¹ Herring, J.S., O'Brien, J.E., Stoots, C.M., Hawkes, G.L., Hartvigsen, J.J., Shahnam, M., 2005. Progress in high-temperature electrolysis for hydrogen production using planar SOFC technology. In: Proceedings of the AIChE05, Paper 74F, April 2005.

National Laboratories sobre eletrólise a vapor de alta temperatura usando a tecnologia SOFC.

A eletrólise alcalina a alta pressão é uma melhoria em curto prazo sobre a eletrólise atmosférica convencional com eficiências melhoradas projetadas entre 77% e 83%. Unidades PEM (Polymer Electrolyte Membrane (?)), com altas eficiências estimadas (projetadas em 84%) para aplicações em larga escala são esperadas de estarem disponíveis nos próximos 10-15 anos. Uma vez materializadas estas altas eficiências, um reator PBMR acoplado a HPE poderia gerar hidrogênio puro com eficiências globais calor-para-hidrogenio de 32% a 34%, usando a tecnologia alcalina, e eficiências de ~34%, usando tecnologias PEM. Entretanto, P&D, inclusive desenvolvimento de fabricação, são necessárias para aumentar a escala do HPE até o nível de aplicação comercial em larga escala.

Espera-se que os processos termoquímicos de fracionamento de água sejam mais eficientes (hybrid enxofre acima de 41%) e mais econômicos que os HPE. Embora a PBMR (Pty) Ltd. não tenha nenhum viés a favor de uma tecnologia específica de fracionamento de água, a enxofre-híbrido (hybrid enxofre) é atualmente a tecnologia termo-química escolhida como referencia pela PBMR (Pty) Ltd. para produção de hidrogênio em larga escala.

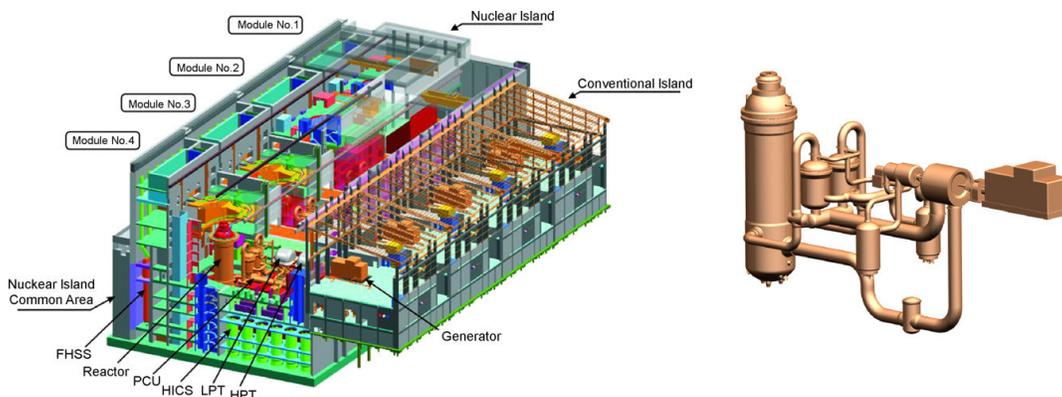


Fig. 5 Uma configuração multimodular PBMR (à esquerda). Sistema principal de potência da usina de demonstração de potência

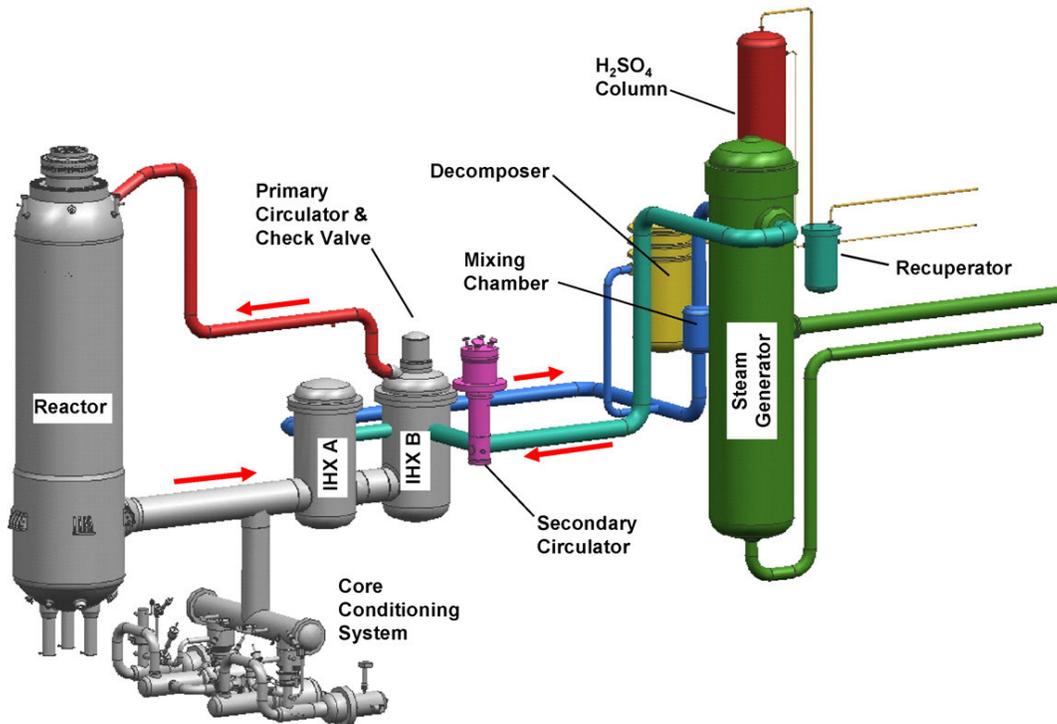


Fig.6 - Planta de calor de processo com PBMR para produção de hidrogênio

3.3 Aspectos comerciais

3.3.1-Situação inicial – até 2001¹²

A PBMR (Pty) Ltd¹³, responsável pelo desenvolvimento do projeto, é um consórcio internacional com participação de empresas da África do Sul, Reino Unido e Estados Unidos. As empresas participantes no momento são a ESKOM, líder do consórcio, com 30%, a “Industrial Development Corporation of South África” (IDC)¹⁴ com 25%, a BNFL (“British Nuclear Fuel Ltd.”)¹⁵, do Reino Unido, com 22,5% e a Exelon¹⁶, dos Estados Unidos, com 12,5%. O objetivo do consórcio é desenvolver a concepção de usina PBMR, com ênfase nas características de segurança passiva. A concepção básica foi utilizada, no passado, em uma usina da República Federal da Alemanha

¹² Marques de Souza, J.M. “O estado atual e perspectivas de desenvolvimento de usinas nucleares com reatores PBMR”, ELETRONUCLEAR, Agosto de 2001

¹³ “Pty Ltd” é abreviatura oficial de Proprietary Limited, uma forma de empresa sob as leis da África da Sul.

¹⁴ A IDC é uma companhia estatal de fomento e financiamento de projetos de interesse do desenvolvimento da África do Sul e que opera no país desde 1940.

¹⁵ A BNFL presta serviços e vende produtos para a indústria nuclear no mundo inteiro. A companhia cobre os serviços de fabricação de combustível e reatores, produção de energia elétrica, gestão de combustível irradiado, descomissionamento de instalações nucleares. Em apenas dois anos a empresa expandiu seus negócios tornando-se uma empresa internacional com a aquisição dos negócios nucleares da Westinghouse e da ABB. Hoje a BNFL atua em 15 países empregando 23.000 pessoas

¹⁶ A Exelon Corporation foi criada em outubro de 2000 com a união da PECO Energy e da Unicom Corporation, empresa da qual a Commonwealth Edison (ComEd) é uma subsidiária, e é no momento uma das maiores empresas de energia elétrica dos Estados Unidos. A Exelon tem uma capacidade instalada em operação de cerca de 37.000 MW e mais 8.500 MW em construção e atende cerca de 5 milhões de clientes. A empresa é a maior operadora de usinas nucleares nos Estados Unidos, tendo aproximadamente 20% de toda a capacidade nucleoeletrica instalada no país.

(RFA) que operou por 22 anos, e o projeto adotado evoluiu de um projeto alemão desenvolvido nos anos 80. No momento considera-se a construção de uma usina de demonstração na África do Sul com possível início de construção em 2002. A Exelon está também considerando um possível desenvolvimento deste tipo de usina nos Estados Unidos, dependendo da construção da primeira usina de demonstração na África do Sul.

A participação no consorcio da BNFL e da Exelon é uma indicação clara do confiança internacional no potencial da usina PBMR.

O projeto da usina PBMR tem como objetivo de custo de capital, US\$ 1000 por kW instalado o que levaria a um custo de geração final bem abaixo dos US\$ 34/MWh, inclusive custo de combustível e O&M, considerado como média mundial das usinas atuais de grande porte. A finalidade principal do estudo de viabilidade detalhado que se encerrou recentemente foi exatamente confirmar os custos e cronograma do projeto. Entretanto os resultados deste estudo continuam por ora confidenciais e de propriedade do consorcio.

Segundo os seus idealizadores os custos operacionais do PBMR devem ser bem inferiores aos custos de uma usina LWR, porque a usina é muito mais simples e segura e, portanto menos intensiva em mão de obra. A estimativa atual a ser confirmada é que o décimo módulo de uma série apresente custos de combustível comparáveis aos das usinas PWRs e custos de operação e manutenção 50% inferiores.

A estimativa atual de custos de geração para a décima unidade de série é:

Custos de combustível:	4,0 US\$/MWh
Outros custos	12,7 US\$/MWh
Total:	16,7 US\$/MWh

Estes custos são baseados em uma taxa de desconto de 6%/a, vida útil de 40 anos e fator de capacidade de 93% e custo de capital de US\$ 1000/kW.

A discriminação do custo de capital da décima unidade é:

Equipamentos:	~57%
Sistema elétrico, I&C:	~11%
Obras civis:	~12%
Serviços:	~20%.

Se os custos de geração previstos das usinas PBMR, extremamente baixos em relação à prática internacional, forem realmente confirmados na prática, os PBMR certamente terão um papel importante a desempenhar no desenvolvimento dos programas nucleoeletricos futuros.

Existe também o aspecto econômico do acompanhamento das variações de carga. Hoje todas as. empresas de energia elétrica considerariam um bônus econômico para aquelas unidades que possam variar sua potência em função das variações da carga do sistema elétrico. As unidades de seguimento de carga estão sendo muito

mais valorizadas que as unidades de base e neste aspecto a usina PBMR pode apresentar vantagens operacionais: é uma usina pequena, flexível, de baixo custo e inerentemente segura.

3.3.2 – Situação atual – 2010

A seguinte notícia, publicada no Nuclear News de março de 2010¹⁷, sintetiza a situação atual

A ÁFRICA DO SUL CORTOU OS FUNDOS PARA O PBMR, deixando o Pebble Bed Modular Reactor (Pty) Ltd, a companhia que está desenvolvendo o PBMR, contemplando cortes maciços de pessoal. Em seqüência ao anúncio governamental de que os fundos para o projeto se encerrarão em 31 de Março, a companhia disse que ela terá que proceder a uma reestruturação de grande porte que poderia envolver uma redução em 75% do seu pessoal, de cerca de 800 pessoas. O Departamento de Empresas Públicas da África do Sul disse que, além das atuais dificuldades financeiras que o governo está enfrentando, ele também está preocupado com as perspectivas comerciais do reator, tomando nota da falta de sucesso da PBMR (Pty) em atrair investidores de longo prazo ou clientes para o seu reator. Enquanto o Departamento disse que quer continuar a desenvolver a tecnologia, ele não mais encontra justificativa em colocar mais dinheiro no projeto. Na sua resposta ao anúncio do governo, a PBMR (Pty) Ltd disse que os recursos atualmente disponíveis não sustentarão a estrutura atual e que o seu futuro vai agora depender de os atuais ou futuros investidores puderem disponibilizar fundos adicionais. É pouco provável que o maior acionista da PBMR, a companhia estatal sul-africana ESKOM, se disponha a prover assistência adicional, considerando que ela estava em dificuldades mesmo antes da atual crise econômica. Em Dezembro de 2008, a ESKOM suspendeu o processo de licitação para a aquisição de vários reatores a água pressurizada de grande porte por causa da sua situação financeira. Os outros acionistas da PBMR (Pty) incluem a estatal Industrial Development Corporation e a Westinghouse Electric Company. O Departamento disse que, apesar do governo estar suspendendo o seu suporte por ora, um grupo de trabalho interministerial que estava trabalhando nos rumos futuros do PBMR, “tentará assegurar que os valiosos conhecimentos nucleares, ‘expertise’ e tecnologia desenvolvidos pela Companhia não sejam perdidos para a África do Sul” e que a decisão final sobre o futuro da Companhia seria tomada em agosto de 2010.

A decisão, finalmente, foi tomada em Setembro de 2010 e no sentido de cancelar o suporte governamental ao programa.¹⁸

AGRADECIMENTOS

O autor agradece a Pietro Erber, e Jair Albo Marques de Souza pela cuidadosa leitura das minutas originais e valiosas sugestões.

¹⁷ NUCLEAR NEWS, vol.53, nr.3, March 2010. pg.26

¹⁸ NUCLEAR NEWS, vol.53, Nr.11, October 2010, p.91.