

# HIDROGÊNIO NUCLEAR – POSSIBILIDADES PARA O BRASIL

ADONIS MARCELO SALIBA-SILVA <sup>(1)</sup>  
MARCELO LINARDI <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Centro de Células a Combustível e Hidrogênio, Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP), São Paulo, SP, Brasil

## RESUMO

O vetor energético hidrogênio representa hoje uma grande possibilidade de ser o substituto para os combustíveis fósseis. Uma fonte de hidrogênio renovável de grande interesse é a água, por ser abundante e poder se decompor, produzindo H<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> puros. Essa decomposição da água pode ser realizada pelos seguintes processos: eletrólise, decomposição térmica e por ciclos termoquímicos. Os ciclos termoquímicos e de eletrólise a quente (HTE) têm sido cogitados como os processos mais viáveis para produção do hidrogênio a partir de energia térmica e elétrica oriunda de um reator nuclear de alta temperatura (HTGR). Ambos os processos têm melhor desempenho em temperaturas altas na faixa de 700-900°C. Nesse trabalho é apresentada uma proposta viável para produção brasileira de hidrogênio baseada na combinação de um reator nuclear HTGR seguido de um sistema de eletrólise de alta temperatura HTE. O grupo de pesquisa de Hidrogênio Nuclear, que foi constituído no Centro de Célula a Combustível e Hidrogênio – CCCH – do IPEN/CNEN-SP, elaborou um plano decenal de trabalho, onde se propõe uma linha de P&D na produção e armazenamento de hidrogênio com base na energia nuclear fornecida por um reator do tipo HTGR. Assim, nesse trabalho, se propõe um programa nacional de atuação nesta área convidando potenciais cooperações.

## ABSTRACT

*The energy vector hydrogen represents a good possibility to replace fossil fuels. One of the main renewable sources of interest for hydrogen is water, which is abundant and can be decomposed directly into pure H<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>. This water splitting can be performed by the following methods: electrolysis, thermal decomposition, and thermochemical cycles. The thermochemical cycles and high temperature electrolysis (HTE) are often thought to be feasible methods to be associated with a High Temperature Gas cooled Reactor (HTGR). Both routines have high efficiency at temperature range of 700-950°C. In this work, is presented an attainable proposal for Brazilian production of hydrogen based on a HTGR followed by HTE system. A research group at Fuel Cell and Hydrogen Center – CCCH at IPEN/CNEN-SP has elaborated a working plan for 10 years, where it is proposed a R&D line for hydrogen production based on nuclear energy supplied by HTGR. So, in this work, a Brazilian program for researching in this area is proposed inviting potential cooperation.*

## PALAVRAS CHAVE

Hidrogênio nuclear; reator HTGR, eletrólise a quente; sistema SI; armazenamento de hidrogênio.

<sup>1</sup> Correspondência deverá ser enviada a Adonis M. Saliba-Silva:  
Tel.: (11) 3133-9275; fax: (11) 3133-9280; e-mail: saliba@ipen.br

## 1. INTRODUÇÃO

A demanda mundial de energia cresce devido às seguintes causas principais: contínuo crescimento da população mundial; demanda crescente nos países em desenvolvimento; necessidade de decrescimento da poluição resultante do uso indiscriminado de combustíveis fósseis e o esgotamento desses combustíveis em um futuro previsível. [1, 2]

A produção de combustíveis fósseis em algumas décadas começará a declinar, porque a sua disponibilidade reduzirá e a sua conveniência de uso deve se adequar às situações mais condizentes com a modernidade e a tecnologia. Várias fontes de energia alternativa e não convencionais devem representar um papel crescente de importância, tais como, energia solar, oceano-térmica, eólica, ondas marítimas, geotermia, termonuclear entre outras.

O conceito de um novo sistema de conversão de energia chamado célula a combustível, alimentada por hidrogênio, começa a despertar um interesse cada vez maior na população em geral, deixando de ser um tema restrito à comunidade técnico-científica e empresarial. Este conceito vem sempre associado à crescente preocupação de preservação ambiental, a automóveis elétricos não poluidores e à geração distribuída de energia com maior eficiência. O binômio **células a combustível/hidrogênio** se insere no conceito denominado “Economia do Hidrogênio”.

O hidrogênio é o elemento mais abundante do universo. O gás hidrogênio ( $H_2$ ) não está presente na natureza em quantidades significativas sendo, no entanto, um vetor energético, ou seja, um armazenador de energia. Para sua utilização energética, ele deve ser extraído de uma fonte primária que o contenha. A energia contida em 1,0 kg de hidrogênio corresponde à energia de 2,75 kg de gasolina. Entretanto, devido a sua massa específica ( $0,0899 \text{ kgNm}^{-3}$  a  $0^\circ\text{C}$  e 1 atm), a energia de um litro de hidrogênio equivale à energia de 0,27 litro de gasolina.

A sua obtenção é bastante flexível, sendo esta uma de suas características mais interessantes. Pode ser obtido a partir de energia elétrica (via eletrólise da água), pelas fontes: hidroelétricas, geotérmicas; eólica e solar fotovoltaica, todas geológicas e também da eletricidade de usinas nucleares. Pode ainda ser obtido da energia da biomassa (via reforma catalítica ou gaseificação, seguido de purificação), como: etanol, lixo, rejeitos da agricultura, etc. As fontes de hidrogênio mais viáveis economicamente são, entretanto, os combustíveis fósseis (via reforma catalítica ou gaseificação, seguido de purificação), como: petróleo, carvão e gás natural. Esta flexibilidade em relação à sua obtenção permite que cada país escolha a melhor maneira de produzir o hidrogênio, segundo suas próprias disponibilidades.

Nos últimos anos, incrementou-se a discussão sobre as possibilidades de utilização da energia do hidrogênio como base energética. O vetor energético hidrogênio representa uma ótima possibilidade de ser o substituto para os combustíveis fósseis. Uma fonte de hidrogênio renovável de grande interesse é a água, por ser abundante na face da Terra e poder se decompor, produzindo  $H_2$  e  $O_2$  puros. Essa decomposição da água pode ser realizada pelos seguintes processos: eletrólise, decomposição térmica, reação química e por ciclos termoquímicos. Os ciclos termoquímicos e de eletrólise a quente têm sido cogitados como os processos mais viáveis para produção do hidrogênio. Ambos os processos têm melhor desempenho em temperaturas altas na faixa de  $700\text{-}900^\circ\text{C}$ .

A fonte de energia térmica cogitada para se obter altas temperaturas seria, então, a de um reator de fissão nuclear de alta temperatura, refrigerado a gás (HTGR). Esse reator representa um conceito adequado de uma planta de potência nuclear com eficiência, economia e geração segura de hidrogênio [3]. Tem-se um exemplar mundial desse sistema produtivo, já em funcionamento desde 2004, em Oarai, Japão, desenvolvido pela JAERI (*Japan Atomic Energy Research Institute*). É um reator de 30 MW refrigerado a hélio com uma temperatura de saída de  $950^\circ\text{C}$ . Esse reator incorpora um complexo termoquímico que fornece energia para uma fábrica, baseada no sistema Enxofre-Iodo (SI) [4].

## 2. PRODUÇÃO TÉRMICA DE HIDROGÊNIO

A fonte térmica nuclear é estável, limpa e com grande capacidade produtiva. A combinação dessa fonte de calor com a produção térmica de hidrogênio é hoje em dia uma base real de estudo e pesquisa em todo o mundo. Ela é sugerida por um estudo detalhado feito em 2003 pela General Atomics [5]. Um dos reatores aconselhados nesse estudo foi o reator HTGR (*High Temperature Gas-cooled Reactor*).

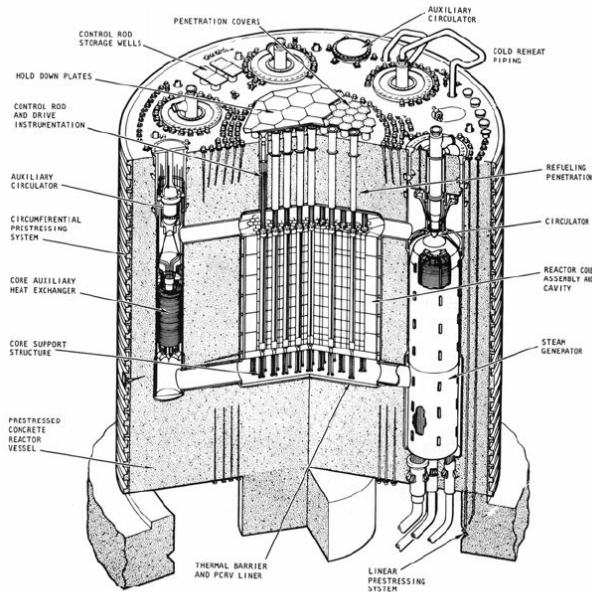


Figura 1 – Corte transversal de um reator nuclear HTGR de Saint Vrain [5]

Desde a produção dos primeiros reatores nucleares refrigerados a gás no mundo, na década de 1950, o gás refrigerante mais adequado foi o hélio. O elemento hélio é quimicamente inerte, tem uma excelente condutividade térmica em relação aos outros gases e tem uma pequena seção de choque para captura de nêutrons [1]. Em 1970, uma planta de HTGR foi construída em St. Vrain, EUA, cujo modelo está apresentado na figura 1. O núcleo desse reator é constituído de um conjunto de blocos de grafites hexagonais (78,7 cm de altura por 35,6 de largura).

As barras combustíveis ficam contidas dentro dos blocos de grafite por onde flui o hélio (refrigerante) através de canais de grafite. As barras são preenchidas com microesferas de carbeto de urânio revestidas e dispersas em um monólito de grafite. A temperatura máxima do combustível pode atingir cerca de 1260°C e a temperatura do gás de saída para o sistema de transferência de calor é da ordem de 785°C.

Presentemente, o sistema HTGR de JAERI no Japão já conseguiu atingir temperaturas de saída da ordem de 900°C, utilizando-se pressão do gás refrigerante. A figura 2 descreve o sistema do núcleo do HTGR, na versão do JAERI, com maiores detalhes. Há ainda possibilidade de se utilizar um sistema denominado "*Pebble Bed*" que consiste em um reator alimentado com bolas combustíveis e bolas de grafite como elemento moderador. As bolas de combustível e o moderador ficam continuamente circulando através do núcleo e as bolas já consumidas são removidas do sistema e combustível novo é realimentado em processo contínuo. O gás

refrigerante chega atingir 850 a 950°C. Os alemães construíram uma planta protótipo de 746 MW que operou de 1983 a 1988 [2].

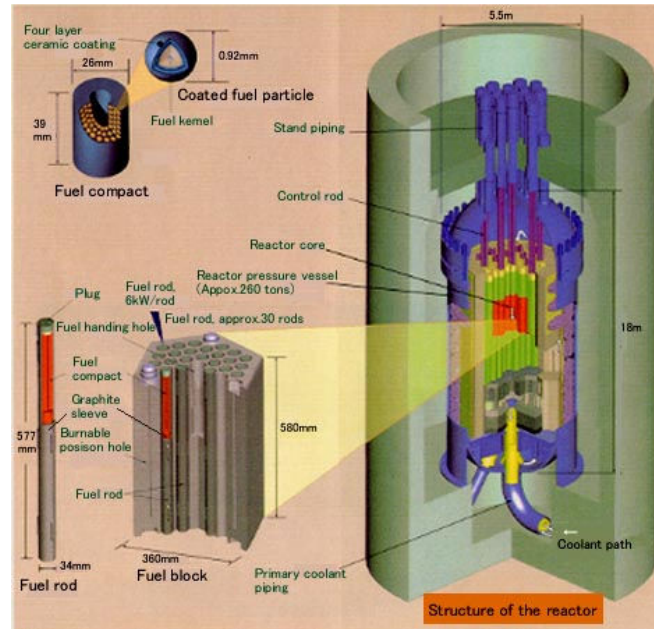


Figura 2 – Sistema JAERI do núcleo do reator do HTGR

Outros reatores e modelos estão sendo cogitados para produção de H<sub>2</sub>, entretanto, o HTGR parece ser hoje o foco de atenções, como mostrado no extenso estudo do DOE em 2003 [5].

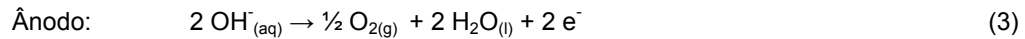
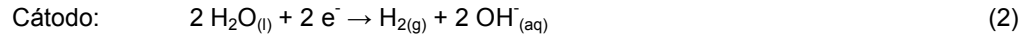
### 3. PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO A ALTAS TEMPERATURAS

A forma mais simples de se produzir hidrogênio [6] seria aquecer o sistema a alta temperatura até promover a separação da mistura de equilíbrio. A partir de 2000°C já se consegue alguma produção de H<sub>2</sub> por esse método, a partir da água. Há possibilidades de dissolução da água a altas temperaturas. Mas a água, mesmo a 1600°C, possui apenas 0,1% em massa de H<sub>2</sub>, situação que se torna ineficaz, caso não haja uma tecnologia associada ao processo natural. No entanto, objetiva-se produzir hidrogênio eficientemente em temperaturas bem mais baixas. Por outro lado, às condições da CNTP, têm-se os seguintes dados para eletrólise da água (a 25°C e a 1 atm: ΔH = 68,3 kcal/g.mol; ΔS= 0,039 kcal/g.mol.K; ΔG=56.7 kcal/g.mol) [6]:

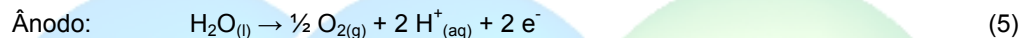


Esses dados mostram que é necessário um grande aporte de eletricidade para que o sistema produza hidrogênio de forma eficiente. As formas atuais de produção industrial de hidrogênio utilizam eletrólise à baixa temperatura. Há, basicamente, três métodos de produção industrial de hidrogênio por eletrólise a frio [7], dois envolvem uma solução aquosa de KOH, o qual confere grande condutividade à água, e são referidos como eletrolisadores alcalinos. De uma forma geral, são unipolares ou bipolares. O eletrolisador unipolar consiste em um tanque com eletrodos conectados em paralelo. Um terceiro método utiliza uma membrana, que é colocada

entre os eletrodos de forma a separar o hidrogênio do oxigênio produzido, mas que permite a transferência dos íons. Nos eletrolisadores bipolares, os eletrodos são conectados em série, hidrogênio é produzido em um lado da célula e oxigênio é produzido em outro lado e uma membrana separa os eletrodos. Nesses sistemas alcalinos de produção de hidrogênio, tem-se:



O terceiro tipo é produzido por uma unidade de eletrólise através de um eletrólito sólido polimérico, que também é conhecido como PEMEC (*Proton Exchange Membrane Electrolysis Cell*). Nessas unidades, o eletrólito é uma membrana polimérica que conduz de íons hidrogênio ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ) do ânodo para o cátodo, onde há a formação de  $\text{H}_2$ . Em um sistema PEMEC de produção de hidrogênio, tem-se:



Há pesquisas para produção térmica de hidrogênio a partir da dissociação térmica da molécula de água, em uma faixa de temperaturas de 100 a 900°C, utilizando membranas poliméricas e cerâmicas, conforme exemplificado por Balachandran [8]. Portanto, há uma grande demanda em se estudar, com maior profundidade, todas as possibilidades de uso de eletrolisadores tipo PEM, desde baixas temperaturas até altas.

### **SISTEMA DE ELETRÓLISE A QUENTE**

A eletrólise é um processo de quebra da molécula de água em seus elementos constituintes  $\text{H}_2$  e  $\text{O}_2$  puros, por meio de suprimento de energia elétrica. A vantagem desse processo é que ele possui um sistema químico muito limpo independente de impurezas de carbono, enxofre, iodo, etc. A desvantagem desse sistema é que ele é muito caro em relação a outras formas de obtenção de hidrogênio, tais como o sistema de reforma do gás natural, devido ao custo da energia elétrica. Quimicamente, a eletrólise da água é simplesmente o reverso da reação de geração de eletricidade que ocorre na célula a combustível. Fisicamente, o dispositivo é muito semelhante a uma célula a combustível, com os eletrodos imersos em solução aquosa comum. A reação pode ocorrer em duas “meias-células” separadas por uma membrana eletrolítica impermeável ao gás.

Na meia-célula catódica, os íons hidrogênio (prótons) são reduzidos a hidrogênio gasoso:



No ânodo, a água é oxidada à oxigênio gasoso e prótons, liberando elétrons:



A soma de (6) e (7), após o balanço químico, resulta então na reação global:



Como a molécula da água é muito estável, essa reação requer um aporte energético elevado. O potencial de equilíbrio desta reação é de 1,23 V (vs NHE), que corresponde a uma necessária energia livre ( $\Delta G$ ) de 237 kJ/mol<sub>H<sub>2</sub></sub>.

Na prática, devido às diversas polarizações, necessita-se algo em torno de 1,5 a 1,6 V. A eficiência eletroquímica da célula, definida como a relação entre o potencial de operação e o de equilíbrio, considerando-se uma célula operando a 1,6 V, fica em torno de 70 %.

Simulações [9] mais complexas envolvendo aquecimento do sistema de eletrólise por meio de um reator nuclear HTGR, com eletrolise à 850°C, pode atingir 46 % (rendimento total de energia consumida total com relação à energia gerada para produção de hidrogênio). Em outras simulações [10] atinge-se até cerca de 50 %. Esse nível de rendimento é bem mais alto do que eletrólises a frio, que ficam na ordem de 27 % para eletrólise alcalina. Este fato mostra o ganho de produção de H<sub>2</sub> que o aquecimento induz no processo de eletrolise a quente, utilizando-se uma energia menos nobre (térmica) que a elétrica.

#### 4. PROPOSTA PARA UM PROJETO NACIONAL

A partir de construções propostas para uma planta industrial com base em aquecimento nuclear, poder-se-ia propor um sistema HTGR associado ao processo de eletrólise a quente, conforme sugeridos por Lewis [1], Shin [9] e McKellar [10], aplicável para o Brasil.

McKellar fez simulações prevendo um HTGR de 600 MW<sub>t</sub> do tipo refrigerado a hélio co-gerando eletricidade e calor para o processo de eletrólise a quente em 950°C. Nesses estudos chegou-se a conclusão que cerca de 87 % do calor gerado pela alta temperatura era transformado, com alta eficiência, em energia elétrica pelo sistema de conversão do ciclo de Brayton. O restante desse calor é utilizado para produção de mistura de vapor e H<sub>2</sub> que é suprida ao eletrolisador. Os resultados dessa análise geraram eficiências de processo de produção de hidrogênio entre 45 a 50 % equivalendo aos resultados de processos termoquímicos mais complexos, com ácidos a quente, como no do sistema SI, com resultados não maiores do que 55 %.

De uma forma ainda incipiente, o sistema HTGR/HTE pode ser aplicado ao modelo brasileiro, conforme proposto na Figura 3. Sugere-se, então, um esforço nacional de integração de competências, nas diversas áreas integrantes deste sistema, para a geração de hidrogênio, em grandes quantidades a partir de energia nuclear, inserindo o país na chamada “Economia do Hidrogênio”. As dificuldades, tanto de caráter científico-tecnológico, como políticos e de mudança de paradigmas, são enormes. Entretanto, os obstáculos à introdução da “Economia do Hidrogênio” não configuram dificuldades intransponíveis, ao contrário, apontam um elenco de oportunidades para o surgimento no país de novas empresas de bens e serviços, como demonstrado pelas tecnologias emergente do setor.

O Brasil está elaborando seu roteiro para a “Economia do Hidrogênio” e possui um programa nacional do MCT (*Ministério de Ciência e Tecnologia*) de pesquisa e desenvolvimento para a tecnologia de célula a combustível e hidrogênio. Atualmente, várias instituições brasileiras estão atuando em áreas de pesquisa e desenvolvimento neste setor com vários projetos em andamento. Novas empresas já apresentam produtos para esta nova tecnologia (Electrocell, Unitech e Novocell, entre outras). Esta proposta nacional de produção de hidrogênio a partir de energia nuclear vem fortalecer estas ações.

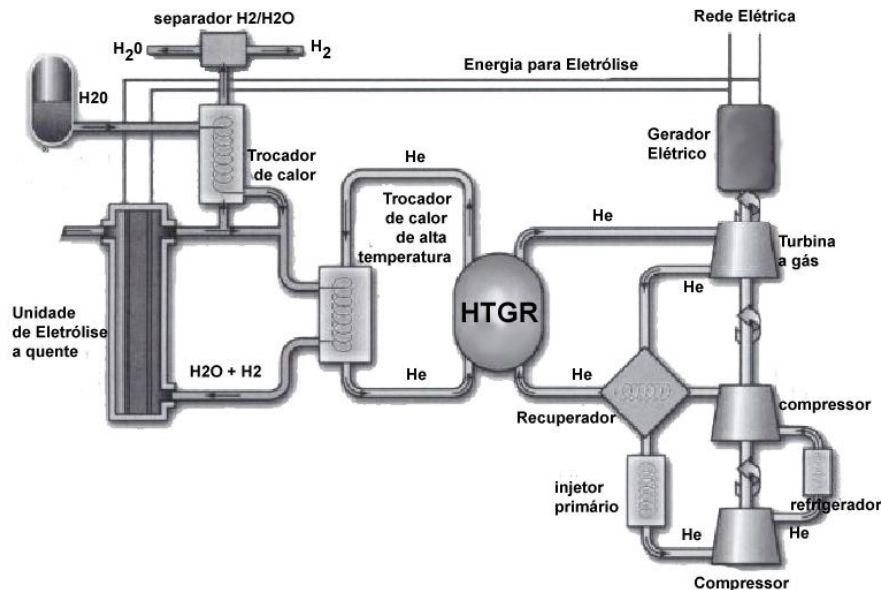


FIGURA 3 – SISTEMA DE HTGR / UNIDADE DE ELETRÓLISE A QUENTE – PROPOSTA PARA O MODELO BRASILEIRO DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO NUCLEAR

## 5. CONCLUSÕES

No mundo, há um grande esforço de pesquisa para produção em grandes quantidades de hidrogênio nos próximos 30 anos, principalmente nos países desenvolvidos como EUA, Japão, Coréia e vários países da Europa. Como evidência real de associação da energia nuclear a esta produção, tem-se um reator HTTR no Japão já está funcionando com essa finalidade, baseado no ciclo termoquímico Enxofre-Iodo (sistema SI).

No Brasil, os esforços ainda são escassos em geração de hidrogênio via nuclear. No, Centro de Célula Combustível e Hidrogênio – CCCH – do IPEN/CNEN-SP, constituiu-se com essa finalidade um grupo de pesquisa denominado Hidrogênio Nuclear. Este grupo pretende dar suporte científico e formação acadêmica de pós-graduação a este assunto. O Projeto como um todo será dividido em duas fases:

1ª fase (de 2009 a 2012): Montagem de um simulador de transferência térmica refrigerado a gás hélio para gerar fluxos térmicos em temperaturas variáveis de 100 a 1000°C. Estudos de combustíveis nucleares para reatores HTGR. Experimentação, simulações e modelamentos de eletrólise em células **PEMEC** (*Proton Exchange Membrane Electrolysis Cell*) e **SOEC** (*Solid Oxide Electrolysis Cell*). Armazenamentos de hidrogênio em ligas metálicas e em outros materiais alternativos.

2ª fase (de 2012 a 2017): Projeto de um reator do tipo **HTGR** nacional e seu combustível. Estudo de sistemas termoquímicos (ciclo **SI**). Integração do conjunto nuclear e químico. Protótipos e pilotos de armazenamento e transporte de hidrogênio, como gás ou outras formas alternativas.

Para estas finalidades, buscaram-se, no cenário científico nacional, parceiros para a criação de um projeto abrangente, envolvendo as diversas competências necessárias, minimizando esforços e otimizando recursos. Após a primeira fase da proposta, espera-se a sensibilização de governo (MCT, na esfera federal e FAPs, nas esferas estaduais) para um programa nacional de P&D de produção de hidrogênio a partir de energia nuclear, inserindo o país na "Economia do Hidrogênio". Cabe ao IPEN, que já possui projetos nas duas áreas macro: **Células a Combustível e Hidrogênio e Reatores Nucleares e Ciclo do Combustível Nuclear**, dar o primeiro passo.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] LEWIS, D. **Hydrogen and its relationship with nuclear energy**. *Progress in Nuclear Energy*, v.50, pp. 394-401, 2008
- [2] YALÇIN, S. **A review of nuclear hydrogen production** *International Journal of Hydrogen Energy*, v.14, n.8, pp 551-561, 1989
- [3] VERFONDERN, K.; VON LENZA,W. **Past and present research in Europe on the production of nuclear hydrogen with HTGR**, *Progress in Nuclear Energy*, v. 47, n. 1-4, pp. 472-483, 2005
- [4] ONUKI, K. et al., **Research and development on nuclear hydrogen production using HTGR at JAERI**, *Progress in Nuclear Energy*, v.47, n.1-4, pp. 496-503, 2005
- [5] BROWN, L.C.; BESENBRUCH, G.E.; LENTSCH, R.D.; SCHULTZ, K.R.; FUNK, J.F; PICKARD, P.S.; MARSHALL, A.C.; SHOWALTER, S.K. **High efficiency generation of hydrogen fuels using nuclear power final technical report for the period august 1, 1999 through september 30, 2002 Ga-A24285 Rev. 1 Nuclear Energy Research Initiative (NERI) Program Grant No. DE-FG03-99SF21888**; U.S. Department of Energy; December, 2003
- [6] FUNK, J.E. **Thermochemical hydrogen production: past and present**. *Int..Journal of Hydrogen Energy*, v.26, pp.185-190, 2001
- [7] IVY, J. **Summary of electrolytic hydrogen production – Milestone Completion Report**, NREL, DOE US. – NREL/MP-560-36734, Sep. 2004
- [8] BALACHANDRAN, U. (BALU); LEE, T.H.; DORRIS,S.E. **Hydrogen production by water dissociation using mixed conducting dense ceramic membranes** *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 32, N. 4, pp. 451-456, 2007
- [9] SHIN, Y. et al. **Evaluation of the high temperature electrolysis of steam to produce hydrogen**, *Int. Journal of Hydrogen Energy*, v.32, pp.1486-1491, 2007
- [10] McKELLAR, M.G.; HARVEGO, E. H.; RICHARDS, M.; SHENOY, A. **A process model for the production of hydrogen using high temperature electrolysis** *International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-14)*, doc. number ICONE 14-89694, Jul. 2006