



V.1, N.1, 2017

ESTUDO DO REATOR NUCLEAR DE 4ª GERAÇÃO “VERY HIGH TEMPERATURE REACTOR” – VHTR
STUDY OF NUCLEAR REACTOR OF 4th GENERATION “VERY HIGH TEMPERATURE REACTOR” – VHTR

Vivian Cristina Konigame², Thadeu das Neves Conti³

RESUMO: Como resultado do crescimento populacional e desenvolvimento da economia há uma demanda maior por energia, sendo necessário diversificar suas fontes de geração, sem causar aumento dos impactos negativos ao meio ambiente. Atualmente, há diversas fontes de geração de energia (combustíveis fósseis, renováveis, nuclear etc). A energia gerada por reatores nucleares é segura, e apresenta vantagens econômicas e ambientais e, por isso, está sendo considerada uma opção viável para geração de energia no futuro. Há diversas gerações de sistemas de reatores nucleares, sendo que no presente trabalho será estudado o reator de geração-IV, “*Very-High-Temperature Reactor*” (VHTR). O VHTR é um reator térmico, moderado a grafite, refrigerado a hélio, e com um ciclo aberto para o urânio. É seguro e eficiente na cogeração de hidrogênio e eletricidade, e pode reduzir a dependência das reservas de combustíveis fósseis, a emissão de gases nocivos ao meio ambiente e a poluição.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Nuclear. Geração-IV. *Very High Temperature Reactor* Hidrogênio.

ABSTRACT: *As a result of population growth and economic development there is a greater demand for energy, being necessary to diversify the sources of generation without causing increased negative impacts to the environment. Currently, there are several sources of power generation (fossil fuels, renewable energy, nuclear etc.). The energy generated by nuclear reactors is safe and presents economic and environmental advantages and, therefore, is being considered a viable option for power generation in the future. There are several generations of nuclear reactors and this study presents the generation-IV reactor, “Very-High-Temperature Reactor” (VHTR). The VHTR is a thermal, graphite-moderated, helium-cooled reactor with a once-through uranium fuel cycle. It’s considered safe and efficient in cogeneration of electricity and hydrogen and can reduce the dependence on fossil fuel reserves, pollution, and the emission of greenhouses gases that are harmful to the environment.*

KEYWORDS: Nuclear Energy. Generation-IV. *Very High Temperature Reactor*. Hydrogen.

² Universidade Guarulhos – Brasil - vckonigame@yahoo.com.br

³ Universidade Guarulhos, Brasil; Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Brasil; tnconti@yahoo.com.br



V.1, N.1, 2017

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento da economia e o crescimento populacional, o mundo está cada vez mais dependente de energia. Ao mesmo tempo, o aumento no uso de energia está fazendo com que ocorra uma redução dos recursos naturais, com aumento da poluição e impactos negativos ao meio ambiente.

Devido ao crescimento rápido da demanda de energia, torna-se necessário diversificar suas fontes de geração para garantir seu contínuo fornecimento para a população e o desenvolvimento econômico. Principalmente os países emergentes e em desenvolvimento, como Brasil, Índia, China, terão uma grande demanda de energia nos próximos anos.

A atual matriz energética mundial está baseada principalmente em combustíveis fósseis, cuja combustão está relacionada com a emissão de gases que contribuem para o efeito estufa. Nos últimos anos, tem crescido a preocupação com o meio ambiente e, por isso, planeja-se substituir o uso de combustíveis fósseis por fontes de energia renováveis ou com baixa emissão de gases que provocam o efeito estufa.

Em comparação com as outras fontes de energia, a geração de energia nuclear não contribui para o efeito estufa,

não depende das condições climáticas, e a central nuclear pode ser construída mais próxima aos grandes centros de consumo. Por apresentar vantagens econômicas e ambientais, unindo-se a isso o estudo de novas tecnologias e a preocupação com a segurança de seu uso, a fonte de energia nuclear está sendo considerada uma opção sustentável para geração de energia no futuro.

O uso da energia nuclear para produção de energia começou a partir do projeto US Manhattan durante a Segunda Guerra Mundial (Beck, 1999). O primeiro reator utilizado para gerar energia foi construído na Rússia e começou a operar em 1954 (Megahed, 2001). O uso comercial da energia nuclear deu início à primeira era nuclear, em 1957 (Ingersoll, 2009).

Na primeira era nuclear, a marinha americana proporcionou uma grande evolução na energia nuclear comercial com o desenvolvimento de reatores a água leve (LWRs). Mas o acidente em Three Mile Island em 1979 fez com que esta era nuclear chegasse ao fim (Ingersoll, 2009). Este acidente e o ocorrido em Chernobyl em 1986 fizeram com que a popularidade da energia nuclear diminuísse durante as décadas de 1970 e 1980 (Beck, 1999).

Apesar disso, a crescente demanda por energia elétrica, a boa performance dos reatores a água leve e a preocupação com



V.1, N.1, 2017

o aquecimento global, deram origem à segunda era nuclear, também conhecida como era da renascença nuclear (Ingersoll, 2009). Na metade dos anos 80 a indústria nuclear gerava aproximadamente 4% da necessidade de energia mundial, mas após Chernobyl e devido aos elevados custos das plantas nucleares adicionado a preocupação crescente com a disposição final dos resíduos de combustível, os planos de rápida expansão da energia nuclear foram abandonados (Beck, 1999).

Na década de 1990 uma maior preocupação ambiental surgiu e apesar das questões relacionadas à segurança, aos resíduos e aos custos, a produção de energia nuclear aumentou devido à maior eficiência das plantas antigas e às novas estações de energia em operação (Beck, 1999).

Recentemente devido a novas regulamentações em matéria de segurança a taxa de construção de centrais nucleares diminuiu; todavia, a produção nuclear aumenta dois terços em termos globais, sendo os principais países responsáveis deste acréscimo a China, a Coreia, a Índia e a Rússia (IEA, 2013).

Por aproximadamente cinco décadas a indústria de energia nuclear tem se desenvolvido e aprimorado a tecnologia dos reatores (Stosic *et al.*, 2008). Atualmente, há diversas gerações de sistemas de reatores nucleares (Fig. 1) e 443 usinas nucleares no mundo, que representam 17% (370 gigawatt elétrico - GW(e)) da potência mundial de energia instalada (Abram; Ion, 2008; Carajilescov; Moreira, 2008).



V.1, N.1, 2017

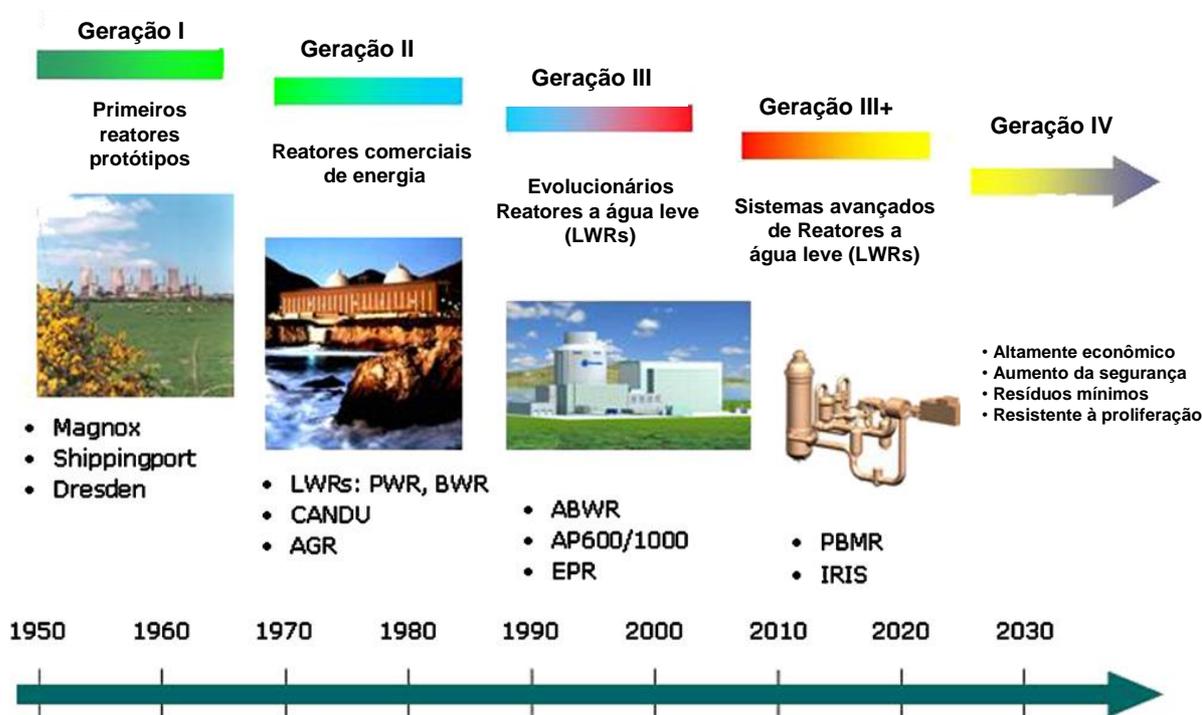


Figura 1 – Gerações de sistemas de energia nuclear (Abram; Ion, 2008).

A primeira geração de reatores nucleares foi desenvolvida nos anos 50 e 60 (reatores protótipos HTRs). A segunda geração de reatores, (*Light Water Reactor* - LWR, *Pressurized Water Reactor* (PWR), *Boiling Water Reactor* - BWR), *Canada Deuterium-Uranium Reactor* - CANDU, etc.) representa os reatores desenvolvidos durante as décadas de 70 e 80. Os reatores de geração-III / III+ (*European Pressurised Reactor* - EPR, SWR-1000, *Advanced Boiling Water Reactor* - ABWR, AP1000, ACR1000, VVER91)

compreendem os avançados reatores refrigerados à água (Marcus, 2000; Stosic *et al.*, 2008).

Hoje, a maior parte dos reatores nucleares em funcionamento no mundo pertence à geração-II, uma classe de reatores comerciais desenvolvidos para serem econômicos e confiáveis, com tempo de operação de aproximadamente 40 anos. Porém, após os eventos ocorridos em Fukushima (Japão), verificou-se que as plantas nucleares que possuem reatores de geração-II necessitam de um



V.1, N.1, 2017

aperfeiçoamento de controles de segurança, envolvendo estruturas de contenção, capacidade de refrigeração em casos emergenciais e na ausência de energia elétrica, performance do combustível (Goldberg; Rosner, 2011).

Os reatores de geração-IV estão em pesquisa e desenvolvimento para ser implementados a partir de 2030, e têm como objetivos: reduzir os custos de sua construção e operação, aperfeiçoar a segurança nuclear, minimizar os resíduos nucleares e reduzir o potencial de proliferação de materiais nucleares (Abram; Ion, 2008; Elder; Allen, 2009).

Para a pesquisa e desenvolvimento dos reatores de geração-IV foi criado um Fórum Internacional da Geração-IV em 2001, composto por Argentina, Brasil, Canadá, França, Japão, República da Coreia, África do Sul, Suíça, Reino Unido, Estados Unidos, Agência de Energia Atômica Internacional e Agência de Energia Nuclear da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD) (US DOE, 2002).

Há seis sistemas de reatores de geração-IV selecionados pelo GIF para pesquisa e desenvolvimento: *Gas-Cooled Fast Reactor* (GFR); *Very-High-Temperature Reactor* (VHTR); *Supercritical-Water-Cooled Reactor* (SCWR); *Sodium-Cooled Fast Reactor* (SFR); *Lead-Cooled*

Fast Reactor (LFR); *Molten Salt Reactor* (MSR) (Abram; Ion, 2008).

O objetivo deste trabalho é estudar o reator nuclear de 4ª geração *Very High Temperature Reactor* – VHTR, projetado para ser sustentável, economicamente viável, resistente à proliferação, seguro e confiável, podendo ser utilizado para geração de eletricidade e hidrogênio. Este estudo foi realizado através de uma revisão da literatura sobre o VHTR, e utilizou diferentes bases de dados e pesquisas. Durante a busca de dados foi especificado principalmente o período entre os anos 2000 a 2010. Além dos artigos científicos, foram levados em conta também simpósios e palestras apresentadas por pesquisadores sobre o tema.

2 CARACTERÍSTICAS DO VHTR

Os reatores nucleares são constituídos fundamentalmente por: um combustível, um moderador e um refrigerante. Além disso, um reator também necessita de um material para fissão que mantém uma reação em cadeia do nêutron (Alesso, 1981).

O conceito utilizado para a construção do VHTR (Fig. 2) será baseado em sistemas de reatores de alta temperatura (HTRs) propostos durante os



V.1, N.1, 2017

anos cinquenta (Abram; Ion, 2008). A planta de demonstração do VHTR será composta por um reator, um trocador de calor intermediário externo, um sistema de circulação de gás refrigerante com um trocador de calor intermediário externo

secundário atuando como fonte de calor para a planta de produção de hidrogênio e uma turbina a gás de alta temperatura para a produção de eletricidade (Baccaglioni *et al.*, 2003).

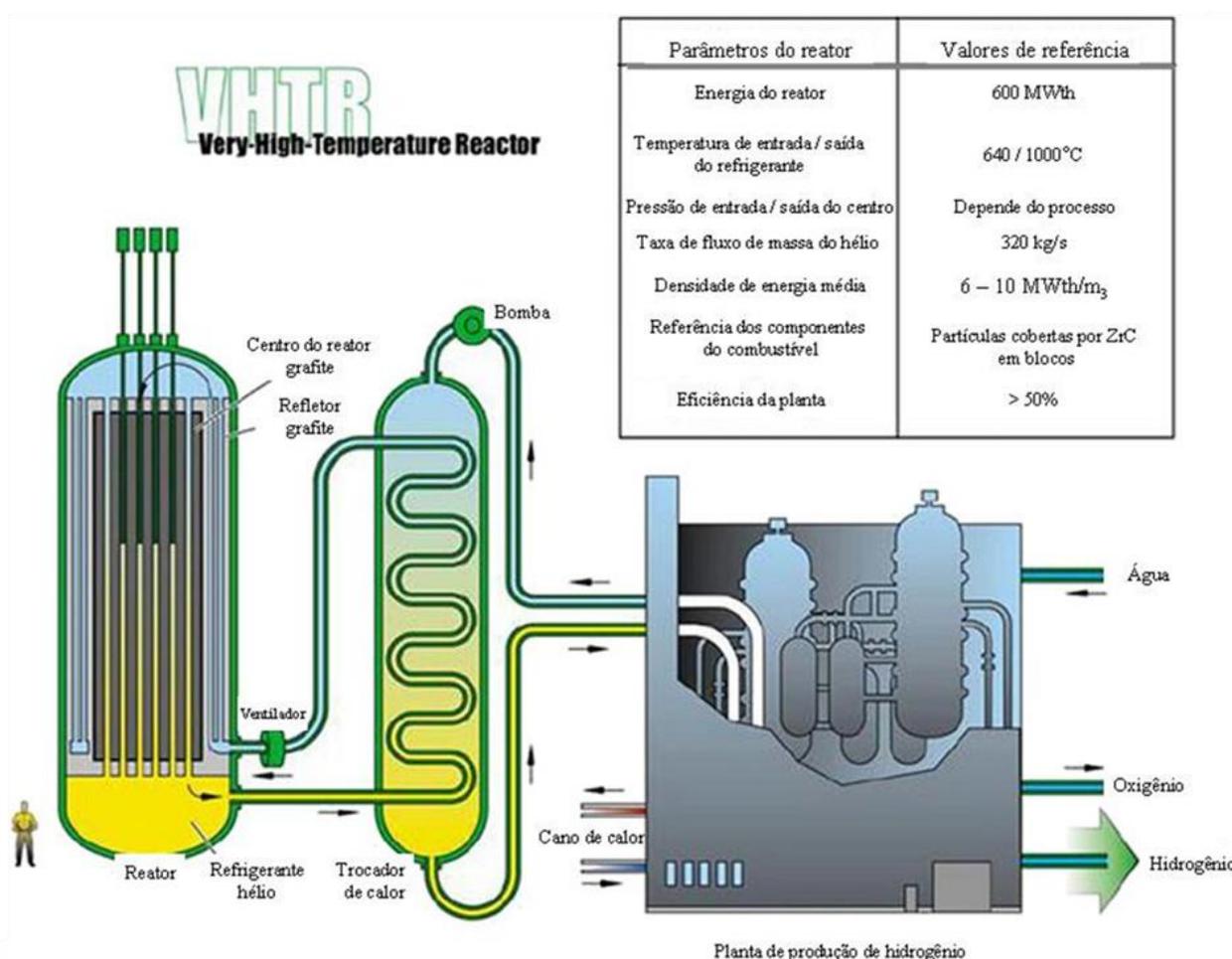


Figura 2 – Conceito esquemático do reator nuclear de geração-IV “*Very-High-Temperature Reactor*” (VHTR) (Abram; Ion, 2008).

O reator e o trocador de calor intermediário possuem válvulas de pressão

separadas, mas que são interligadas por uma válvula cruzada com um cano de saída



V.1, N.1, 2017

e entrada do reator para o hélio (Gauthier *et al.*, 2006; Olander, 2009).

O VHTR vai operar em altas temperaturas, podendo atingir aproximadamente 1.000°C e será constituído por um núcleo prismático de design baseado no GT-MHR contendo 108 colunas para o fluxo do hélio e 10 blocos e está sendo desenvolvido para produzir 600 MW de energia térmica (Gauthier *et al.*, 2006; Rodriguez; El-Genk, 2010).

O núcleo prismático do VHTR consistirá em um arranjo contendo colunas verticais de blocos de grafite com o

combustível armazenado dentro delas, varetas guias de controle e blocos refletores que poderão ser substituídos (Iyoku *et al.*, 2004). A figura 3 mostra um corte radial do núcleo do reator, em que os blocos hexagonais escuros representam blocos de grafite com orifícios axiais (alguns para o refrigerante passar e, o resto, para manter os pequenos cilindros de grafite contendo o combustível) e os hexágonos claros representam os blocos de grafite sem infiltração que funcionam para retornar nêutrons que escapem do núcleo (Olander, 2009).

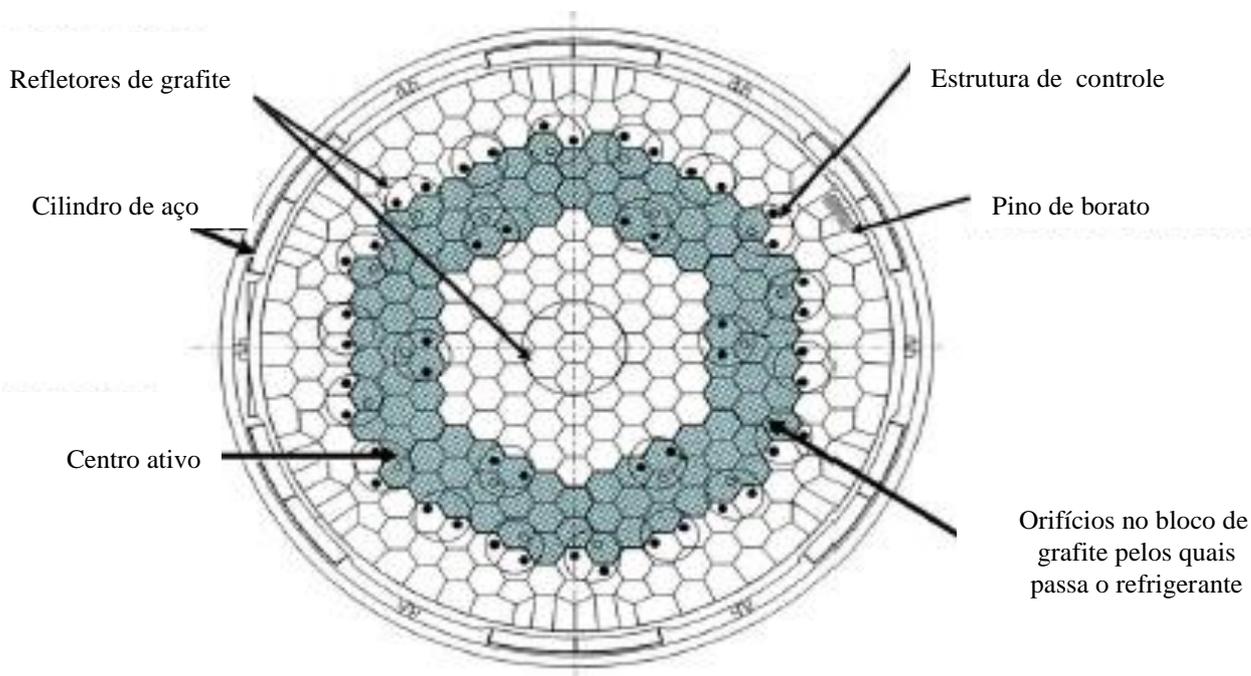


Figura 3 – Núcleo do VHTR (Petti, 2002 apud Olander, 2009).



V.1, N.1, 2017

A configuração anular do núcleo será adotada para alcançar a máxima eficiência de energia e permitir a remoção passiva de calor do núcleo enquanto mantém o pico de temperatura do combustível abaixo de 1.600°C caso ocorra algum acidente em condições que envolvam a perda do refrigerante, garantindo a integridade do combustível (General Atomics, 2001).

Assim como alguns dos reatores de geração II (HTGR, MSRE), o VHTR também será moderado a grafite. Um pré-requisito fundamental para a grafite utilizada como moderador nos reatores de fissão é a baixa absorção de nêutrons (Kissane, 2009). Além disso, a grafite apresenta baixo custo e tecnologia de fabricação bem estabelecida (Baker, 1970). Devido ao dano causado pela radiação os blocos do moderador do VHTR devem ser trocados a cada 4 a 10 anos (US DOE, 2002).

O VHTR será refrigerado com hélio, que possui boas propriedades para o transporte de calor, não oferece risco de fogo ou explosão, não é tóxico, é estável na presença de radiação e altas temperaturas, e, quimicamente inerte (Marshall, 2002).

Nos reatores de alta temperatura o hélio, apesar de inerte, pode carregar baixos níveis de impurezas, como: H₂, H₂O, CO₂, CO, metano (CH₄), gás nitrogênio (N₂) e gás oxigênio (O₂) (Kissane, 2009). Essas

impurezas podem causar danos estruturais ao VHTR, podem afetar a eficiência de transferência de calor causada pela deposição de carbono que pode ocorrer na superfície dos tubos responsáveis pela transferência de calor, resultando na redução do tempo de vida do reator (Sakaba *et al.*, 2010).

De acordo com a energia produzida pelo reator, com os parâmetros de operação e seu tempo de vida útil, novos materiais para a sua construção precisam ser desenvolvidos e testados. Os materiais necessários para a construção dos reatores de geração-IV devem possuir as seguintes características: excelente estabilidade em relação à alta temperatura e à irradiação, sofrer pouca dilatação, possuir propriedades mecânicas favoráveis (força, maleabilidade), apresentar resistência aos danos causados pela radiação, e possuir alto grau de compatibilidade química entre os materiais estruturais, o refrigerante e o combustível (Murty; Charit, 2008). Alguns materiais que estão sendo considerados para a construção de reatores de alta temperatura são: aço, ligas de níquel e cerâmica (Hoffelner, 2005; Murty; Charit, 2008).

2.1 Combustível



V.1, N.1, 2017

O combustível proposto para ser utilizado no VHTR é chamado de *TR*istructural *IS*Otropic (TRISO). Esse combustível é formado por partículas cobertas com camadas que possuem resistência as altas temperaturas e atualmente são utilizadas em reatores de alta temperatura refrigerados a gás. Essas partículas são compostas por um óxido de metal, geralmente urânio ou plutônio, ou

uma mistura de óxido/carbonato (Tan *et al.*, 2008).

As partículas de combustível (Fig. 4) estão localizadas em uma esfera central e são cobertas por quatro camadas concêntricas de carbono poroso (PyC), uma camada intermediária de pirocarbono (IPyC), carbeto de silício (SiC) e outra camada de pirocarbono externa (OPyC), respectivamente (Minato *et al.*, 1994; Talamo, 2008).



Figura 4 – Combustível TRISO para VHTR (Olander, 2009).

As quatro camadas de carbono poroso (60 micrometro - μm), adjacentes ao núcleo de combustível (600 μm de diâmetro) acomodam os produtos de fissão gasosos e

monóxido de carbono (CO), além de fornecer espaço para expansão e migração do núcleo durante a irradiação (Minato *et al.*, 1994; Iyoku *et al.*, 2004; Talamo, 2008).



V.1, N.1, 2017

A camada intermediária de pirocarbono funciona como uma superfície de deposição da camada de carbonato de silício durante o processo de fabricação e atrasa o transporte dos produtos de fissão e compostos de cloro para e a partir da camada SiC (Talamo, 2008). A liberação de cada produto de fissão a partir do combustível depende tanto de seu estado químico como da temperatura (MINATO *et al.*, 1994). A camada SiC é a maior camada de revestimento, funcionando como uma barreira impermeável para os produtos gasosos e metálicos da fissão, ajudando a manter a integridade estrutural do combustível em alta temperatura (Tan *et al.*, 2008; Talamo, 2008). A outra camada de pirocarbono externa oferece proteção para a camada de SiC aos danos durante o funcionamento (Talamo, 2008).

Além do SiC também tem sido considerada a camada de carbeto de zircônia (ZrC) (Gauthier *et al.*, 2006). A camada ZrC oferece uma margem de 200°C a mais em comparação à camada de SiC nas partículas TRISO; fornece uma melhor retenção dos produtos de fissão; é compatível com dióxido de urânio (UO₂) e água; possui condutividade térmica adequada aos reatores que operam em alta temperatura e é de fácil fabricação (Billot; Barbier, 2004; Zinkle; Busby, 2009).

Há dois tipos de formas de grafite nos quais as partículas de combustível podem ser armazenadas. A primeira forma consiste nas partículas de combustível encaixadas em um cilindro de grafite, de 5 centímetros (cm) de comprimento e 1,2 cm de diâmetro, chamado de compacto que é posicionado em orifícios nos blocos hexagonais de grafite que formam o núcleo do reator. A segunda forma consiste nas partículas de combustível contidas em esferas de grafite chamadas de “*pebbles*” (Olander, 2009).

Uma das propostas para o VHTR é circular os *pebbles*: retirando-os da parte inferior do vaso do reator e introduzindo-os na parte superior. Os *pebbles* podem ser inspecionados visualmente para verificação de danos físicos e monitoramento do gasto através de radiação gama (Suppes; Storvick, 2007). O combustível ativo poderá ser utilizado novamente no VHTR.

A escolha do combustível nuclear tem grande influência no design do reator (Alesso *et al.*, 1981). Embora o urânio inicialmente seja considerado como combustível no processo de fissão, o plutônio e o tório também podem ser utilizados no funcionamento do VHTR (Brossard *et al.*, 2009).

Há dois ciclos básicos de combustível: um aberto e um fechado. O primeiro envolve a deposição final do



V.1, N.1, 2017

combustível utilizado. No segundo, o urânio residual e o plutônio produzidos voltam a ser utilizados na geração de energia, como óxido misto (MOx) (ANEEL, 2008). O VHTR utilizará o ciclo aberto do urânio, em que os *pebbles* circularão continuamente, pela força da gravidade, através do núcleo (MPR, 2004). Isso pode contribuir para a resistência à proliferação, devido à dificuldade de reprocessamento e à baixa radioatividade residual do combustível, que após passar por aproximadamente 10 vezes pelo reator, o torna inviável para a produção de armas (Penner *et al.*, 2008).

2.2 Conversão de energia

O VHTR poderá produzir 600 MW de energia térmica (Gauthier *et al.*, 2006). A energia térmica produzida pelo reator pode ser usado em diferentes aplicações como, por exemplo, geração de eletricidade e produção de hidrogênio. Há dois tipos principais de sistemas de geração de energia utilizados para converter vapor em trabalho: ciclo Rankine e ciclo Brayton.

Quase toda queima de carvão e planta de energia nuclear utiliza o ciclo Rankine para geração de eletricidade. O calor é aplicado externamente a um ciclo fechado por um fluido. O fluido aquecido passa através da turbina, e é condensado e

bombeado de volta ao trocador de calor. A eficiência desse processo depende da temperatura empregada.

O VHTR possuirá alta eficiência na produção de eletricidade, maior que 50% à uma temperatura de 1000°C, em comparação ao PBMR (reator de geração-III+) que gera aproximadamente 47% à 850°C (US DOE, 2002). Isso pôde ser comprovado através de um cálculo teórico com base em parâmetros preliminares do VHTR das eficiências térmicas teóricas no ciclo termodinâmico (~97%) e no ciclo Rankine (~50%).

2.3 Produção de hidrogênio no VHTR

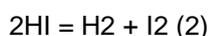
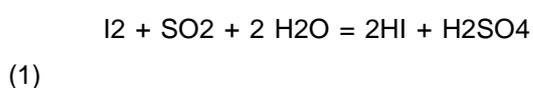
Com uso nuclear, o hidrogênio pode ser produzido eficientemente a partir de calor e água através de um processo termoquímico (iodo-enxofre) ou de eletrólise em alta temperatura ou com gás natural usando uma tecnologia de evaporação (Forsberg, 2003; Utgikar; Thiesen, 2006; Shin, 2007). Uma característica chave da eletrólise em alta temperatura e de muitos ciclos termodinâmicos é que todos eles possuem um estágio que necessita de temperaturas muito elevadas, maiores que 800°C (Elder; Allen, 2009). Devido à necessidade dessa alta temperatura, o



V.1, N.1, 2017

VHTR é a melhor opção de reator nuclear para a conexão na planta de hidrogênio.

O processo iodo-enxofre (IS) (Fig. 5) é um processo termoquímico usado como referência devido à sua alta eficiência. Esse processo é dividido em três reações químicas principais (Sakaba *et al.*, 2008):



A reação (1) é chamada de reação de Bunsen. É uma reação exotérmica que

produz iodeto de hidrogênio (HI) e ácido sulfúrico (H₂SO₄) através da água (H₂O), dióxido de enxofre (SO₂) e iodo (I₂) (Vitart *et al.*, 2006; Sakaba *et al.*, 2008). Os ácidos produzidos são decompostos pelas reações endotérmicas (2) (decomposição HI) e (3) (decomposição H₂SO₄) que produzem hidrogênio e oxigênio. O I₂ e SO₂ gerados nas reações (2) e (3), respectivamente, são reciclados na reação (1), formando um ciclo fechado (Sakaba *et al.*, 2008).

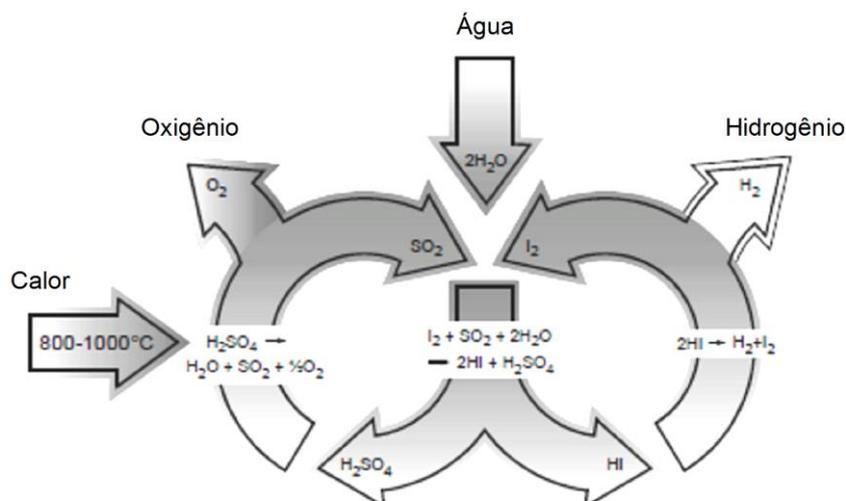


Figura 5 – Processo iodo-enxofre para formação de hidrogênio (FORSBERG, 2003).

Outro processo utilizado na produção de hidrogênio é a eletrólise da água em alta temperatura (Fig. 6) que possibilita a produção de hidrogênio sem as condições corrosivas de um processo termodinâmico. Nesse processo a água é

aquecida para formar vapor antes de entrar na célula de eletrólise. O vapor é fornecido para o lado do cátodo onde a voltagem dissocia o vapor em íons de hidrogênio e oxigênio. Os íons de oxigênio migram através do eletrólito para o ânodo onde



V.1, N.1, 2017

doam elétrons para formar o produto oxigênio (Elder; Allen, 2009).

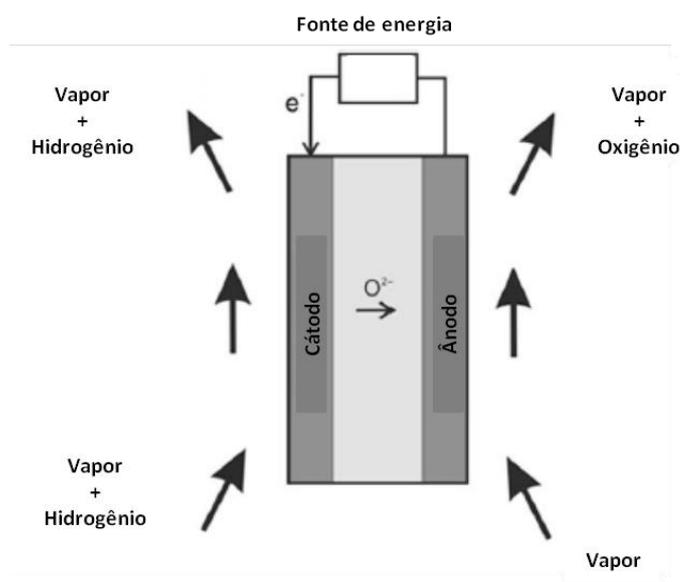


Figura 6 – Eletrólise em alta temperatura (Elder; Allen, 2009).

O processo consiste na produção de energia térmica pelo VHTR, geração de eletricidade, conversão de energia para eletrólise, dois trocadores de calor para fornecer energia térmica para o gerador de vapor super aquecido, alta temperatura de eletrólise para produção de hidrogênio a partir do vapor, condensador recuperador de calor, separador água-hidrogênio, e desumidificador para remover a água residual do hidrogênio (Shin, 2007).

A planta de hidrogênio deverá considerar o processo de produção de hidrogênio, a seleção de materiais apropriados para sua planta, o design e o

custo de seus componentes, e o custo específico de produção estimada de hidrogênio (Cerri *et al.*, 2010).

Quando acoplados a um reator nuclear de alta temperatura a planta de hidrogênio poderá ter uma eficiência de aproximadamente 50-60% na produção de hidrogênio tanto através de processos de eletrólise em alta temperatura ou de ciclos termoquímicos. Os reatores atualmente em funcionamento possuem eficiência de aproximadamente 35% na produção de hidrogênio utilizando eletrólise convencional (Sadhankar *et al.*, 2006).



V.1, N.1, 2017

2.4 Segurança

As medidas de segurança de uma planta nuclear são adotadas para garantir a proteção das pessoas e do meio ambiente contra o risco de liberação de substâncias radioativas durante a operação normal da planta ou em caso de acidentes.

Após a ocorrência de acidentes envolvendo centrais nucleares, como o acidente de Three Mile Island nos Estados Unidos em 1979 e o de Chernobyl na Ucrânia em 1986, a preocupação com a segurança durante a operação das usinas nucleares tornou-se maior.

Segundo Haque *et al.* (2006) os projetos de reatores de alta temperatura, como VHTR, são caracterizados pela segurança inerente em relação à remoção passiva de calor através de condução, radiação e convecção natural, sem a necessidade de bombeamento ativo.

O sistema de geração de energia dos reatores de geração IV tem como um de seus objetivos operar com baixa probabilidade de danos ao núcleo do reator e eliminar a necessidade de resposta à emergência fora da instalação (US DOE, 2002).

Os reatores de geração-IV possuirão monitoramento através de controle de reações químicas e nucleares, liberação da energia produzida, retenção de

produtos perigosos, proteção aos funcionários de operação, lançamento e redução de resíduos assegurando a proteção da população e do meio ambiente (Billot; Barbier, 2004). Além disso, as altas temperaturas necessárias para a produção de hidrogênio no VHTR fazem com que o controle dos sistemas de segurança sejam mais efetivos.

O design do combustível do VHTR com três camadas protegendo as partículas de combustível (TRISO) também é um sistema passivo de segurança que minimiza a liberação de trítio (^3H) produzido durante a operação do reator, suporta altas temperaturas (aproximadamente 2000°C) na ausência de refrigeração e é altamente resistente à corrosão (Forsberg, 2003; Penner *et al.*, 2008).

As válvulas de isolamento são um componente importante de segurança quando um reator nuclear é acoplado a uma planta de produção de hidrogênio. No caso de ruptura de algum encanamento é essencial o isolamento do circuito primário para evitar a liberação do hélio contaminado com os produtos de fissão (Elder; Allen, 2009).

O refrigerante hélio é quimicamente inerte e não se torna radioativo e, por isso, a perda de hélio não é um evento catastrófico. Todos os componentes do reator expostos ao hélio aquecido são de



V.1, N.1, 2017

grafite ou de materiais termicamente isolantes. A grafite possui resistência, inflamabilidade baixa e estabilidade em altas temperaturas, suportando aproximadamente 2300°C. A grafite utilizada em reatores nucleares reage muito lentamente com o oxigênio e pode ser classificada como não-inflamável. O reator não derrete em nenhuma circunstância (Penner *et al.*, 2008).

2.5 Impactos no meio ambiente

Das diversas formas de produção de eletricidade, a usina nuclear é uma das menos agressivas ao meio ambiente. Ainda assim, a possibilidade da unidade provocar grande impacto socioambiental é um dos aspectos mais controversos de sua construção e operação. Isto porque toda a cadeia produtiva do urânio, da extração à destinação dos dejetos derivados da operação da usina, é permeada pela radioatividade. Apesar disso, a energia nuclear é apontada como uma alternativa para expansão e diversificação da matriz energética mundial de forma a atender ao consumo crescente de energia, reduzir a dependência dos combustíveis fósseis, desenvolver imunidade à interrupção de fornecimento de energia, mitigar a volatilidade de custo de energia, mitigar o

aquecimento global através da redução da emissão dos gases que contribuem para o efeito estufa, reduzir a poluição atmosférica e preparar para a transição em direção à economia do hidrogênio (Adamantiades; Kessides, 2009; Aneel, 2008).

Os reatores de geração IV têm como um de seus objetivos a minimização e o gerenciamento dos resíduos nucleares aumentando a proteção à saúde da população e ao meio ambiente (US DOE, 2002).

O objetivo do programa de pesquisa e desenvolvimento do VHTR em relação ao ciclo do combustível envolve o desenvolvimento de tecnologias para o gerenciamento dos resíduos gerados com ênfase no gerenciamento da grafite (núcleo e combustível), disposição direta, e tratamento (remoção da cobertura) do combustível gasto. Em relação ao tratamento do combustível gasto, os estudos envolvem a desmontagem do elemento combustível e a dissolução das partículas de cobertura (Billot; Barbier, 2004).

Além disso, o VHTR fornecerá calor para a produção de hidrogênio, que é considerado um combustível limpo por sua combustão não emitir poluentes.

3 DISCUSSÃO



V.1, N.1, 2017

Atualmente há a crescente necessidade de produção de energia de acordo com os princípios de sustentabilidade. O uso da energia nuclear contribui para a diminuição do aquecimento global através da redução da dependência dos combustíveis fósseis e ausência de emissão de gases do efeito estufa, principalmente o dióxido de carbono, durante sua operação. Em comparação com algumas fontes de energia, a vantagem dos reatores nucleares é a produção de energia a uma taxa constante e baixo custo de operação. Porém, o destino dos resíduos nucleares e a constante preocupação com os acidentes, como o ocorrido em Fukushima, estão fazendo com que o futuro da energia nuclear seja repensado.

Os reatores de geração IV, como o VHTR, estão em pesquisa e desenvolvimento buscando a produção de eletricidade através de um sistema economicamente viável, resistente à proliferação, seguro e confiável, podendo ser utilizado para cogeração de hidrogênio.

Sua tecnologia será baseada na experiência com reatores de alta temperatura refrigerados a gás já existentes, como da GT-MHR. Contudo, necessitará de extensa pesquisa para o desenvolvimento de materiais que suportem temperaturas de aproximadamente 1000 °C.

As características do VHTR possibilitam que os objetivos propostos para os reatores de geração IV sejam alcançados. A escolha de materiais apropriados, como a grafite, que mantenham seu alto desempenho durante sua operação por um longo período e que sejam adequados ao seu funcionamento é uma parte importante do projeto para garantir o aumento na segurança e a resistência à proliferação.

A partícula de combustível também contribui para aumentar a segurança do reator devido a composição de suas diversas barreiras, que permitem que uma possível liberação de radiação ocorra de forma lenta e longa em caso de acidentes, diferentemente da liberação imediata que pode ocorrer nos LWRs. Para aumentar a segurança em caso de acidentes ou operação irregular do reator, há também o sistema passivo de refrigeração natural que mantém a temperatura abaixo do limite relacionado a liberação da radioatividade do combustível e dos produtos de fissão. Esse sistema passivo de refrigeração é uma das principais características que difere o VHTR do LWR.

Outra característica do VHTR que aumenta sua segurança é a configuração com um ciclo termodinâmico indireto que permite o uso do calor gerado no reator tanto para produção de energia elétrica



V.1, N.1, 2017

quanto para a produção de hidrogênio, minimizando a complexidade e o risco associado a parte nuclear do ciclo. Esse design elimina o potencial de contaminação do equipamento de geração de eletricidade ou de produção de hidrogênio por um radionuclídeo carregado com o hélio refrigerante, além de simplificar processos de manutenção e operação do sistema e permitir a escolha de outro meio refrigeração secundário, em substituição ao hélio (Gauthier *et al.*, 2006; El-Genk; Tournier, 2009).

Além da segurança e da proliferação nuclear, outra grande preocupação relacionada aos reatores nucleares é o destino dos resíduos radioativos. No VHTR os combustíveis gastos serão inspecionados e se ainda estiverem ativos poderão ser reutilizados no reator.

Um dos objetivos do sistema de geração de energia dos reatores de geração IV é fornecer geração de energia sustentável relacionada à baixa emissão de poluentes (US DOE, 2002). Comparada aos combustíveis fósseis, a energia nuclear produz quase nenhum poluente atmosférico. Pequenas quantidades de gases radioativos são emitidos regularmente em condições controladas, mas são supervisionadas pelas autoridades e não oferecem perigo aos trabalhadores e

à população (Adamantiades; Kessides, 2009).

O VHTR está sendo projetado para operar com temperaturas de 500 a 700 °C superiores em relação aos reatores em uso atualmente, o que permite a geração de eletricidade com uma eficiência de conversão de aproximadamente 50% comparada aos 30-33% dos LWRs tradicionais (geração II) (Ingersoll, 2009). Essa taxa de eficiência foi confirmada por cálculos teóricos, realizados com base em dados de Gauthier *et al.* (2006), mostrando a eficiência da conversão de energia do VHTR utilizando o ciclo de Rankine. Porém, o cálculo realizado baseado no ciclo de Carnot mostrou que a eficiência máxima que o reator pode alcançar é de 97,3%. A eficiência do ciclo de Carnot é teórica e consiste na máxima eficiência que se pode atingir e, por isso, é utilizada como parâmetro para balizar um projeto de um reator nuclear, como o VHTR. Essa eficiência pode ser elevada com alterações no projeto e melhorias na operação do reator.

Devido a possibilidade de produção de grande quantidade de hidrogênio o VHTR poderá contribuir para a formação da economia do hidrogênio no futuro. Estudos indicam que através do processo iodo-enxofre pode-se obter até 60% de eficiência na produção de hidrogênio quando utilizadas



V.1, N.1, 2017

temperaturas de aproximadamente 1000 °C (Baccaglioni *et al.*, 2003).

Prevê-se que a demanda global de energia cresça cerca de 60% nos próximos vinte 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.

O conceito de “economia do hidrogênio” originou-se no início dos anos 1970. Na economia do hidrogênio uma parte substancial da energia é fornecida pelo hidrogênio produzido a partir de fontes que não contribuem para o efeito estufa (Lattin; Utgikar, 2007). A produção econômica e limpa do hidrogênio permanece como o maior desafio da concretização de uma economia do hidrogênio (Lepecki, 2011).

O hidrogênio tem o potencial de resolver alguns dos maiores desafios de energia: redução da dependência das reservas de combustível fóssil, poluição e emissão de gases do efeito estufa.

4 CONCLUSÕES

Através desse trabalho pode-se concluir que o VHTR pode ser uma fonte de geração de energia viável para ser utilizada

no futuro e o estudo de suas características pode contribuir para o desenvolvimento de tecnologias que possibilitem uma eficiente cogeração de hidrogênio e eletricidade, aumento da segurança de operação dos reatores nucleares e redução dos impactos ao meio ambiente causados pela geração de energia.

REFERÊNCIAS

ABRAM, T.; ION, S. Generation-IV nuclear power: a review of the state of the science. **Energy Policy**, v. 36 p. 4323-30, 2008.

ADAMANTIADES, A.; KESSIDES, I. Nuclear power for sustainable development: current status and future prospects. **Energy Policy**, v. 37, p. 5149-66, 2009.

ALESSO, H.P. Proven commercial reactor types: an introduction to their principal advantages and disadvantages. **Energy**, v. 6, p. 543-54, 1981.

Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica. 3. ed. Brasília: Aneel, 2008.

BACCAGLINI, G.; BALL, S.; BURCHELL, T.; *et al.* Very High Temperature Reactor (VHTR) – Survey of Materials Research and



V.1, N.1, 2017

Development Needs to Support Early Deployment. **Generation IV Nuclear Energy Systems**, p. 6-52, 2003.

BAKER, D.E. Graphite as a neutron moderator and reflector material. **Nuclear Engineering and Design**, v. 14, p. 413-44, 1970.

BECK, P.W. Nuclear energy in the twenty-first century: examination of a contentious subject. Annu. **Rev. Energy Environ**, v. 24, p. 113-37, 1999.

BILLOT, P.; BARBIER, D. **Very high temperature reactor (VHTR) the French atomic energy commission (CEA) R&D program**. 2nd Int Topical Meeting on high temperature reactor technology, Beijing, China, p.22-24, 2004
BROSSARD, P.; ABRAM, T.J.; PETTI, D.; et. al. **The VHTR fuel and fuel cycle project: status of ongoing research and results**. GIF Symposium, Paris, França, p.9-10, 2009.

CARAJILESCOV, P.; MOREIRA, J.M. L. Aspectos técnicos, econômicos e sociais do uso pacífico da energia nuclear. **Ciênc. cult. (São Paulo)**, v. 60, n3, p. 33-36, 2008.

CERRI, G.; SALVINI, C.; CORGNALE, C.; et al. Sulfur-Iodine plant for large scale hydrogen production by nuclear power.

International Journal of Hydrogen Energy, v.35, p. 4002-14, 2010.

ELDER, R.; ALLEN, R. Nuclear heat for hydrogen production: coupling a very high/high temperature reactor to a hydrogen production plant. **Progress in Nuclear Energy**, v. 51 p. 500-25, 2009.

EL-GENK, M.S.; TOURNIER, J.M. Performance analyses of VHTR plants with direct and indirect closed Brayton cycles and different working fluids. **Progress in Nuclear Energy**, v. 51 p. 556-72, 2009.

FORSBERG, C.W. Hydrogen, nuclear energy, and the advanced high-temperature reactor. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 28, p. 1073-108, 2003.

GAUTHIER, J.; BRINKMANN, G.; COPSEY, B.; et. al. ANTARES: tHTR/VHTR project at Framatome ANP. **Nuclear Engineering and Design**, v. 236, p. 526-33, 2006.

GENERAL ATOMICS. **Screening tests for selection of VHTR advanced fuel**. U.S: Department of energy, p. 29-320, 2001.

GOLDBERG, S.M.; ROSNER, R. **Nuclear reactors: generation to generation**. American Academy of Arts and Sciences. 2011. 25p.



V.1, N.1, 2017

HAQUE, H.; FELTES, W.; BRINKMANN, G. Thermal response of a modular high temperature reactor during passive cooldown under pressurized and depressurized conditions. **Nuclear Engineering and Design**, v. 236, p. 475-484, 2006.

HOFFELNER, W. Materials for the very high temperature reactor (VHTR): a versatile nuclear power station for combined cycle electricity and heat production. **Chimia**, v. 59, p. 977-82, 2005.

INGERSOL, D.T. Deliberately small reactors and the second nuclear era. **Progress in Nuclear Energy**, v. 51, p. 589-603, 2009.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). World Energy Outlook 2013. p. 1-7, 2013.

IYOKU, T.; UETA, S.; SUMITA, J.; et. al. Design of core components. **Nuclear Engineering and Design**, v. 233, p. 71-79, 2004.

KISSANE, M.P. A review of radionuclide behavior in the primary system of a very-high-temperature reactor. **Nuclear**

Engineering and Design, v. 239, p. 3076-91, 2009.

LATTIN, W.C; UTGIKAR, V.P. Transition to hydrogen economy in the United States: a 2006 status report. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 32, p. 3230-37, 2007.

LEPECKI, W. **A energia nuclear e a economia do hidrogênio**. Instituto Nacional de Eficiência Energética (INEE). Disponível em: <<http://www.inee.org.br>>. Acesso em: 02 de outubro de 2011.

MARCUS, G.H. Considering the next generation of nuclear power plants. **Progress in Nuclear Energy**, v. 37, n. 1-4, p. 5-10, 2000.

MARSHALL, A.C. **An assessment of reactor types for thermochemical hydrogen production**. Sandia National Laboratories Report , Albuquerque, NM, 2002.

MEGAHED, M.M. Nuclear desalination: history and prospects. **Desalination**, v.135, p. 169-185, 2001.

MINATO, K.; OGAWA, T.; FUKUDA, K.; et. al.. Fission product behavior in TRISO-coated UO₂ fuel particles. **Journal of Nuclear Materials**, v. 208, p. 266-281, 1994.



V.1, N.1, 2017

MPR. Associates, Inc. **The Very High Temperature Reactor:** a Technical Summary. 2004. 47 p.

MURTY, K.L.; CHARIT, I. Structural materials for Gen-IV nuclear reactors: challenges and opportunities. **Journal of Nuclear Materials**, v. 383, p. 189-195, 2008.

OLANDER, D. Nuclear fuels – Present and future. **Journal of Nuclear Materials**, v. 389, p. 1-22, 2009.

PENNER, S.S.; SEISER, R.; SCHULTZ, K.R. Steps toward passively safe, proliferation-resistant nuclear power. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 34, p. 275-287, 2008.

PETTI, D.A.; DOLAN, T.J.; MILLER, G.K.; .et. al. **Modular Pebble-bed Reactor Project** – Annual Report, Idaho National Laboratory, 2002.

PIERA, M. Sustainability issues in the development of Nuclear Fission energy. **Energy Conversion and Management**, v. 51, p. 938-46, 2010.

RODRIGUEZ, S.B.; EL-GENK, M.S. Numerical investigation of potential elimination of ‘hot streaking’ and stratification in the VHTR lower plenum

using helicoid inserts. **Nuclear Engineering and Design**, v. 240, p. 995-1004, 2010.

SADHANKAR, R.R.; LI, J.; LI, H.; ;et. al. **Future hydrogen production using nuclear reactors.** Ottawa, ON. . IEEE, p. 1-9, 2006.

SAKABA, N.; HAMAMOTO, S.; TAKEDA, Y. Helium chemistry for very high temperature reactors. **Journal of Nuclear Science and Technology**, v. 47, p. 269-977, 2010.

SAKABA, N.; SATO, H.; OHASHI, H.; et. al. Development scenario of the iodine-sulphur hydrogen production process to be coupled with VHTR system as a conventional chemical plant. **Journal of Nuclear Science and Technology**, v. 45, p. 962-969, 2008.

SHIN, Y.; PARK, W.; CHANG, J; PARK, J. Evaluation of the high temperature electrolysis of steam to produce hydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 32, p. 1486-91, 2007.

STOSIC, Z.V.; BRETTSCUHH, W.; STOLL, U. Boiling water reactor with innovative safety concept: The Generation III+ SWR-1000. **Nuclear Engineering and Design**, v. 238, p. 1863-1901, 2008.



V.1, N.1, 2017

SUPPES, G.J.; STORVICK, T.S. **Nuclear power plant design**. Sustainable Nuclear Power, p. 319-351, 2007.

TALAMO, A. Prediction of TRISO coated particle performances for a one-pass deep burn. **Journal of Nuclear Materials**, v. 373, p. 407-414, 2008.

TAN, L.; ALLEN, T.R.; HUNN, J.D.; MILLER, J.H. EBSD for microstructure and property characterization of the SiC-coating in TRISO fuel particles. **Journal of Nuclear Materials**, v. 372, p. 400-404, 2008.

UTGIKAR, V.; THIESEN, T. Life cycle assessment of high temperature electrolysis for hydrogen production via nuclear energy. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 31, p. 939 - 944, 2006.

VITART, X.; LE DUIGOU, A.; CARLES, P. Hydrogen production using the sulfur-iodine cycle coupled to a VHTR: an overview. **Energy Conversion and Management**, v. 47, p. 2740-47, 2006.

ZINKLE, S.J.; BUSBY, J.T. Structural materials for fission and fusion energy. **Materials Today**, v. 12, p. 12-19, 2009.