

Sistema de Cogeração entre uma Usina de Dessalinização e um Reator Nuclear a Fusão

Cogeneration System between a Plant of Desalination and a Nuclear Reactor to Fusion

¹Sinesio Salles, ²Vanessa Madrona Moreira

¹ REDEMAT - Universidade Federal de Ouro Preto UFOP/UEMG (sinesio.salles@bol.com.br)

²Professora Doutora na Universidade FUMEC

RESUMO: A solução que será analisada é de um sistema de cogeração de uma usina de dessalinização de água do mar com um reator de fusão, onde se busca estabelecer o *lay-out* da instalação, os sistemas de interface entre as duas usinas, os parâmetros de sincronismo, e o controle dos riscos de falha. Os volumes de água doce e salgada no planeta Terra são respectivamente de 2,5% para 97,5%. Para o volume de água doce, apenas 1% se encontra disponível na superfície, o restante está no subsolo ou nas calotas polares. Os sinais de falta de energia e de falta de água potável já começam a aparecer. Atualmente 20% da população mundial não tem acesso à água potável. O aumento demográfico somado ao aumento da demanda per capita trará uma tendência de crescimento cada vez maior destas duas crises. A previsão para as próximas décadas é de duplicação das demandas, e fica cada vez mais óbvio que a solução não poderá ser apenas dobrar o atual modelo de produção. Novas técnicas deverão ser criadas para que surjam novos padrões de atendimento destas demandas.

Palavras-chave: Energia; cogeração; dessalinização; fusão.

ABSTRACT: The solution that will be analysed is of a cogeneration system of a water desalination plant with a fusion reactor, where there is looked to establish the lay-out of the installation, the interface systems between two factories, the parameters of synchronism, and the control of the risks of fault. The volumes of water fresh and salted in the planet Land are respectively of 2,5% for 97,5%. For the fresh water volume, only 1% is available in the surface, the derision the underground or in the polar hubcaps. The sign so flack of energy an do flack of drinkable water begin to appear already. At present 20% of the world-wide population has no access to the drinkable water. The demographic increase added up to the increase of the demand percapita will bring a tendency of grow the very time bigger of these two crises. The foresight for next decades is of duplication of the demands, and it is more and more obvious than the solution will not be able to be hardly it will double the current model of production. New techniques will have to be raised so that there appear new standards of service of these demands.

Keywords: Energy; cogeneration; desalination; fusion.

INTRODUÇÃO

As tecnologias atuais mais utilizadas em dessalinização têm sistemas que são bastante eficientes para a produção de água potável, viáveis técnica e economicamente para o suprimento de água para o consumo humano. Existem mais de 16.000 usinas que usam diferentes processos: destilação, evaporação, membranas e ionização.

Em se tratando do consumo de água, tem-se de considerar que o consumo global futuro, considerando a água virtual, é estimado em 3.400 litros por dia e por pessoa. A solução de cogeração entre a produção de energia por um reator nuclear de fissão com a dessalinização, já está sendo adotada. Assim sendo, uma análise preliminar com um reator de fusão também se faz necessária, para que se tenha uma comparação da adequação e da eficiência entre estas duas possibilidades de cogeração. Observa-se na

prática que a cogeração na dessalinização, impede que se perca parte do vapor da turbina, pois metade da potência térmica do reator irá gerar eletricidade, enquanto a outra metade será utilizada na planta de dessalinização de água do mar.

Sabe-se que a potência total esperada para o reator protótipo ITER será de 120 MW, e para o segundo reator de licenciamento (DEMO) será de 1.000 MWe. A quantidade dos combustíveis para uma usina fornecer energia elétrica para uma cidade de um milhão de habitantes, durante um ano, cabe em um veículo pequeno. E isto é conseguido com a utilização de sistemas de diagnósticos e ao uso de campos magnéticos conseguidos através de bobinas com material supercondutor. A avaliação sobre a comparação entre as soluções de cogeração de um reator de fissão ou de um reator de fusão está focada em alguns aspectos, como eficiência, durabilidade, custos, capacidade, planos de manutenção e análise de riscos de falhas potenciais.

DESSALINIZAÇÃO

As estimativas atuais reportam que 20% da população mundial não tem acesso às fontes de água potável. Estes números tendem a crescer com o aumento da população relativamente aos recursos disponíveis.

A capacidade mundial atual é de 80 milhões de m³ por dia, realizada por 16.500 centrais. Mas até o momento, menos de 15 estações de dessalinização em todo o mundo, fazem cogeração com usinas nucleares comerciais, o que representa menos de 0,1% da capacidade global de dessalinização. Exemplos podem ser encontrados na Indonésia, Argentina, Tunísia, Paquistão, Índia, Marrocos, Egito, Rússia e China, entre outros.

Alguns dos dados usados no projeto da unidade de dessalinização são a temperatura da salmoura de 110°C, vida útil da usina de 40 anos e média de temperatura da água do mar de 21°C.

Os novos desenvolvimentos são baseados na geração III de reatores nucleares a fissão, com potências entre 1100-1700 MW. Esta opção de cogeração já foi estudada pelo Japão, Cazaquistão, Índia, Paquistão, e há vários outros países que estão realizando estudos de viabilidade.

Figura 1: Usina de dessalinização de Dubai



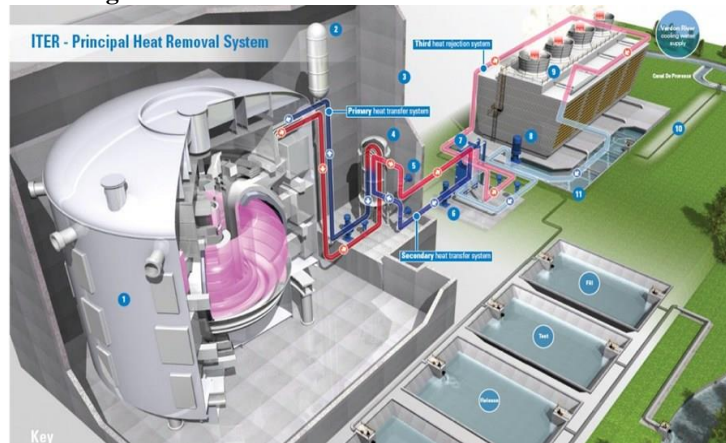
GERAÇÃO DE ENERGIA EM REATOR DE FUSÃO

Em 2005, alguns países tomaram a decisão de construir, em Cadarache, na França, o Tokamak do projeto ITER (Reator Termonuclear Experimental Internacional). O reator ITER é um marco nas pesquisas sobre a energia de fusão. Ele irá fornecer o

primeiro dispositivo experimental, para sustentar um plasma em combustão termonuclear. Produzir grandes quantidades de energia de forma segura, com muito pouco combustível, é o desafio da fusão por confinamento magnético. Teoricamente, a fusão de menos de um quilograma por dia de deutério e trítio pode produzir a produzir 1,0 MW de potência contínua.

Embora raro na Terra, plasma é o estado mais comum da matéria no Universo. Na década de 1960, pesquisadores russos, desenvolveram uma máquina capaz de criar e confinar plasma quente (150 milhões de °C) em uma gaiola magnética, em forma anel: o Tokamak, sigla em russo para Kamera Toroidalnaya Magnitnymi Katushkami. A densidade do material no plasma é da ordem de 1.000 partículas por m³, de modo que a probabilidade de fundir os núcleos é suficiente. As instalações para pesquisa ITER foi desenhado para conseguir um fator de amplificação de 10, que irá fornecer 400 MW de potência a partir de uma potência injetada de 40 MW.

Figura 2: Reator ITER e com os seus fluxos térmicos.



O melhor desempenho obtido em uma máquina de fusão magnética, conseguiu-se um fator de amplificação de 0,65. Foi obtido no Tokamak JET (*Joint European Torus*), em Culham (Reino Unido), o que gerou, em 1996, cerca de 16 megawatts por 1s. *Tore Supra Tokamak* é o único equipamento com ímãs supercondutores.

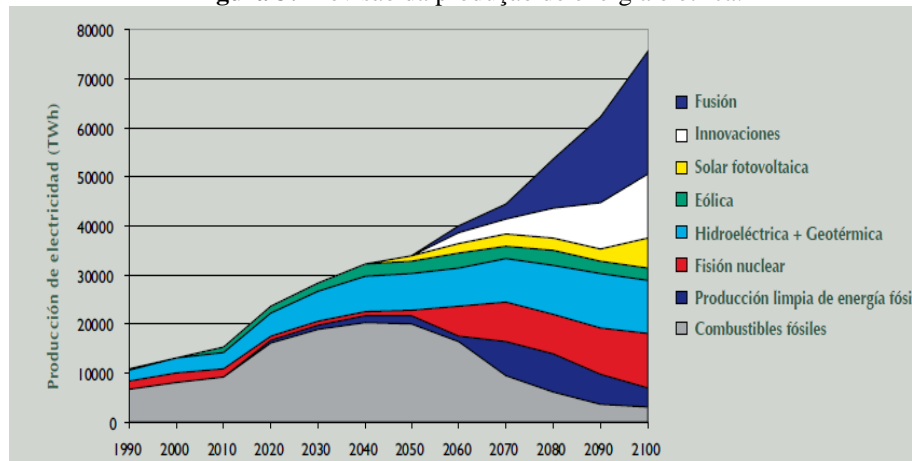
DEMO é o nome dado ao conceito de reator de fusão termonuclear para produzir eletricidade, que irá entrar em funcionamento em 2040, com os mesmos parceiros do ITER. O fluxo de calor incidente nas paredes laterais de um reator de fusão de plasma, é de cerca de 0,5 MW/m². Os nêutrons altamente energéticos das reações de fusão (14 MeV) que bombardeiam o material da parede do reator, poderão criar defeitos estruturais.

O projeto ITER está sob os auspícios da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA). Este programa, com grandes e pequenos laboratórios tentando alcançar um objetivo comum, tem levado a um grande domínio da investigação da fusão por confinamento magnético. Nos aparelhos Tokamak, o plasma atua como o secundário de um transformador (o primário é uma bobina externa), e uma mudança de corrente no primário induz uma corrente no plasma. A corrente de plasma não só produz um campo que ajuda a confinar o plasma, mas também fornece aquecimento, devido à resistência elétrica do plasma.

Para se entender como criar um reator de fusão é necessário compreender os processos que ocorrem no plasma. Isto é conseguido pela a utilização de sistemas de medição sofisticados e complexos chamados de diagnósticos. Estes diagnósticos são capazes de monitorizar cada aspecto do plasma a partir da temperatura no seu centro,

utilizando lasers de potência. O trítio (um radioisótopo do hidrogênio) tem uma vida-média de 12,6 anos, e o seu decaimento produz um elétron de energia muito baixa (radiação beta). No ar, este elétron pode mover-se apenas alguns milímetros e nem sequer pode penetrar numa folha de papel. Não obstante, o trítio é prejudicial se entrar no corpo humano, e por isso as centrais de potência de fusão são projetadas com procedimentos adequados de segurança para o manuseamento do trítio.

Figura 3: Previsão da produção de energia elétrica.



O conjunto completo dos requisitos de engenharia para os sistemas de diagnóstico que serão implementados no DEMO, deverão operar em um modo robusto, garantindo vida longa e manutenção em um ambiente bastante hostil. Os Tokamaks que operam atualmente têm requisitos de engenharia muito onerosos para satisfazer os órgãos reguladores nucleares e ambientais, e em relação à segurança humana.

O protótipo ITER será a primeira máquina de pesquisa de fusão nuclear a impor um aquecimento significativo em componentes e, assim, as disposições de arrefecimento devem ser feitas com um bom resfriamento ativo. O reator DEMO terá temperaturas operacionais muito maiores, a fim de alcançar uma alta eficiência no ciclo de Carnot.

Certos tipos de tarefas de manipulação à distância deverão ser concebidos para permitir os diagnósticos do plasma, para limpeza, substituição de partes, em calibrações ou troca de módulos. O grau de sofisticação pretendido no monitoramento e controle do reator deverá ser amortizado de cada unidade de energia vendida aos usuários. Três materiais estruturais importantes que podem satisfazer os requisitos são os aços ferríticos-martensíticos, ligas de vanádio e compósitos cerâmicos SiC. Os aços ferríticos-martensítico são os materiais de referência estruturais para os componentes do reator. Um programa experimental de validação e teste será essencial para identificar e eliminar erros potencialmente envolvidos em um novo conceito. Outra parte significativa da estratégia é assegurar a disponibilidade de conhecimentos, equipamentos e gestão baseada no conhecimento de recursos financeiros e humanos.

COGERAÇÃO ENTRE UM REATOR DE FUSÃO E UMA USINA DE DESSALINIZAÇÃO

Faz-se a seguinte definição dos parâmetros da proposta de solução de cogeração entre o processo de dessalinização e um reator de fusão:

- Reator de fusão com 1.700 MW,

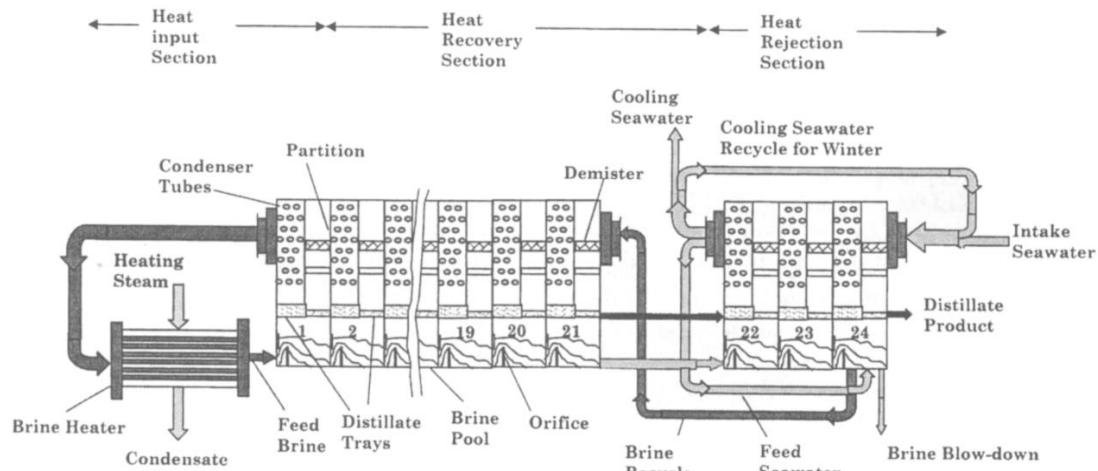
- Turbina a gás - ciclo Brayton,
- Temperatura na entrada da turbina: 1.150°C,
- Eficiência da turbina de 60%,
- Produção de energia de 1.020 MW,
- Dessalinização a uma potência de 558 MW,
- Produção de 1.500 kg/s de água dessalinizada,
- Eficiência global de 92,8%,
- Temperatura média da água do mar de 21°C,
- Temperatura da salmoura de 110°C,
- Concentração na água do mar: 34 partes por mil,
- Concentração de sal da água produzida: 10 ppm,
- Consumo energético de 372 kJ por kg de água potável.

$$\dot{q} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T \quad (1)$$

- Diferença de temperatura: $\Delta T = 89\text{K}$
- Potência, $\dot{q} = 558 \text{ MW}$
- Calor específico da água: $c = 4182 \text{ J/kg.K}$
- $\dot{m} = 1.500 \text{ kg/s}$

A dessalinização estará a uma pressão e a uma temperatura dentro da condição de evaporação, de tal forma que as bolhas de vapor d'água irão colapsar logo depois de serem formadas. Mas estas poucas bolhas ajudarão na transferência de calor para a salmoura.

Figura 4: Processo de dessalinização multiestágios.



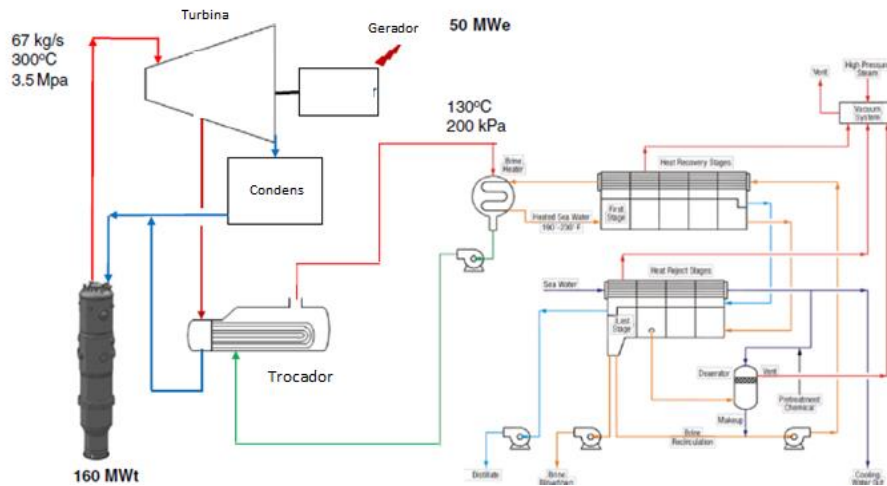
ANÁLISE DOS SISTEMAS DE INTERFACE ENTRE AS DUAS USINAS

As instalações do processo de dessalinização ocupam a posição onde antes era montado o condensador de calor de um reator de produção de energia convencional. Na figura 5, tem-se um esquema dos circuitos que evidencia de maneira imediata o funcionamento geral do sistema de cogeração.

A turbina Brayton tem uma eficiência na faixa dos 60%, com a diferença energética sendo usada na dessalinização. O trocador de calor para a dessalinização tem

um alto rendimento, por ser um equipamento bastante evoluído, sem perdas desnecessárias, operando com eficiência por volta de 95%.

Figura 5: Diagrama do processo de dessalinização com um pequeno reator.



ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE SINCRONISMO

O sincronismo normal esperado para a operação é de uma maior produção de energia elétrica durante o dia e a reversão para uma maior produção de água potável durante a noite. Estas variações de demanda irão depender das necessidades dos clientes de onde vier a ser instalado este sistema de cogeração.

CONTROLE DOS RISCOS DE FALHAS

Das análises já realizadas pelos cientistas e engenheiros sobre o processo de fusão, pode-se enfatizar que os riscos de falha sejam menores, em comparação com o reator de fissão. Dentro do reator tem-se volume mínimo de combustível, aproximadamente, algumas gramas para todo o reator, em se tratando de plasmas. Onde uma redução da temperatura do plasma ou uma redução do fluxo de combustível levam a uma parada instantânea do reator. Com relação aos rejeitos radioativos, também os riscos são menores, visto que apenas o trítio deverá ser monitorado, com pequenos volumes - dezenas de metros cúbicos por ano - e com vida-média de 12,6 anos. São listados a seguir, a título de exemplo, alguns tipos de riscos de falhas potenciais:

Falhas externas:

- Furacões;
- Movimentos sísmicos;
- Sabotagem;
- Acidente de trânsito no transporte de material radioativo;
- Problema de blindagem do transporte de material radioativo;

Falhas internas:

- Perda do suprimento de potência elétrica;
- Perda de vazão do refrigerante;
- Sobre temperatura nos circuitos de refrigeração;

- Falha de válvula;
- Falha de bomba;
- Vazamento de radioatividade;
- Incêndio nas instalações da usina;
- Embalagens contaminadas
- Falha no uso dos equipamentos de proteção;
- Falha dos sistemas de monitoração;
- Falha de blindagens;
- Falha de manutenção das instalações da usina;
- Problema de especificação do combustível.

Estes riscos de falhas potenciais serão analisados exaustivamente para que procedimentos de segurança sejam elaborados e aplicados em treinamentos de operação.

COGERAÇÃO DE UM REATOR DE FISSÃO

Para comparação entre as soluções de cogeração com um reator de fissão e a solução de cogeração com o reator de fusão, utilizou-se os seguintes parâmetros do estudo de XING (2010):

- Reator modelo GTHTR300 de IV geração com 600 MW,
- Turbina a gás - ciclo Brayton,
- Produção de energia de 280 MWe,
- Dessalinização por processo MSF de 248 MW - 56.000 m³/dia,
- Eficiência global de 88%,
- Temperatura média da água do mar de 21°C,
- Temperatura da salmoura de 110°C,
- Concentração de sal da água do mar: 34 partes por mil,
- Concentração de sal da água produzida: 10 partes por milhão,
- Temperatura na saída do reator: 850°C,
- Consumo energético de 372 kJ por kg de água potável,
- Custo de produção: US\$ 0,89/m³.

Com:

- $\Delta T = 89K$
- Potência = 248 MW
- Calor específico da água: $c = 4182 J/kg.K$
- $\dot{m} = 665 kg/s$

“Observa-se que, na prática, que a cogeração na dessalinização, impede que se perca parte do vapor da turbina, pois metade da potência térmica do reator irá gerar eletricidade, enquanto a outra parte será utilizada na planta de dessalinização da água do mar. Novos processos produzem 45 % a mais de água que nos processos tradicionais, operando no mesmo intervalo de temperaturas, produzindo até 56.000 m³ de água e gerando mais 280 MWe de potência elétrica. A cogeração oferece a vantagem de aumentar a utilização global da energia térmica do reator. De acordo com estudos europeus, a cogeração dobra a utilização de energia térmica” (XING, 2010).

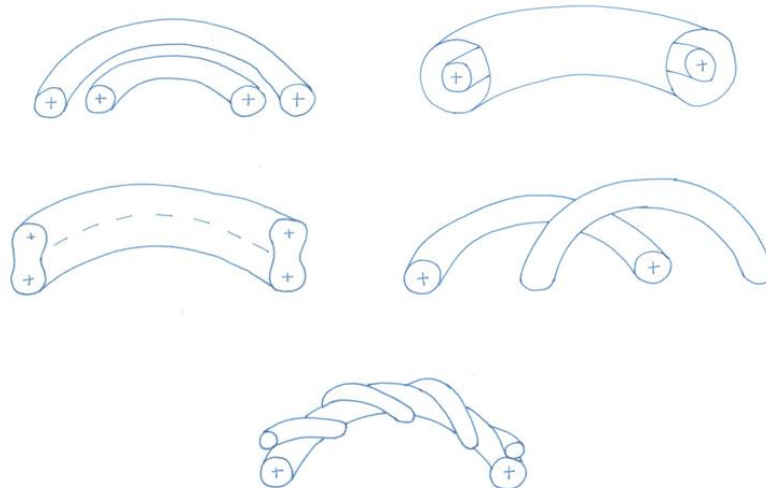
ESTUDOS FUTUROS

No processo de fusão dentro do Tokamak, uma questão bastante relevante é sobre a produção das duas reações fundamentais, quais sejam:

- transformação do hidrogênio em deutério e trítio,
- transformação de deutério e trítio em hélio.

No projeto do reator protótipo ITER, a produção do deutério está prevista para ocorrer em sistema distinto. Dentro do Tokamak está prevista uma reação de produção parcial pela transformação do lítio em trítio, através do bombardeamento de nêutrons excedentes. Durante a pesquisa feita para este artigo ocorreu, aos autores, uma ideia como uma proposta para estudos futuros. Seria uma proposta de novos campos magnéticos para a ocorrência das reações fundamentais de uma forma mais simbiótica. Ou seja, que os nêutrons gerados na produção do hélio, fossem usados em reações para a produção parcial, com a transformação de hidrogênio em deutério e trítio.

Figura 6: Esboços de fluxos em posições: coplanar, concêntrica, paralelo, 90 graus e hélice



CONCLUSÃO

Em se tratando da física elementar, a eficiência do processo de fusão é 4 vezes maior do que a fissão, com respeito a geração de energia por unidade de massa de combustível. O reator de fusão tende a ser normalmente de grandes dimensões, com potências superiores a 1.000 MW. Isto trará um resultado de economia, por uma melhor eficiência operacional, com conseqüente redução de custo do kWh.

A vida-útil dos reatores de fissão está atualmente entre 40 e 60 anos. Para os reatores de fusão espera-se por uma durabilidade igual ou maior, devido a um planejamento de manutenção robotizado, que já é uma preocupação desde o início do projeto, com um grande investimento em equipamentos, trazendo inerentemente uma maior assertividade dos procedimentos. Os riscos de falha são menores, em comparação com o reator de fissão, e os estudos em andamento ressaltam que em caso de instabilidades do reator, quaisquer que sejam, serão bem controláveis por uma completa malha de diagnósticos. E com a vida-média de 12,6 anos do trítio, isto tem um impacto importante com relação a armazenamento de rejeitos.

REFERÊNCIAS

LUCAS, M., TABOURIER, B., The mechanical vapour compression process applied to seawater desalination : a 1,500 ton/day unit installed in the nuclear power plant of flamanville. *Desalination*, 52 - 19851123-133, 2012.

FALBLSH, R.S., ETTOUNEY H., MSF nuclear desalination. *Desalination*, 157 (2003) 277-287, January 2003.

WEIHUA, L., YAJUN, Z., WENXIANG, Z., Investigation on three seawater desalination processes coupled with NHR-200, Tsinghua University. *Desalination*, 298 (2012) 93–98, June 2012.

INGERSOLL, D.T., HOUGHTON, Z.J., BROMMB, R., DESPORTES C., NuScale small modular reactor for Co-generation of electricity and water. *Desalination*, 340 (2014) 84–93, March 2014.

AKAHOA, E.H.K., NYARKOB, B.J.B., YAMOAHB, S., Modeling and simulation of cogeneration nuclear power plant for seawater desalination. *Nuclear Engineering and Design*, 242, 143– 147, September 2011.

ALONSO, G., VARGAS, S., del VALLE, E., RAMIREZ, R., Alternativas de dessalinização da água do mar usando energia nuclear. *Nuclear Engineering and Design*, 245 (2012) 39-48, México, 2012.

XING Y.,*et al.* Estudo de um sistema de dessalinização para utilização de uma usina nuclear de fissão, Japan Atomic Energy Agency, International journal of energy research, 2012.

LAVEISSIÈRE, S., Fusion thermonucléaire : Le projet WEST au CEA de Cadarache, banc d'essai pour ITER, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, Septembre 2013.

KLOTZ, G., Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, Direction de la communication Bâtiment, ISSN 1637-5408, 2013.