

## Conversão de Energia Nuclear

Prof. Dr. Otavio de Mattos Silvares  
Reitor do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia

A conversão de energia nuclear pode ter como origem transformações produzidas no núcleo de átomos. Essas transformações podem ser devidas à fusão de dois núcleos de átomos chamados leves, baixo número atômico, formando um átomo mais pesado, ou pela ruptura ou fissão de um núcleo de átomo pesado formando dois ou mais núcleos mais leves.

Nos dois casos, há uma liberação de energia sob a forma de calor devida à redução da massa dos produtos da reação em relação à massa dos reagentes.

A primeira reação de fusão nuclear foi realizada em laboratório em 1920 e o estudo sistemático da fusão iniciou-se durante a Segunda Guerra Mundial, com forte participação de Ernest Rutherford.

Hoje, encontra-se em desenvolvimento um projeto e construção de um protótipo de reator, o ITER – International Thermonuclear Experimental Reactor, num esforço técnico-científico para produzir uma instalação capaz de gerar 500MW de potência por fusão nuclear. O projeto iniciou-se em 1992 com a participação do Reino Unido, dos EUA, da União Europeia, Rússia e Japão e, hoje, participam também a Coreia, China e Índia. O ITER será construído na França e o final da construção está previsto para 2016.

As primeiras experiências que evidenciaram a fusão nuclear foram publicadas na revista “*Naturwissenschaften*”, em dezembro de 1932, pelos pesquisadores do Instituto de Química Kaiser Wilhelm de Berlin, Otto Hahn (Prêmio Nobel de Química de 1944) e Fritz Strassmann. Eles procederam ao bombardeio de núcleo de urânio por nêutron e obtiveram núcleos mais leves como bário, o que indicava a ruptura do núcleo original.

Em decorrência dessas reações, tanto de fusão como de fissão, observa-se a redução de massa dos produtos em relação à massa dos átomos reagentes.

Como exemplo, podemos considerar a reação envolvendo o elemento físsil Urânia 235. O bombardeamento do núcleo deste átomo por um nêutron pode produzir um átomo de Xenônio, um átomo de Estrôncio e dois neutrons, ou um de Bário e um de Kriptônio e dois neutrons.

Considerando a segunda reação, temos:



Os números subscritos referem-se ao número atômico do elemento; os superescritos, à massa atômica em unidades atômicas de massa (uam) em valores arredondados.

Considerando os valores mais exatos das massas envolvidas, temos:

$$\text{Urânia 235} \rightarrow m=235,0439 \text{ uam}$$

$$\text{nêutron} \rightarrow m=1,00867 \text{ uam}$$

Bário 137 → m=136,9061 uam

Kriptônio 97 → m= 96,9212 uam

Assim, a massa dos reagentes (Urânio mais nêutron) é de 236,0526 uam e dos produtos, 235,8466 uam. Uma redução  $\Delta m = -0,2080$  uam.

Ou seja, na reação nuclear analisada, ao contrário das reações químicas, a massa não se conserva. Ocorre conversão de massa em energia que pode ser avaliada pela Lei proposta por Einstein:

$$\Delta \text{Energia} = [\Delta \text{massa}] \times [\text{velocidade da luz}]^2 = \Delta m \times c^2$$

A velocidade da luz é 300.000.000 m/s, e uma unidade atômica de massa (uam) é igual a  $1,66 \times 10^{-27}$  kg, portanto a variação de energia é:

$$\Delta E = -0,2080 \times 1,66 \times 10^{-27} \times (3 \times 10^8)^2 = -3,10752 \times 10^{-11} \text{ J (joules)}$$

O sinal negativo indica que a reação é exotérmica.

Os neutrons resultantes da reação nuclear podem bombardear outros núcleos de U<sup>235</sup> e, assim, produzir quantidades significativas de energia térmica na chamada reação em cadeia, obtida pela primeira vez por Eurico Fermi na Universidade de Chicago em 1942.

O urânio é um elemento encontrado na natureza como uma mistura de isótopos, composta basicamente por 99,282% U<sup>238</sup>; 0,712% de U<sup>235</sup> e 0,006% de U<sup>234</sup>; o U<sup>235</sup> é o isótopo fissionável.

Para a produção do combustível físsil, é necessário o processo de enriquecimento, ou aumento da porcentagem de isótopo fissionável no chamado elemento combustível. Este é formado por pastilhas de dióxido de urânio enriquecido com U<sup>235</sup>, numa concentração acima de 1,5%, dependendo do tipo de reator. Essas pastilhas são montadas em varetas de aproximadamente um centímetro de diâmetro. Um conjunto dessas varetas forma o núcleo do reator de fissão, onde será produzido o calor pela desintegração do núcleo do U<sup>235</sup>. Esse calor é retirado, por um processo de convecção forçada, para o fluido refrigerante.

A reação nuclear controlada pode ser utilizada para a produção de energia elétrica em usinas termonucleares por meio de ciclos termodinâmicos como o de Rankine.

Vários são os tipos de reatores nucleares para a produção de energia elétrica. Os mais comuns são os resfriados por líquidos que podem ser: um metal líquido (LMCR – *liquid metal cooled reactor*), um líquido orgânico (OMCR – *organic moderated and cooled reactor*), água pressurizada (PWR – *pressurized water reactor*) ou água fervente (BWR – *boiling water reactor*), dos quais os dois últimos são os mais frequentemente usados.

A tecnologia utilizada nos reatores de Angra dos Reis é a do PWR e aquela dos reatores da operadora PECTO do Japão, em Fukushima, recentemente acidentados, é do tipo BWR.

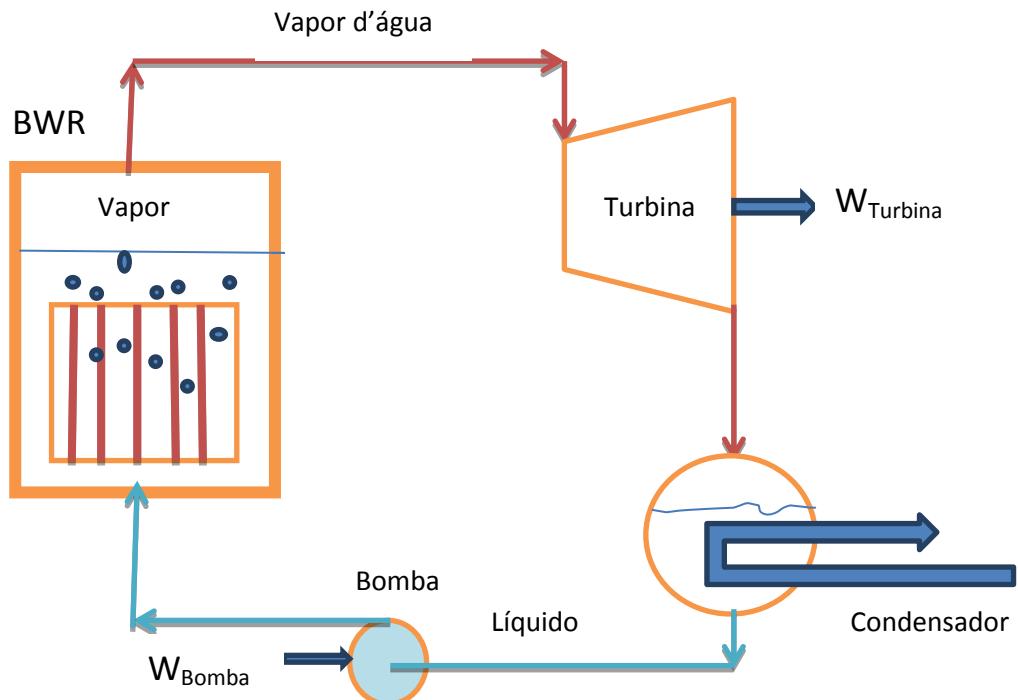
Em termos simples, a diferença entre os dois tipos está em que o vapor gerado no reator BWR (Fukushima) no processo de resfriamento das varetas de combustível é expandido na turbina acionadora do gerador elétrico, enquanto no reator PWR (Angra dos Reis) há um circuito primário de circulação de água refrigerante a alta pressão, a cerca de 150 atmosferas que não se vaporiza no núcleo do reator e é responsável pela refrigeração dos elementos combustíveis; essa água

Líquida, a alta temperatura, passa por um trocador de calor (gerador de vapor) vaporizando a água de um circuito secundário a cerca de 60 atmosferas que é expandida na turbina.

Assim, o vapor que se expande na turbina no caso do PWR (Angra dos Reis) não é radioativo, ao contrário do vapor produzido no BWR, uma vez que o circuito primário fica totalmente isolado pelas paredes de contenção do reator. Embora com certo grau de segurança maior, tanto a usina PWR como a BWR (Fukushima) dificilmente passariam incólumes se sofressem um terremoto de intensidade 8,9 na escala Richter, seguido de um tsunami de grande intensidade, como o ocorrido no Japão em 11 de março de 2011.

A tecnologia PWR é a mais utilizada em usinas termonucleares terrestres e em aplicações para a propulsão naval.

Na Figura 1 mostramos o esquema de uma planta termonuclear do tipo BWR.



Na Figura 2, o esquema de uma planta termonuclear do tipo PWR.

