



# Reactores nucleares de cisão: presente e futuro

J.G. MARQUES E N.P. BARRADAS  
 INSTITUTO TECNOLÓGICO E NUCLEAR<sup>a</sup>

**A NECESSIDADE INEGÁVEL DE REDUZIR AS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub>, BEM COMO DE DIMINUIR A DEPENDÊNCIA DOS COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS TEM LEVADO A UM INTERESSE RENOVADO DE DIVERSOS PAÍSES PELA ENERGIA NUCLEAR. A ENERGIA NUCLEAR BASEIA-SE EM TECNOLOGIAS MADURAS, E TEM BENEFICIADO DE UMA EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA QUE TEM ACOMPANHADO AS NOVAS EXIGÊNCIAS ECONÓMICAS, ECOLÓGICAS, E DE SEGURANÇA.**

Neste trabalho dar-se-á uma breve panorâmica do estado dos recursos uraníferos e das tecnologias futuras de reactores nucleares de cisão, tendo em mente os pilares do desenvolvimento sustentável.

## A ENERGIA NUCLEAR HOJE

Einstein mostrou em 1905 a equivalência dos conceitos de massa e energia [1]. Em particular, quando massa desaparece, energia é libertada. Como é que se consegue, na

prática, efectuar esta conversão? Verifica-se que a massa de um núcleo estável é menor que a soma das massas dos seus prótons e neutrões constituintes. A diferença de massa é a energia de ligação do núcleo, tanto maior quanto mais estável o núcleo. Assim, se numa reacção nuclear, o estado final for mais estável do que o inicial, a massa final é menor, e a diferença, que estava armazenada sob a forma de energia de ligação, liberta-se. É o que se passa tanto na cisão de um núcleo pesado como o urânio-

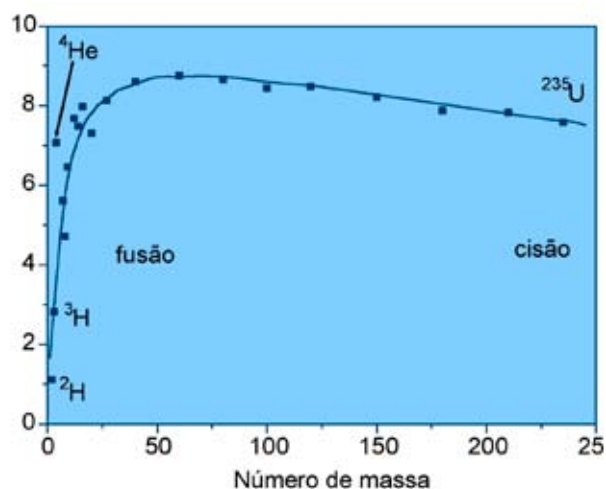


Figura 1: Energia de ligação por nucleão para alguns núcleos seleccionados.

<sup>a</sup>Estrada Nacional 10  
 2686-953 Sacavém

235, como na fusão de dois núcleos de hidrogénio. Como vemos na Figura 1, a energia de ligação (por nucleão) do urânio-235 é menor do que a energia de ligação dos núcleos com sensivelmente metade da sua massa (números de massa tipicamente entre 80 e 160). É essa diferença que se liberta na cisão do urânio-235.

Nos reactores nucleares aproveita-se a energia libertada na cisão de núcleos de urânio-235, cerca de 200 MeV por cisão, ou 50 milhões de vezes mais energia do que a libertada com a formação de uma molécula de CO<sup>2</sup> na combustão. Visto de outro ponto de vista, é necessária a combustão de 18 t de hulha para libertar o mesmo calor que o obtido com a cisão do urânio-235 existente em 1 kg de urânio natural [2].

A energia nuclear encontra aplicações à escala industrial actualmente apenas com base na cisão, dado que a fusão não atingiu ainda este estágio de desenvolvimento. No início de 2008 estavam em funcionamento 346 reactores nucleares nos países da OCDE e estavam em construção 14 novos reactores, dos quais 4 na Europa.

A energia nuclear tem hoje um peso inegável na produção de electricidade. A potência instalada em reactores nucleares de países da OCDE em 2007 era de 310 GW, tendo sido gerados 2173 TWh por

esta via [3]. A produção total de electricidade nos países da OCDE em 2007 foi de 10081 TWh, o que significa que a energia nuclear teve um peso de 22%. O peso a nível mundial é ligeiramente menor, aproximadamente 15%, comparável à produção de electricidade por via hídrica ou usando gás, como se pode ver na Figura 2 [4].

As necessidades inegáveis de reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>; diminuir a dependência dos combustíveis fósseis e aumentar a diversificação das fontes de energia primária têm levado a um interesse renovado de diversos países pela energia nuclear. Neste trabalho dar-se-á uma breve panorâmica do estado dos recursos uraníferos e das tecnologias futuras de reactores nucleares de cisão, tendo em mente os pilares do desenvolvimento sustentável.

## RECURSOS URANÍFEROS

O urânio é um metal aproximadamente tão comum como o estanho e o zinco. A sua concentração média na crosta terrestre é de 2,8 ppm e no mar de 0,003 ppm. A Agência de Energia Nuclear da OCDE (AEN) e a Agência Internacional de Energia Atómica (AIEA) publicam há mais de 40 anos o chamado “Livro Vermelho” com dados sobre recursos uraníferos na OCDE e no resto do Mundo [5]. Os recursos uraníferos razoavelmente assegurados, com custos inferiores a 130 USD/kg U, são de 5.5x10<sup>9</sup> kg. Cerca de 54% destes recursos têm custos inferiores a 40 USD/kg U, 14% têm custos entre 40 a 80 USD/kg U, e os remanescentes 32% têm custos entre 80 a 130 USD/kg U. Os cinco países com maiores recursos uraníferos são a Austrália (24%), o Casaquistão (17%), o Canadá (9%), os Estados Unidos da América (7%) e o Brasil (6%), o que mostra bem a grande diversidade geopolítica destes recursos.

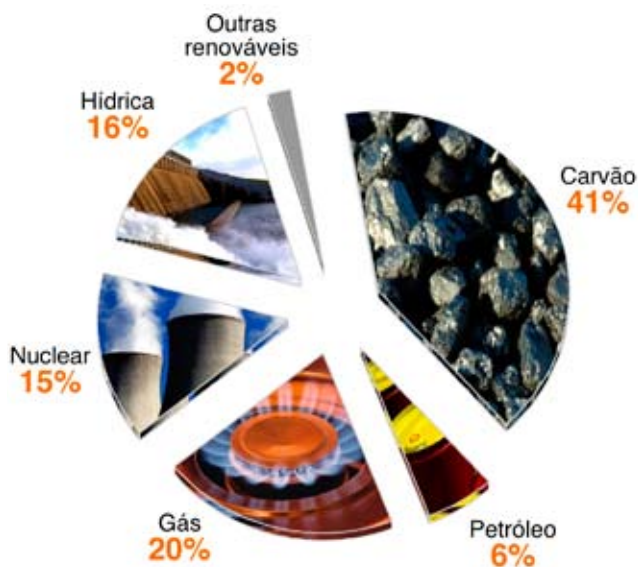


Figura 2: Produção de energia eléctrica a nível mundial.

A procura de U nos últimos anos tem sido de aproximadamente 5,5x10<sup>7</sup> kg por ano. Se tomarmos este valor como referência, os recursos razoavelmente assegurados seriam suficientes para cerca de 100 anos de operação de reactores de cisão, aos níveis actuais. Aos recursos acima indicados há que juntar 10<sup>10</sup> kg de recursos não descobertos, mas que se supõe existirem, com base no conhecimento existente [5], o que conduziria a um período de exploração da ordem de 250 anos. A introdução de reactores de cisão usando neutrões rápidos pode multiplicar esta estimativa pelo menos uma ordem de grandeza. Os reactores a neutrões rápidos, ditos reactores sobreconversores, transformam um material fértil (urânio-238) em material cindível (plutónio-239), de tal modo que o número de núcleos cindíveis formados é superior ao número de núcleos (de urânio-235) destruídos, o que permite obter mais energia do que num reactor convencional [6].

Para além dos recursos convencionais, há ainda a considerar a obtenção de urânio a partir de fosfatos, em que o urânio é um produto derivado da produção de ácido fosfórico. Esta é uma tecnologia madura, já usada no passado na Bélgica e nos EUA. Estima-se que possam ser obtidos 2x10<sup>10</sup> kg de U a partir desta fonte.

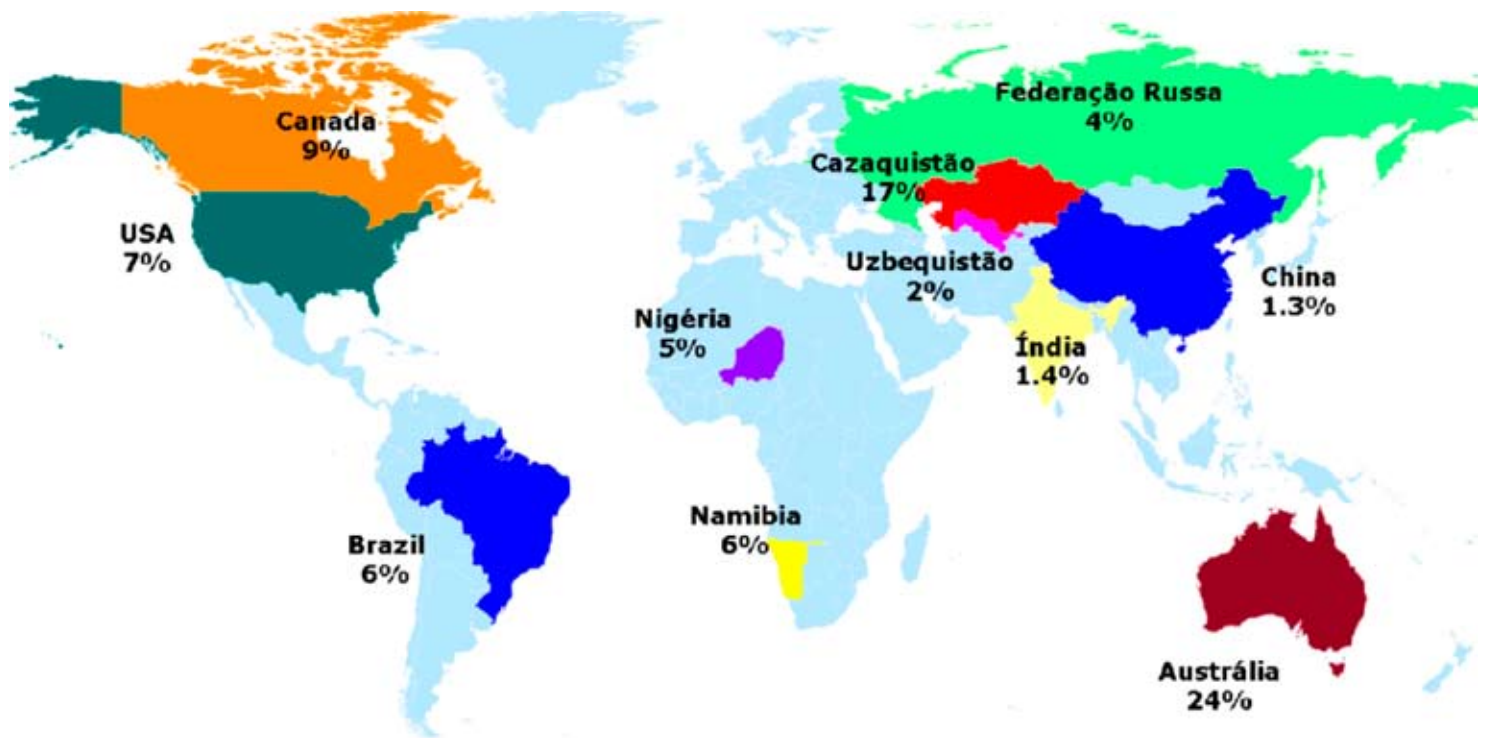


Figura 3: Distribuição geográfica dos recursos uraníferos.

## OS REACTORES DE 3ª E 4ª GERAÇÃO

A maioria dos reactores actualmente em exploração são da chamada “2ª Geração”, que caracteriza genericamente os reactores que começaram a ser instalados na transição das décadas de 60 para 70.

Na última década começaram a ser instalados alguns dos reactores da “3ª Geração”:

- “Advanced Boiling Water Reactor” (ABWR) de 1,3 GWe, desenvolvido pela General Electric (EUA), Hitachi e Toshiba (Japão), em exploração no Japão desde 1996.
- EPR de 1,6 GWe, desenvolvido pela Framatome ANP (França e Alemanha), actualmente em construção na Finlândia.
- “Advanced Pressurized Water Reactor” (AP-600) de 0,6 GWe, desenvolvido pela Westinghouse (EUA).

O EPR resulta da experiência francesa e alemã com os reactores a água pressurizada dos tipos “N4” e “Konvoi”, respectivamente. Em relação a estes reactores, o EPR tem uma barreira de protecção adicional, que se destina a recolher no interior do próprio edifício um núcleo hipoteticamente danificado num acidente grave [7], reduzindo assim cerca de 100 vezes a probabilidade de se registarem libertações radioactivas para o exterior em caso de acidente. Esta barreira surge como resposta a uma exigência das autoridades francesas de garantir que com os novos reactores não seja necessária a evacuação dos habitantes na vizinhança do reactor, mesmo no cenário do acidente mais grave.

Os reactores da 3ª geração vão dominar o mercado de novos reactores nas próximas 2 ou 3 décadas. Trabalha-se entretanto já na 4ª geração. Em 2002 foi fundado o consórcio “Generation IV Forum” (GIF), que agrupou inicialmente

10 países: Argentina, Brasil, Canadá, França, Japão, Coreia, África do Sul, Suíça, Reino Unido, e EUA. A Comunidade Europeia de Energia Atómica (EURATOM), a China e a Rússia aderiram ao GIF em 2006. O GIF publicou no fim de 2002 um relatório “A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems” [8]. Este documento descreve o esforço de I&D necessário para desenvolver 6 sistemas seleccionados. Estima-se que os reactores desta família estejam disponíveis a partir de 2030. Com os reactores da 4ª Geração esperam-se progressos significativos em

- Economia (risco financeiro comparável com outras formas de produção de electricidade, custo ao longo da sua vida operacional claramente vantajoso).
- Segurança e fiabilidade (aumento de seguranças passivas, redução significativa da probabilidade de acidentes envolvendo o núcleo do reactor).
- Sustentabilidade (utilização eficiente de recursos naturais, redução significativa dos resíduos produzidos).
- Segurança física e não-proliferação (melhoramento de mecanismos tendentes a evitar quaisquer desvio de materiais para outras aplicações, melhoramento na protecção física a hipotéticos actos de terrorismo).

No leque dos seis projectos em estudo, para além da produção de electricidade, são igualmente previstas outras aplicações, das quais se destaca:

- Produção de hidrogénio a altas temperaturas (800 – 1000°C) – estima-se que o custo de produção de hidrogénio possa ser 1.5 – 2 USD/kg [9] através

do ciclo iodo-enxofre acoplado a um reactor a alta temperatura [10].

- Dessalinização de água do mar – a dessalinização de água do mar já é essencial em alguns países, existindo diversos sistemas acoplados a reactores nucleares desde há diversas décadas [9]. A AIEA tem desde 1999 um projecto sobre esta temática [11]. Espera-se que venham a ser implementados novos sistemas de dessalinização acoplados a alguns dos reactores da 4ª Geração que permitam baixar significativamente os custos.

- Melhor gestão de plutónio e actínidos – os reactores a neutrões rápidos permitem “queimar” plutónio e actínidos, o que permite reduzir, pelo menos uma ordem de grandeza, o tempo necessário para que os resíduos de alta actividade a armazenar em depósito geológico tenham uma radio-toxicidade comparável à do urânio natural [9].

O conceito de reactor da 4ª Geração que está mais avançado é o do reactor de muito-alta temperatura, com diversos projectos activos, entre os quais o PBMR na África do Sul [12] e o RAPHAEL na União Europeia [13]. A Figura 4 ilustra o conceito geral deste reactor, moderado a grafite e arrefecido a hélio, com uma potência prevista de 600 MW. O vaso de pressão deste reactor é cerca de 2 vezes maior que o vaso de pressão de um reactor a água pressurizada actual. Está igualmente representada uma instalação para produção de hidrogénio, usan-

do o calor libertado pelo reactor, cujos únicos produtos são hidrogénio e e oxigénio. Há uma larga experiência neste tipo de reactores, embora operando a temperaturas mais baixas. É assim necessário qualificar alguns materiais estruturais de modo a atingir as condições de operação pretendidas [14].

## DESAFIOS NUMA PERSPECTIVA DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Ao longo dos últimos 20 anos tornou-se progressivamente claro que o modelo actual de desenvolvimento não é sustentável. A energia nuclear tem condições para responder aos desafios colocados, nos planos económico, ambiental e social.

A AEN publica regularmente estudos sobre os custos de produção de electricidade. A edição mais recente, de 2005, analisa 130 projectos em 21 países, usando métodos de cálculo comuns [15]. Considerando apenas os projectos entre os percentis 5 e 95%, os custos de produção de electricidade em 2005 eram:

- 22-48 USD/MWh para centrais a carvão;
- 39-56 USD/MWh para centrais a gas;
- 23-36 USD/MWh para centrais nucleares.

Os valores coligidos pela AEN mostram que a energia nuclear é economicamente competitiva. Os preços acima não incluem quaisquer penalizações por emissão de CO<sub>2</sub>, as quais, quando forem aplicadas, aumentarão claramente a vantagem da via nuclear.

Por outro lado, a estrutura de preços mostra que o com-

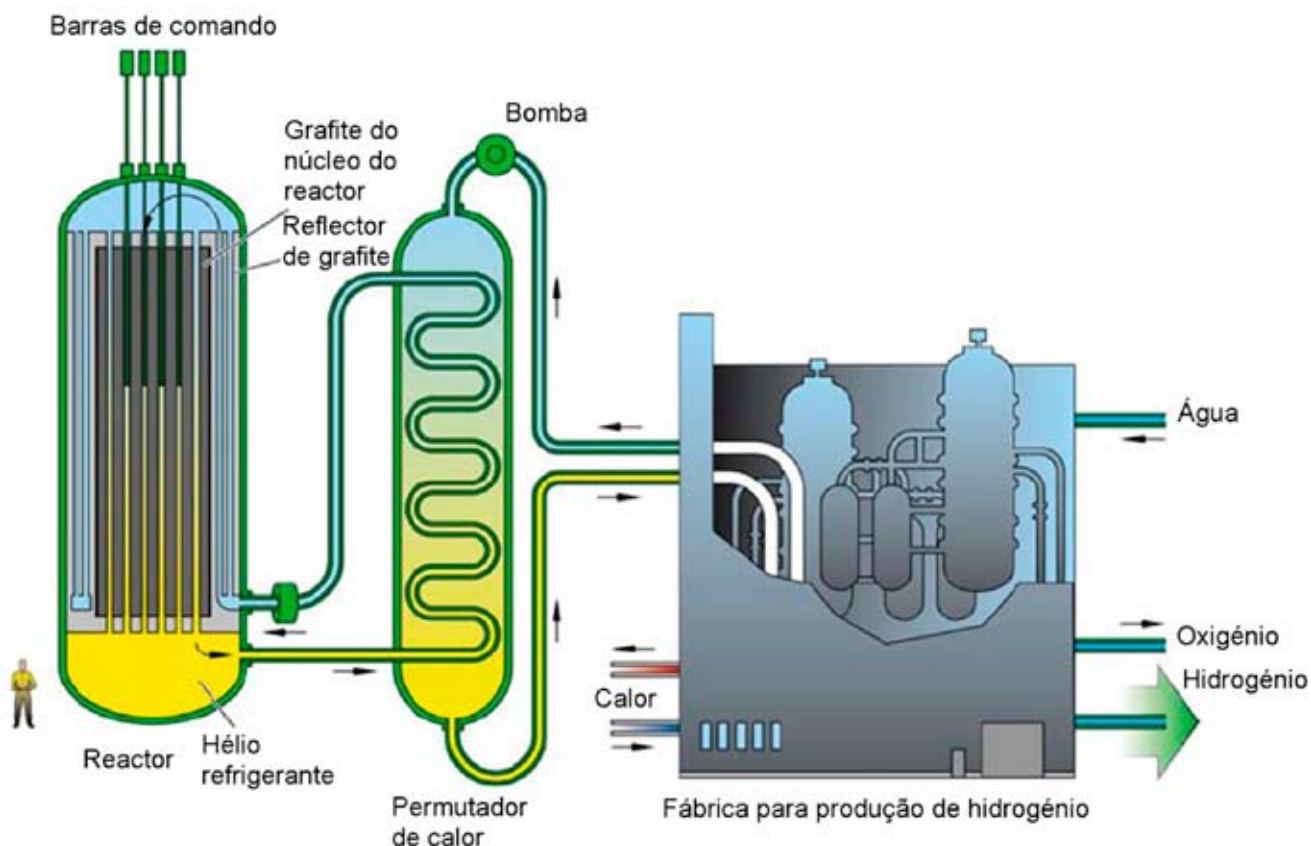


Figura 4: Representação esquemática do conceito de reactor de muito alta temperatura da 4ª Geração. O vaso de pressão deste reactor é cerca de 2 vezes maior que o vaso de pressão de um reactor a água pressurizada actual. É igualmente representada uma instalação para produção de hidrogénio.

bustível representa apenas 17% do preço total de produção em centrais nucleares, enquanto que representa 46% no caso das centrais a carvão e 79% no caso das centrais a gás. Assim, uma duplicação do custo do gás representa um aumento de 75% no custo do kWh numa central a gás, enquanto que um aumento correspondente no preço do urânio leva a um aumento inferior a 5% num reactor nuclear. Em termos ambientais, durante o funcionamento dos reactores nucleares não são emitidos gases com efeito de estufa (GEE). Contudo, se considerarmos que é necessária energia primária para os processos de construção e desmantelamento dos reactores, extracção e purificação de minério, enriquecimento do urânio e fabrico dos elementos de combustível, é possível calcular uma emissão de GEE para a energia nuclear, no intervalo 2,5-5,7 g C/kWh (equivalente CO<sub>2</sub>). O intervalo reflecte variações e incertezas ao longo da cadeia. Este valor é comparável ao correspondente para a energia eólica, 2,5-13,1 g C/kWh, sendo significativamente inferior aos obtidos com combustíveis fósseis, como o gás, 105-188 g C/kWh, ou o carvão, 206-357 g C/kWh (valores da AEN).

As emissões de CO<sub>2</sub> a nível mundial foram de 24102 Mt em 2002. Sem a contribuição da energia nuclear na geração de energia eléctrica teriam sido 26384 Mt, isto é, cerca de 10% mais elevadas. A energia nuclear, por si só, não reduz drasticamente as emissões totais de CO<sub>2</sub>, dado que não tem impacto directo, por exemplo, no sector dos transportes, mas tem uma contribuição significativa, no sentido preconizado pelas mais recentes políticas ambientais. A possibilidade de produzir hidrogénio a preços competitivos e com emissões de CO<sub>2</sub> muito reduzidas abre a possibilidade da energia nuclear passar a ter um papel significativo no sector dos transportes, onde o vector hidrogénio terá o seu maior impacto.

Em termos sociais, a indústria nuclear é uma indústria com grande peso tecnológico, que necessita de recursos humanos altamente qualificados. É uma indústria fortemente regulada, sujeita a acordos internacionais à escala Europeia e Mundial, a diversos níveis. Permite reduzir efectivamente a dependência externa de combustíveis fósseis. A obtenção de elementos de combustível requer o acesso não só a urânio, mas igualmente a processos para o seu enriquecimento, já que a esmagadora maioria dos reactores usa urânio ligeiramente enriquecido no isótopo urânio-235. Há uma grande diversidade de países com recursos uraníferos, para obtenção da matéria de base para o combustível; por outro lado, há capacidade suficiente de enriquecimento de urânio e fabrico de elementos de combustível, a nível comercial em muitos países, pelo que a obtenção de elementos de combustível não constitui objectivamente uma dependência do exterior.

Os recursos uraníferos são abundantes, seguros, e podem aumentar de maneira sustentada. Os reactores nucleares actuais são economicamente competitivos e contribuem decisivamente para a redução da dependência de combustíveis fósseis e para a necessária redução de emissões de GEE. Os reactores da 4ª Geração, a instalar dentro de 25 anos, permitirão uma melhor utilização dos recursos naturais e terão uma significativa redução dos resíduos produzidos, permitindo assim responder aos desafios das próximas décadas.

#### Referências

- [1] A. Einstein, "Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?", *Annalen der Physik* 18 (1905) 639-641.  
 [2] K. Heinloth, "Energie und Umwelt", B.G. Steubner (Estugarda, 1993).  
 [3] "Nuclear Energy Data 2008", OCDE-Nuclear Energy Agency (Paris, 2008).  
 [4] "Key World Energy Statistics 2008", OCDE- International Energy Agency (Paris, 2008).  
 [5] "Uranium 2007: Resources, Production and Demand", OCDE-Nuclear Energy Agency (Paris, 2008).  
 [6] E. Martinho, J.C. Oliveira, "Reactores Nucleares de Cisão", LNETI (Sacavém, 1980).  
 [7] M. Fischer, "The severe accident mitigation concept and the design measures for

- core melt retention of the European Pressurized Reactor (EPR)", *Nuclear Engineering and Design* 230 (2004) 169-180.  
 [8] "Generation IV Technology Roadmap", disponível em <http://gif.inel.gov/roadmap/>.  
 [9] I. Hore-Lacy, "Nuclear Energy in the 21st Century", World Nuclear University Press, Londres, e Elsevier Inc. (Burlington, 2006).  
 [10] X. Vitart, A. Le Duigou, P. Carles, "Hydrogen production using the sulfur-iodine cycle coupled to a VHTR: An overview", *Energy Conversion and Management* 47 (2006) 2740-2747.  
 [11] "Integrated Nuclear Power and Desalination System Design", AIEA, Viena, <http://www.iaea.org/programmes/ne/nenp/nptds/newweb2001/projects/2dcrp.htm>.  
 [12] Pebble Bed Modular Reactor (Pty) Limi-

- ted, <http://www.pbmr.co.za/>  
 [13] "ReActor for Process heat, Hydrogen And Electricity generation (RAPHAEL)", <http://www.raphael-project.org>.  
 [14] K.L. Murty, I. Charit, "Structural materials for Gen-IV nuclear reactors: Challenges and opportunities", *Journal of Nuclear Materials* 383 (2008) 189-195.  
 [15] "Projected Costs of Generating Electricity - 2005 Update", OCDE-Nuclear Energy Agency (Paris, 2005).  
 J. Radiat. Oncol. Biol. Phys. 42 Sup., 222 (1998).  
 [8] D. C. Weber, A. V. Trofimov, T. F. Delaney, T. Bortfeld, "A treatment plan comparison of intensity modulated photon and proton therapy for paraspinal sarcomas", *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 58, 1596-1606 (2004).