

COMBUSTÍVEL NUCLEAR: ENERGIA PARA O BRASIL

Primeiro-Sargento (EL) Johnny Carvalho Silva¹

O Brasil possui a sétima maior reserva de urânio do mundo, ficando atrás apenas de Estados Unidos, Canadá, África do Sul, Rússia, Cazaquistão e Austrália (Figura 1). Nossas reservas são de aproximadamente 309 mil toneladas de U_3O_8 (octóxido de triurânio). As jazidas estão localizadas principalmente nos estados da Bahia, do Ceará, do Paraná e das Minas Gerais. Atualmente, apenas 25% do território nacional foram prospectados, assim, esse valor poderá ser elevado facilmente no futuro.

O urânio (símbolo U) é um metal pertencente ao grupo dos actinídeos da tabela periódica, último elemento químico natural e, também, o átomo com núcleo mais pesado² encontrado na Terra. Ele possui três isótopos principais: urânio 234 (${}_{92}U^{234}$); urânio 235 (${}_{92}U^{235}$) e urânio 238 (${}_{92}U^{238}$). O isótopo ${}_{92}U^{235}$ é o que apresenta particular interesse, isótopo físsil³, pois com

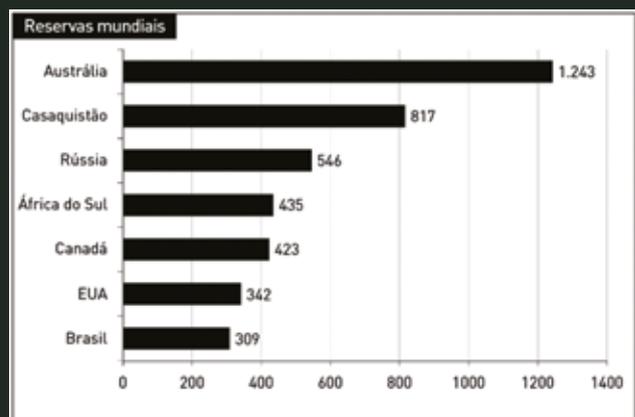


Figura 1 – Reservas de urânio do mundo em mil toneladas
Fonte: INB.

uma pequena quantidade de ${}_{92}U^{235}$ é possível obtermos uma grande quantidade de energia.

Energia nuclear é a energia liberada numa reação nuclear, fenômeno físico, que ocorre durante a fissão ou fusão dos núcleos atômicos. Fissão nuclear é o processo de quebra de um núcleo atômico pesado em dois núcleos mais leves com grande liberação de energia. Por exemplo, o urânio 235, quando atingido por um nêutron, se divide em dois fragmentos com números de massa menores, liberando energia e emitindo de dois a

1 Mestre em Física pela Universidade Federal do Rio Grande (FURG).

2 Aqui estamos usando o jargão geralmente usado na Química. Porém, cabe ressaltar que *peso* é diferente de *massa*. De maneira mais específica, o urânio apresenta número atômico 92 e massa atômica 238.

3 O isótopo ${}_{92}U^{238}$ pode fissionar ao capturar um nêutron, porém é preciso que este tenha grande energia cinética (nêutron rápido). Por outro lado, o ${}_{92}U^{235}$, ao capturar um nêutron, pode fissionar mesmo que este tenha uma energia cinética muito baixa (nêutron lento ou térmico).

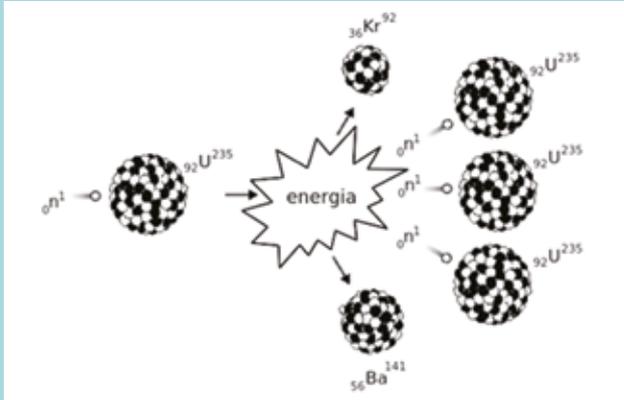


Figura 2 – Diagrama representativo da fissão nuclear do átomo de urânio-235

três nêutrons. Parte da energia que ligava os prótons e os nêutrons é liberada em forma de calor e radiação (alfa, beta e gama). Os nêutrons liberados na fissão atingem, sucessivamente, outros núcleos de ${}_{92}\text{U}^{235}$ (Figura 2), provocando a chamada reação em cadeia e, com isto, liberando uma grande quantidade de energia térmica. Para se ter uma ideia dessa quantidade de energia, 1 kg de urânio natural equivale a 10.000 kg de petróleo ou a 20.000 kg de carvão (Figura 3). Isto confere ao urânio um grande potencial energético que, usado como combustível, pode gerar energia elétrica em usinas nucleares ou impulsionar meios que vão desde sondas espaciais até submarinos. Para este último meio em particular, além do potencial energético, o combustível nuclear apresenta outras vantagens, quando comparado ao combustível convencional, tais como redução do espaço físico destinado à armazenagem do combustível e grande raio de ação, o que torna esse combustível cobijado por quase todas as marinhas do mundo.

Contudo, a obtenção do ${}_{92}\text{U}^{235}$ não é uma tarefa fácil. O urânio é encontrado na natureza em minerais como a uraninita⁴, a euxenita, a carnotita, a branerita, a torbernite, e a coffinita. Porém, nesses minerais, o percentual de ${}_{92}\text{U}^{235}$ é de apenas 0,7%, sendo os 99,3% restantes⁵ de ${}_{92}\text{U}^{238}$. Então, como separar o isótopo de interesse?

A tecnologia da separação⁶ isotópica do urânio (enriquecimento) constitui o principal desafio tecnol

4 Uma mistura de UO_2 (dióxido de urânio) com U_3O_8 (octóxido de triurânio).

5 O percentual do ${}_{92}\text{U}^{234}$ é muito pequeno, apresentando apenas traços.

6 Os processos de separação isotópica são basicamente a difusão gasosa e a ultracentrifugação. No entanto, existem outros processos de separação (método magnético, *separation nozzle* etc) que ainda não são usados na indústria.



Figura 3 – Equivalência energética do urânio

Fonte: IBRAM.

lógico para a fabricação do combustível nuclear. Os países que detêm essa tecnologia limitam-se apenas a vender⁷, no mercado internacional, produtos (urânio enriquecido) e serviços (conversão e enriquecimento), ou seja, não há parcerias de transferência de tecnologia de enriquecimento de urânio no mundo.

O enriquecimento do urânio é o processo físico de retirada do isótopo ${}_{92}\text{U}^{238}$ do urânio natural, aumentando, assim, a concentração do isótopo ${}_{92}\text{U}^{235}$. Esse processo é complexo e atualmente é dominado por doze países no mundo, a saber: Alemanha, **Brasil**, China, **Estados Unidos**, França, Holanda, Índia, Inglaterra, Irã, Japão, Paquistão e **Rússia**. De maneira simplificada (Figura 4), o processo consiste de um conjunto de etapas industriais que se inicia com a mineração e o beneficiamento do urânio natural – produção do concentrado de urânio, também chamado de *yellow cake*. Em seguida vem a etapa de conversão que é a transformação⁸ do *yellow cake* em hexafluoreto de urânio (UF_6). Por fim, faz-se o enriquecimento isotópico – etapa que promove o aumento da concentração do isótopo físsil ${}_{92}\text{U}^{235}$, presente no UF_6 , de 0,7% para cerca de 4%. A reconversão é a transformação do UF_6 em pó de dióxido de urânio (UO_2), para a produção das pastilhas de UO_2 que serão usadas na montagem dos

7 O comércio é rigidamente controlado pelos governos nacionais e, também, pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA).

8 Purificação do concentrado de urânio obtendo-se nitrato de urânio (NTU) e produção de trióxido de urânio (UO_3), por meio de reações químicas e calcinação; produção de tetrafluoreto de urânio (UF_4), por meio de reações químicas com ácido fluorídrico e outros elementos em ambiente controlado; produção de flúor (F_2) em células eletrolíticas a partir do ácido fluorídrico (HF); produção e purificação de hexafluoreto de urânio (UF_6), por meio da reação do UF_4 com F_2 .



Figura 4 – A produção do combustível nuclear consiste de um conjunto de etapas industriais que se inicia com a mineração e termina com a montagem dos elementos combustíveis
Fonte: INB.

elementos combustíveis (Figura 5). No Brasil, antes do domínio da tecnologia do ciclo do combustível nuclear, o urânio natural era extraído e enviado para beneficiamento e enriquecimento no exterior. A conversão era feita na CAMECO (Canadá) e, posteriormente, o enriquecimento era realizado por um consórcio europeu chamado URENCO.

A busca da tecnologia nuclear no Brasil começou no século passado, na década de 50, tendo como pioneiro nesta área o Almirante Álvaro Alberto⁹, que, entre outros feitos, criou o Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) em 15 de janeiro de 1951 e foi seu primeiro presidente (1951-1955). O Almirante Álvaro Alberto era defensor da ideia de que países possuidores de reservas naturais de materiais nucleares têm o direito de acesso à tecnologia nuclear para fins pacíficos. Para tanto, defendia o direito de construção de usinas de enriquecimento do urânio e de reatores nucleares com fins pacíficos e de pesquisa. Em 1954, com a construção de três ultracentrífugas, as quais o CNPq contratou na Alemanha, o Brasil dava os primeiros passos na busca do domínio de uma nova tecnologia – o en-

⁹ O Almirante Álvaro Alberto da Mota e Silva (1889-1976), além de sua formação na Escola Naval (Prêmio Greenhalgh em 1908), formou-se em Engenharia pela Escola Politécnica do Rio de Janeiro e pós-graduou-se pela *École Centrale Technique*, Bruxelas. Ocupou os cargos de Presidente da Sociedade Brasileira de Química (1920 a 1928), Representante brasileiro na Comissão de Energia Atômica das Nações Unidas (1946) e de Presidente do CNPq (1951 a 1955).

riquecimento do urânio. Na década de 1970, a Marinha do Brasil (MB) inicia seu programa nuclear com o objetivo de dominar a tecnologia necessária ao projeto de construção de um submarino com propulsão nuclear. Este programa pode ser dividido em duas fases: domínio do ciclo do combustível nuclear e desenvolvimento da propulsão nuclear (planta nuclear de geração de energia elétrica) para submarinos. Na década 1980, a MB e o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN),

em parceria com outro órgão de pesquisa, projetam e constroem ultracentrífugas capazes de realizarem a separação isotópica do urânio, um feito tecnológico singular para o País.



Figura 5 – Detalhe do elemento combustível: conjunto de 235 varetas combustíveis – fabricadas em zircaloy – rigidamente posicionadas em uma estrutura metálica, formada por grades espaçadoras; 21 tubos-guias e dois bocais, um inferior e outro superior
Fonte: INB.

Em fevereiro de 2012, foi inaugurada, nas dependências do Centro Experimental Aramar¹⁰ (CEA), a Unidade Piloto de Hexafluoreto de Urânio (USEXA). As ultracentrífugas desenvolvidas pelo Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP) em parceria com o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) utilizam uma tecnologia diferente¹¹ de outros países. A partir desta é possível produzir urânio enriquecido a um menor custo em relação à tecnologia utilizada no resto do mundo, o que torna o processo de ultracentrifugação brasileiro o mais econômico entre os existentes. Este feito coloca o Brasil no *ranking* de países que produzem UF₆ em escala industrial. A USEXA está dimensionada para processar 40 toneladas de UF₆ e é uma das poucas instalações comissionadas recentemente no mundo. Com o domínio da tecnologia de produção de UF₆ em escala industrial, a MB completa uma fase de seu programa



Figura 6 – As principais jazidas estão localizadas nos estados da Bahia e do Ceará

Fonte: INB.

10 O CEA é um complexo tecnológico-industrial da Marinha, localizado na zona rural do município de Iperó, SP, e ocupa uma área de 852 ha. Dista 11 km de Iperó, 16 km da cidade de Sorocaba e 110 km do município de São Paulo. A área construída da USEXA é de 12.000 m², instalada em um platô que ocupa uma área de 2,4 ha da área do CEA.

11 O rotor das ultracentrífugas desenvolvido no Brasil gira levando por efeito eletromagnético, o que reduz o atrito e, conseqüentemente, os desgastes e a manutenção. A tecnologia de ultracentrífugas utilizada no resto do mundo emprega um sistema sustentado por mancal mecânico.

nuclear (ciclo do combustível nuclear) e, agora, concentra suas pesquisas na outra fase (propulsão nuclear para submarinos). Com efeito, passou a fornecer cascatas de ultracentrífugas para o enriquecimento do urânio às Indústrias Nucleares do Brasil (INB), para que estas possam produzir, com tecnologia nacional, combustível nuclear para as usinas Angra 1 e Angra 2, localizadas no Complexo Nuclear Almirante Álvaro Alberto, na Praia de Itaorna, município de Angra dos Reis, estado do Rio de Janeiro.

A empresa INB¹² atua na cadeia produtiva do urânio, da mineração à fabricação do combustível nuclear, sendo toda sua produção voltada a atender a demanda¹³ das usinas Angra 1, 2 e 3. Embora tenham sido encontrados depósitos de urânio nos diversos estados da federação (Figura 6), a única mina em atividade no País é a mina de Caetité, no sudoeste da Bahia (Figura 7), que é, também, a única em operação na América Latina. A mina de Caetité tem reservas de 94 mil toneladas e responde pelo suprimento das usinas Angra 1 e Angra 2, que consomem o equivalente a cerca de 430 toneladas por ano.

O crescimento populacional, industrial e econômico mundial tem gerado uma demanda cada vez maior por energia. Na última década o consumo de eletricidade no País aumentou quase 38%, ficando acima da média mundial que foi de 30% no mesmo período, segundo dados da *International Energy Agency* (IEA). A produção de energia elétrica a partir de usinas nucleares ocupa hoje cerca de 18,1% da matriz energética mundial (*Electricity Information, 2014 Edition, IEA*). No Brasil esse percentual é de apenas 2,2%. Embora nos últimos anos alguns países da Europa tenham mostrado tendências ao uso de outras fontes de energia, como por exemplo, o gás natural e as energias renováveis solar e eólica, países como França, Inglaterra e Alemanha têm, respectivamente, 76,1%, 19,5% e 16,0% da sua geração de energia elétrica produzida

12 A INB foi criada em 1988. É vinculada ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Sucedeu a Nuclebrás e, em 1994, tornou-se uma única empresa ao incorporar suas controladas – Nuclebrás Enriquecimento Isotópico S.A. (Nuclei); Urânio do Brasil S.A. e Nuclemon Minerio-Química Ltda, absorvendo suas atividades e atribuições. E, atualmente, é única empresa autorizada pelo Governo Federal a extrair e processar o urânio e demais minerais radioativos.

13 Usina de Enriquecimento da INB, em Resende/RJ, encontra-se em plena operação e conta atualmente com quatro cascatas de ultracentrífugas (Módulo 1). A INB prevê que em 2024 a Usina atinja a capacidade nominal de produção para abastecer as usinas Angra 1, 2 e 3, sendo que esta última entrará em operação comercial somente em maio de 2018.



Figura 7 – Mina de Caetité no sudoeste da Bahia
Fonte: INB.

por reatores nucleares (IEA, dados de 2012). O recente episódio da ameaça russa de “fechamento das torneiras” de gás natural para países da união europeia em pleno inverno – medida de retaliação à possibilidade de embargos econômicos daqueles países contra a Rússia – fez os europeus repensarem a questão do combustível nuclear. No Brasil, essa questão está sendo repensada em razão do agravamento da crise hídrica, que afeta não somente o abastecimento de água, mas, também, a oferta de geração de energia elétrica no País. Com uma matriz energética baseada predominantemente em usinas hidroelétricas, a escassez de água leva ao uso cada vez mais frequente das usinas termoeletricas, elevando o custo do megawatt-hora (MWh) e o nível de poluição do ar. Como alternativa, poderíamos aumentar a produção de energia nuclear, pois esta apresenta custo do MWh menor do que o das termoeletricas, além de ser menos poluente. Já as energias renováveis fazem parte de uma das políticas públicas que mais gozam de subsídios concedidos pelos governos. Isto porque existe a esperança de que um dia elas venham a substituir definitivamente os combustíveis fósseis e, com isto, minorar a emissão de gases de efeito estufa no globo. Porém, segundo um artigo publicado na *The Economist Magazine (Jul 26th, 2014)* as energias eólica e solar podem ser mais caras do que é comumente pensado. Segundo a revista, os economistas utilizam o termo conhecido como *levelised costs* (“custos nivelados” numa tradução livre), que representa o atual valor líquido de todos os custos (capital e operacional) de uma unidade geradora de eletricidade por todo seu ciclo de vida, dividido pelo número de MWh de eletricidade prevista que ela fornecerá. Contudo, segundo o especialista Paul Joskow, do Massachusetts Institute of Technology (MIT), os custos de intermitência não são levados em conta pelos *levelised costs*, por exemplo:

o fato de a energia eólica não ser gerada em um dia sem vento e de a energia solar não ser produzida à noite exige que usinas convencionais sejam mantidas em caráter de reserva; entretanto, isto não é incluído nos custos nivelados. Ademais, a demanda de eletricidade também oscila durante o dia de modo que a geração solar e a eólica não conseguem atender. Quando estas questões são levadas em consideração, somadas à questão das emissões de carbono, as energias renováveis (comparadas com uma geração elétrica baseada no carvão) mostram ser a forma mais cara de reduzir a emissão de gases de efeito estufa a partir de matrizes energéticas. Por outro lado, a energia nuclear é a mais eficiente no custo efetivo de não emissão de carbono.

O Brasil ocupa posição de destaque na lista de países que detêm a tecnologia do ciclo do combustível nuclear, pois, além do domínio do ciclo do combustível nuclear, possui também reservas de urânio. Como já mencionado, temos a sétima maior reserva de urânio do mundo, o que garante ao País, a médio e a longo prazos, caso haja uma decisão do governo de aumentar a participação da energia nuclear em sua matriz energética, segurança no suprimento desse mineral sem se preocupar com flutuações do preço no mercado internacional. Ainda neste contexto, novas prospecções poderiam colocar o Brasil na primeira posição do *ranking* mundial de países que possuem reservas de urânio e, como o País passou a produzir urânio enriquecido em escala industrial, o mercado internacional poderá demandar o urânio excedente do Brasil, especialmente após o incremento¹⁴ da produção projetado pela INB. A exemplo do petróleo, poder-se-ia criar uma lei dos “Royalties do Urânio”, pela qual os recursos obtidos com a exportação do urânio excedente seriam destinados a fomentar a pesquisa nas áreas nucleares de fármacos, indústria, agricultura, biomedicina, propulsão naval e na área ambiental. Consequentemente, o País deve compreender que possuir reservas de urânio estimadas¹⁵ na ordem de um milhão de toneladas e, também, o domínio completo do ciclo do combustível nuclear, pode torná-lo em curto prazo um país ex-

14 Numa entrevista ao jornal O Globo em abril de 2013, o presidente da INB, senhor Aquilino Senra Martinez, disse “O Brasil tem um ‘pré-sal de urânio’ por explorar, em termos de potencial energético”; é preciso ampliar Caetité para 800 toneladas por ano e, ainda, começar a exploração da nova mina (de Santa Quitéria, no Ceará), que tem mais 91 mil toneladas estimadas em reservas.

15 Reservas: medidas e inferidas somam 309 mil toneladas U_3O_8 e prognosticadas e especulativas somam 800 mil toneladas U_3O_8 , segundo Informações Gerais do Programa Nuclear Brasileiro.

portador dos serviços de mineração, beneficiamento, conversão, enriquecimento, fabricação de pó e pastilhas e de elementos combustíveis. Com a capacidade de exportar esses serviços, o Brasil poderá influenciar

o mercado internacional do combustível nuclear ou gerar ações estratégicas nas áreas de infraestrutura, indústria e comércio, criando, assim, empregos e gerando riquezas e divisas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BECK, Marcio. O Brasil tem um pré-sal de urânio a explorar, diz novo presidente da INB. *O Globo*. Rio de Janeiro. 8 abr. 2013. Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/economia/o-brasil-tem-um-pre-sal-de-uranio-explorar-diz-novo-presidente-da-inb-8054541>>. Acesso em: 03 set. 2014.

BRASIL. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). Disponível em: <<http://www.ipen.br>>. Acesso em: 03 set. 2014.

_____. Indústrias Nucleares do Brasil (INB). Disponível em: <<http://www.inb.gov.br>>. Acesso em: 03 set. 2014.

_____. Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br>>. Acesso em: 08 set. 2014.

_____. Portaria nº 68, de 4 de setembro de 2009. Autorização para Operação Permanente. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*. Brasília, DF, n. 173, sec. 1, 10 set. 2009.

_____. Resolução nº 131, de 6 de setembro de 2012. Atos da Comissão Deliberativa. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*. Brasília, DF, n. 176, sec. 1, 11 set. 2012.

_____. Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br>>. Acesso em: 08 set. 2014.

_____. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). *Atlas de energia elétrica do Brasil*. 3.ed. Brasília, DF. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 08 set. 2008.

_____. Ministério da Ciência e Tecnologia. Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). *Relatório de Gestão do Exercício 2010*. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/images/cnen/documentos/aceso_a_informacao/rel-gestao-2010.pdf>. Acesso em: 14 set. 2014.

_____. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/>>. Acesso em: 14 set. 2014.

_____. Ministério de Minas e Energia. *Plano Nacional de Energia 2030* / Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília, DF: MME: EPE, 2007.

_____. Marinha do Brasil. Programa Nuclear da Marinha. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/programa-nuclear-da-marinha>>. Acesso em: 19 set. 2014.

_____. Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo. Disponível em: <<https://www.mar.mil.br/ctmsp/>>. Acesso em: 19 set. 2014.

CARVALHO, J. F. O espaço da energia nuclear no Brasil. In: INSTITUTO de Estudos Avançados Da USP, 74, São Paulo, 2012, p.293-308. Disponível em: <<http://www.iea.usp.br/revista/edicoes>>. Acesso em: 20 set. 2014.

INSTITUTO Brasileiro de Mineração (IBRAM). Sistema de Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira. 6. ed. Brasília, DF, 2011.

INTERNATIONAL ATOMIC Energy Agency (Iaea). Disponível em: <<http://www.iaea.org/>>. Acesso em: 22 set. 2014.

INTERNATIONAL ENERGY Agency (IEA). Disponível em: <<http://www.iea.org/>>. Acesso em: 23 mar. 2015.

MASSACHUSETTS Institute of Technology (MIT). *The Future of Nuclear Power: An Interdisciplinary Mit Study*. 2003. ISBN 0-615-12420-8.

THE ECONOMIST Magazine. *A web of lies*. New York. Jul 26th 2014. Disponível em: <<http://www.economist.com/printedition/2014-07-26>>. Acesso em: 22 set. 2014.