



RESENHA HISTÓRICA DOS REATORES RÁPIDOS REGENERADORES

Henrique V. Abade, Isabella R. Magalhães, Claúbia Pereira, Carlos E. Velasquez

Universidade Federal de Minas Gerais - Departamento de Engenharia Nuclear
Av. Antônio Carlos, 6627 Campus UFMG Pampulha
31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil

henriqueabade@ufmg.br

Palavras-Chave: FBR; Reactores Rápidos, Energia Nuclear

RESUMO

Este trabalho analisa as principais contribuições dos Reactores Regeneradores Rápidos (FBR), considerando aspectos de sua evolução histórica e tecnológica. Será apresentada uma revisão histórica do desenvolvimento desse tipo de reator ao redor do mundo, além dos reatores rápidos usados atualmente e uma visão dos projetos. Nesse contexto, avaliam-se as perspectivas tecnológicas para a construção de reatores rápidos de IV geração, os quais têm, como principal objetivo, produzir material físsil e proporcionar melhor aproveitamento do combustível; além de possibilitar a transmutação de transurânicos durante seu funcionamento. Tudo isso torna a energia nuclear mais sustentável e o ciclo do combustível mais extenso. Na análise serão considerados os aspectos tecnológicos, e as principais falhas nos diferentes modelos produzidos. A discussão final apresenta os aspectos mais importantes de projetos para implantação de reatores rápidos.

1. INTRODUÇÃO

Em meados dos anos 1950 foram projetados diferentes tipos de reatores nucleares, dentre eles os reatores rápidos. Estes utilizavam plutônio-239 (Pu-239) como principal componente físsil do combustível nuclear, que podia ser produzido dentro do núcleo do reator através da absorção de um nêutron pelo núcleo de urânio-238 (abundância natural de 99.3%), oferecendo uma alternativa à utilização de urânio enriquecido. Além disso, os reatores rápidos poderiam amenizar problemas políticos relacionados ao armazenamento e disposição final do combustível nuclear queimado produzido pelos reatores à água leve [1]. Isto levou alguns países da OCDE (Organização de Cooperação e de Desenvolvimento Económico) a demonstrarem interesse pelos reatores rápidos, os reatores nucleares rápidos não possuem moderador e utilizam combustível nuclear altamente enriquecido, isto produz nêutrons rápidos (nêutrons com energia cinética superior a 10 keV) que induzem fissão. O maior propósito de um FBR ter uma taxa de conversão de material fissionável para físsil maior do que um. O combustível nuclear usado pode ser UO₂ enriquecido entre 25 e 50% ou MOX com 25% de Pu-239. O cerne de um reator regenerador rápido é pequeno comparado com um reator convencional [2].



1.1 FBR na França

Em 1962 a França havia começado a construir seu primeiro reator refrigerado a sódio, o Rapsodie, o qual ficou pronto para utilização no ano de 1967. Em 1980 já havia problemas graves de rachaduras no vaso do reator e após tentativas inúteis de conter a situação, no ano de 1983 ele foi permanentemente desligado [1].

Em fevereiro de 1968 iniciou-se a construção do reator rápido regenerador Phénix. No ano de 1973 o reator entrou em estado funcional. Nesse ano o urânio começou a ser supervalorizado, chegando a custar mais de 6 vezes seu valor normal em 1976. Com esses acontecimentos parecia que os FBR seriam a solução para a energia nuclear. O Phénix estava batendo recordes de produtividade, até que inexplicavelmente o fator de carga caiu para zero. O reator foi desligado temporariamente para manutenções, as quais foram extremamente onerosas e perduraram até o ano de 2002. Após o religamento acontecerem vários incidentes, vazamentos e incêndios devido ao sódio líquido. Em 2009 o reator foi desativado permanentemente, devido aos gastos excessivos e constantes problemas [3, 4].

O Superphénix operou com menos problemas devido à grande preocupação de haver uma combinação no reator de mais de cinco mil toneladas de sódio altamente reativo com toneladas de Pu, o que fez com que houvesse medidas mais eficazes no caso de vazamento [5]. Porém, houve incidentes, dentre eles o vazamento de sódio do tanque principal de armazenamento de combustível, o qual levou a um desligamento de dez meses. Após o desligamento percebeu-se que seria impossível reparar o tanque, devido a: “dificuldades técnicas relacionadas, como, por exemplo, problemas de soldagem, conformidade com tolerâncias dimensionais estreitas, modelos de teste tecnológico, alívio de tensão da estrutura, montagem de material de isolamento térmico, operações gerais de montagem do bloco do reator, com os requisitos de limpeza constantes associados e o teste geral de estanqueidade” [6]. Além dessa falha, ocorreram problemas estruturais menos graves, como a poluição por sódio, o colapso do telhado do salão de turbinas em 1990 e o vazamento de gás argônio em 1994 [1]. Com todos os acontecimentos anteriormente citados o Superphénix foi desligado em 1996. Em 1997 o Pu era utilizado somente em 1% dos combustíveis de reatores à água leve. Logo, a França acumulou mais de dezessete toneladas de Pu. A desmontagem completa do Superphénix está prevista para 2025 [7].

1.2 FBR na Índia

A Índia é um dos únicos países que estão atualmente construindo reatores regeneradores em escala comercial. Porém, tanto o histórico do programa quanto as características econômicas e de segurança do reator sugerem que o programa não alcançará as expectativas nele colocadas [1]. Os FBR foram propostos na Índia no ano de 1950 como parte de um programa nuclear de três estágios. Isso para desenvolver uma grande plataforma de energia nuclear autônoma, apesar dos recursos de urânio (U) serem relativamente pequenos [8].

Em 1965 a Índia iniciou o projeto de um reator experimental que foi abandonado em 1969 [9], porém, no mesmo ano, após o surgimento do Rapsodie e o projeto de gerador de vapor do reator Phénix, ambos franceses, surgiu o projeto de FBR indiano baseado nos reatores franceses [10]. Em 1971 o projeto do Fast Breeder Test Reactor (FBTR) foi



aprovado e em 1976 ele foi finalizado [11]. O reator atingiu a criticalidade em 1985 e o gerador de vapor começou a operar apenas em 1993 [12]. Somente após 15 anos de operação o reator operou por 50 dias ininterruptos, desempenho muito abaixo do esperado [13]. Apesar dos vários acidentes mecânicos, problemas com vazamento e instabilidade na reatividade do reator, ele foi considerado pela Índia um sucesso em termos de operação e construção de projeto [14].

Mesmo antes do FBTR estar pronto a Índia já planejava a construção de outro reator rápido, o Protótipo Reator de Recuperação Rápida (PFBR). O projeto desse reator foi iniciado na década de 1980, como um protótipo para um FBR de 600 MW. A construção do reator começou em 2004 e havia planos para finalizá-lo em 2010 [15]. Porém, atualmente planeja-se a criticalidade no ano de 2021. Após um ano de operação bem-sucedida da PFBR, planeja-se construir os dois primeiros FBR indianos em Kalpakkam. Por outro lado, outros quatro FBR estão planejados para seguir depois de 2030, em locais a serem definidos [16].

1.3 FBR no Japão

O primeiro reator rápido de regeneração japonês foi o Joyo que atingiu a criticalidade em 1977 com capacidade inicial de 50 MWt. Em 1982 foram feitas atualizações para aumentar a potência do reator para 100 MWt de potência. De 1983 a 2000, Joyo operou como um protótipo para combustíveis e materiais para futuros reatores rápidos japoneses [1]. Após 2007 esteve em fase de reparos e atualmente planeja-se retomar as pesquisas já que o protótipo japonês mais novo, Monju, veio a falhar.

O protótipo do reator regenerador rápido Monju, de 280 MWt foi desenvolvido em paralelo com Joyo, porém, a construção foi adiada e não alcançou a criticalidade até 1994. Em 1995, houve um grave vazamento de sódio seguido de fogo quando vibrações intensas causaram a falha de termo-hidráulica no sistema secundário de sódio. O sódio reagiu com oxigênio produzindo um incêndio que derreteu as estruturas de aço na sala. Não houve feridos e nem liberação de radioatividade, pois o sódio no sistema não era radioativo. Logo, o reator foi desativado e em 2001 foi apresentado um pedido de reativação para Monju, que foi concedido em 2002 [1].

O reinício estava programado para 2008, mas em 2010 o reator ainda estava desligado [1]. No mesmo ano o reator voltou a funcionar, contudo, houve um incidente devido ao maquinário antigo. Esse acontecimento levou, mais uma vez, ao desligamento do reator, o qual teve sua declaração de desativação permanente no ano de 2016. Tal fato deve-se ao grande gasto para o religamento do reator que seria maior que aquele para a desativação completa, a qual levará, aproximadamente, 30 anos [17]. No entanto o Japão permanece comprometido com o desenvolvimento de FBR [1]. Além disso afirma que esse tipo de reator deve ser a tendência da futura geração de energia nuclear no mundo [18].

1.4 FBR na Rússia

O programa de reatores de neutros rápidos da União Soviética começou no de 1949, com a ideia de construir-se reatores nucleares que produzissem mais material físsil que



consumissem. No final desse mesmo ano o governo deu início ao programa de desenvolvimento de FBR [19].

Retomando as previsões feitas em 1949, entre 1962 e 1964, estudos realizados concluíram que seria promissor expandir a utilização da energia nuclear usando FBR, começando com combustíveis de urânio enriquecidos e, posteriormente, substituindo-os por combustíveis de plutônio. No ano de 1956 o primeiro reator russo começou a operar, contudo o material refrigerante escolhido foi o mercúrio (Hg), o qual vazou das juntas de tubulação e corroeu o revestimento de aço [20]. Após o incidente foi criado outro reator, resfriado com sódio líquido que usava dióxido de plutônio como combustível, que iniciou suas operações em 1959 e as finalizou em 2004. A iniciativa BR-5, além da pesquisa e desenvolvimento do reator, foi utilizada para produção de isótopos usados na medicina e para tratamento de câncer de garganta utilizando feixes de elétrons [21].

Em 1964 iniciou-se a construção do reator BN-350, o qual começou a operar no ano de 1972 utilizando combustível misto de urânio-plutônio (MOX) e urânio enriquecido, o calor do reator foi utilizado para a dessalinização da água na península de Mangyshlak no Mar Cáspio. O BN-350, um ano depois de iniciar suas operações, sofreu um grande incêndio de sódio devido à falha de um dos grandes geradores de vapor. A falha no gerador proveio da falta de testes antes da inicialização das operações e da má qualidade da solda, a qual foi mal inspecionada. O reator foi desligado, por quatro meses, para reparos e finalizou suas operações em 1999 [1].

Antes mesmo de o BR-350 começar a operar, o governo iniciou a construção de outro reator, o BR-600, mais potente e melhor que o anterior devido à experiência. Esse novo reator possui um circuito secundário de sódio, o qual em 1997 apresentou uma falha ocasionando 27 vazamentos de Na, dos quais 14 resultaram em incêndio. Os incêndios foram contidos, sem vítimas, e ainda hoje o reator permanece em operação [22].

1.5 FBR nos EUA

O primeiro reator rápido do mundo foi o Clementine de 0,25 MWt, construído entre 1945-46, no Novo México nos EUA, atingindo criticalidade no ano de 1949. Era um reator experimental refrigerado a mercúrio no qual houve problemas com vazamento do refrigerante. Todavia, foi o inchaço do combustível, o fez o revestimento de uma das barras de combustível se romper, causando a contaminação do circuito de resfriamento primário com Pu e outros produtos de fissão, o que causou o desligamento em 1952 [1].

O segundo reator rápido americano, o LAMPRE-I de 20 MWt era refrigerado a sódio e alcançou a criticalidade em 1961. Na sequência, o EBR-I refrigerado com uma mistura sódio-potássio foi o primeiro reator rápido a gerar eletricidade nos EEUU. O EBR-II foi o reator rápido americano mais bem-sucedido. Era refrigerado a sódio e abastecido com combustível HUE (High Uranium Enrichment), o qual possui em sua combinação 20% ou mais de U-235. Alcançou a criticalidade em 1963 e foi operado por mais de 30 anos, sendo permanentemente desligado somente em 1994 [1].

Após o EBR-II, os americanos construíram o Fermi-1, que apresentou problemas de projeto e, logo depois, o “Southwest Experimental Fast Oxide Reactor” (SEFOR) que



testou o combustível misto de urânio e plutônio, o MOX. Este reator também era apenas para testes e foi desligado três anos após sua inicialização. Ainda nos anos 1960 foram construídos dois pequenos reatores do tipo MSFR. Um de 1,5 e outro de 8,0 MWt. A finalidade desses reatores era demonstrar a viabilidade técnica de unir-se refrigerante e combustível em um único fluido [1].

Contudo, os EUA não realizaram grandes projetos de reatores rápidos, consequência do oneroso custo de construção, teste e manutenção. De modo semelhante aos modelos franceses, reatores americanos apresentaram vazamentos recorrentes, grandes e pequenos incêndios e explosões, o que fez o governo abandonar os projetos e finalizar o programa de FBR com um último projeto em 2017 não realizado [1, 23-25].

2. ESTADO DA ARTE

Alguns países, por não possuírem reatores rápidos, buscaram reciclar o Pu utilizando-o como combustível de reatores a água leve, o que não foi uma solução eficaz pois a maioria dos combustíveis utiliza 1% de Pu. Além disso, reatores que utilizam nêutrons-térmicos são relativamente ineficazes, na fissão de alguns isótopos de Pu, o que gera da mesma forma acúmulo do Pu no combustível reciclado [1].

Após todos os estudos o Departamento de Energia do Estados Unidos concluiu que os reatores rápidos regeneradores, resfriados com Na teriam uso de forma positiva para melhorar o gerenciamento dos resíduos radioativos gerados pelo combustível gasto em outros reatores [26].

2.1 Princípios do projeto de um FBR resfriado a sódio líquido

Os FBR (Fast Breeder Reactor) ou reator rápido regenerador são projetados para entrar em funcionamento na 4^a geração de reatores nucleares e a maioria dos projetos apresentam como combustível nuclear o MOX, um óxido misto de urânio (U) e plutônio (Pu) [27, 28]. Esse reator funciona com um espectro endurecido de nêutrons, que induz fissão nos isótopos de plutônio, isso faz com que o reator precise de maior controle, o qual é feito por meio das barras de controle [28]. Porém, para que haja baixa moderação dos nêutrons uma alternativa é substituir o refrigerante, água, por um metal líquido como o sódio, reduzindo a quantidade de fissões por nêutrons térmicos dentro de um FBR [23]. O núcleo e todos os componentes primários desse reator estão localizados em um único vaso principal cheio de sódio (Na), sendo o reator chamado de tipo piscina ou tipo integrado [30]. Como se sabe, ao entrar em contato com a água o sódio líquido reage de forma exotérmica, de forma que o calor da reação queima o hidrogênio (H) produzido segundo a equação 1.



Dessa forma, para evitar riscos de haver, acidentalmente, entrada de água no vaso primário e gerar uma explosão existe um circuito secundário. Esse circuito extrai a energia térmica do vaso, transfere-a para água, sem contato direto, que vaporiza e faz girar uma turbina. Ademais, ele possui uma turbina, um sistema secundário e um gerador de vapor [30].



3. STATUS DOS REATORES RÁPIDOS

Os reatores rápidos em operação hoje, tem recebido grandes investimentos por parte dos países que os projetaram. A China e a Rússia, por exemplo, são nações que aplicaram, na última década, um forte investimento de capital para finalizar seus FBRs. Na China o CEFR e o CFR-600, com gastos acima de US \$350 milhões, [31] e na Rússia o BN-800 e o BN-1200 com investimentos acima de US \$3,5 bilhões [32].

Tabela 1. Informação principal dos reatores rápidos que estão em operação ou construção

Reator	Tipo (Refrigerante)	País	Status	Construção	Potência	Ref.
CEFR	FBR (Na)	China	Operando	2000-2010	65 MW _t 20 MW _e	[33-36].
CFR-600	FBR (Na)	China	Em construção	2017-2030	1500 MW _t 600 MW _e	[37].
BN-800	FBR (Na)	Rússia	Operando	1983-2016	2100 MW _t 880 MW _e	[38,39],
BN-1200	FBR (Na)	Rússia	Construção em espera	Indefinido	1220 MW _e	[40-42].

4. Propostas e Tendências na Utilização de FBR

Apesar dos problemas, em reatores rápidos, existem propostas de projetos de reatores FBRs para que sejam parte de um futuro não tão distante. Exemplo disso são alguns projetos de reatores rápidos de IV Geração que estão sendo finalizados e colocados em operação, assim como o estudo dos benefícios que podem advir da utilização deles para a indústria nuclear.

4.1 O Projeto ALLEGRO

Trata-se de um projeto europeu para construção do primeiro GFR (Gas Fast Reactor) no mundo [43]. Inicialmente, em 2014, anunciou-se um estudo teórico para confirmar a viabilidade de um protótipo de 75 MW_t desse estilo de reator, porém, depois de haver a afirmação de planos para iniciar a construção foram propostos vários projetos que incluem reatores de 50 MW_t a 2400 MW_t, utilizando muitos tipos de combustível, inclusive o MOX [23]. Esse tipo de reator utiliza um gás inerte como refrigerante, o qual não reage quimicamente com outros elementos e dispensa um circuito secundário, o que promove a mais alta eficiência térmica entre os reatores rápidos [44,45]. Em contrapartida, o gás hélio necessita ser operado no núcleo a altas pressões, da ordem de 7,0 MPa, o que pode provocar vibrações na estrutura [23].



4.2 Reator rápido de sal fundido (MSFR)

O MSFR é uma concepção de reator diferente no que diz respeito ao combustível. Sais fundidos de lítio, tório e plutônio (LiF-ThF₄-PuF₃), podem ser uniformemente diluídos no combustível. Outra possibilidade é adicionar ao refrigerante de sais fundidos pequenas esferas revestidas por carbono e no seu interior, uma microesfera de 0,5 mm de diâmetro composta por dióxido de urânio. Em ambos os casos, evita-se a fabricação do elemento combustível, mas adiciona-se gastos ainda maiores, relativos à necessidade de uma instalação química associada à usina nuclear, para purificar o refrigerante continuamente, retirando dele produtos de fissão indesejáveis, sobretudo aqueles altamente absorvedores. [23]

4.3 Utilização na indústria

Além da produção de energia os FBRs podem ser utilizados em três áreas industriais: na indústria petroquímica, pois esses reatores têm grande produção de hidrogênio [46], o qual é utilizado para eliminação de contaminações de enxofre, por exemplo, em combustíveis; na indústria aeroespacial é utilizado na propulsão veicular [1,31,47]; e na dessalinização da água do mar, sobretudo o GFR, por atingir temperaturas mais elevadas, acima de 700° C, o que torna o processo mais eficiente [23, 31,45].

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar das dificuldades em relação aos reatores rápidos explicitadas nesse artigo, vários países operaram com sucesso esse tipo de reator por centenas de horas, mesmo que em baixa potência. O surgimento de grandes falhas ocorreu ao aumentar-se a potência. Logo, é possível inferir que existem falhas de origem técnica, o que não se torna motivo de abandonar os projetos. Ademais, os FBRs apresentam uma viável e benéfica solução para um dos maiores problemas da engenharia nuclear, a redução na quantidade de rejeitos radioativos produzidos. Todavia, entende-se que são necessários estudos em diversas áreas com o objetivo de contribuir para o aumento da segurança e eficiência nos projetos de FBRs. Tais estudos estariam relacionados à obtenção de reatores nucleares autossustentáveis com baixo custo e poucas falhas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, FAPEMIG, CNEN e CNPQ pelo suporte financeiro e ao Departamento de Engenharia Nuclear pelo suporte tecnológico e recursos humanos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Cochran T.B., et al. - Fast Breeder Reactor Programs History and Status, (2010).

[2] e-Disciplinas USP, Reatores Nucleares de Potência, <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5324079/mod_resource/content/2/rpotencia.pdf> acessado em 21/04/202.



- [3] IAEA, Power Reactor Information System database (PRIS). <http://www.iaea.org/cgi-bin/db.page.pl/prei.ophis.htm?country=PHENIX&units=&refno=10&opyear=2007&link=HOT> (accessed 14 June 2009).
- [4] IAEA, “Nuclear Power Reactors in the World,” Technical Data Series (April 1987).
- [5] C. Nissim, *L’amour et le Monster, Roquettes Contre Creys-Malville* (Lausanne, Paris : Favre, 2004).
- [6] Branchu, J, and Gigarel, C. Superphenix 1 reactor block fabrication. United States: N. p., 1985. Web
- [7] Schneider. M., Coeytaux. X., “Recyclage Des Matières Nucléaires – Mythes Et Réalités”, commissioned by Greenpeace France, WISE-Paris, (2000).
- [8] Bhabha. H. J and Prasad. N. B, “A Study of the Contribution of Atomic Energy to a Power Programme in India” (paper presented at the Second United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, 1958).
- [9] Bhoje. S. B, “History and Evolution of Fast Breeder Reactor Design in India – a Saga of Challenges and Successes,” IGC Newsletter, (2006).
- [10] Rodriguez. P, “Foresight, Vision, and Strategy in the Management of Fast Breeder Technology in India,” International Journal on Foresight and Innovation Policy 1 (2004).
- [11] Comptroller and Auditor General of India (CAG), “Report by the Comptroller and Auditor General of India,” New Delhi, (1993).
- [12] Hibbs. M, “Kalpakkam FBR to Double Core, Load First Thorium-232 Blanket,” Nucleonics Week 38-48 (1997).
- [13] Prasad. R, “India: FBTR Passes 53-Day Continuous Operation Test,” The Hindu, (2001).
- [14] Rodriguez. P, “The Past Is the Springboard to the Future,” IGC Newsletter, October 2000.
- [15] Subramanian. T. S, “A Milestone at Kalpakkam,” Frontline, November 19, 2004.
- [16] O Globo, “Índia firma pacto com Rússia, para construir 6 usinas nucleares”, outubro 2018, <<https://oglobo.globo.com/mundo/india-firma-pacto-com-russia-para-construir-6-usinas-nucleares-23130351> > acessado em 12/08/2020.
- [17] Gizmodo Brasil, Dvorsky Georde, “Japão resolve desativar o reator nuclear de US\$ 9 bilhões que nunca funcionou direito”, dezembro 2016. <<https://gizmodo.uol.com.br/japao-desativa-reator-nuclear/> > acessado em 12/08/2020.
- [18] Japan Atomic Energy Commission, “Long Term Plan for Research, Development and Utilization of Nuclear Energy,” (1967).
- [19] Kazachkovski. O.D., *Fast Neutron Reactors. Science-technical Memoirs* (Obninsk: IATE, 1995); “State Scientific Centre of Russian Federation, Institute of Physics and Power Engineering–50 years” (Proceedings, Institute of Physics and Power Engineering, Obninsk, 1996).



[20] State Scientific Center of the Russian Federation - Institute for Physics and Power, "History of Peaceful Use of Atomic Energy at USSR," Documents and Materials (1994): 106.

[21] L. Kochetkov, "From Mercury to Sodium," interview published electronically by ATOMINFO.RU (in Russian), <<http://www.atominfo.ru/news/air3253.htm>>, (accessed 24 June 2009).

[22] O. M. Saraev, "Operating Experience with Beloyarsk Power Reactor BN600 NPP, Beloyarsk Sverdlovsk Nuclear Power Plant," IAEA FBR database, < http://www.iaea.org/inis/nkm/nkm/aws/fnss/fulltext/1180_4.pdf > (accessed 24 June 2009).

[23] A. A. P. Macedo, Proposta de Um Reator Rápido Refrigerado a Gás Utilizando Transurânicos, Dissertação, Departamento de Engenharia Nuclear da Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil (2016).

[24] Richard Garwin, "Plutonium Recycle in the U.S. Nuclear Power System," Federation of American Scientists, Public Interest Report 60 (2007).

[25] George Lobsenz, "White House Moves to Restrict DOE Nuclear Research," Energy Daily, 15 January 2010.

[26] Committee on Separations Technology and Transmutation Systems, National Research Council, Nuclear Wastes: Technologies for Separation and Transmutation (Washington, D.C: National Academies Press, 1996).

[27] M.K. Meyer, R. Fielding, J. GAN - Fuel Development for Gas-Cooled Fast Reactors - Idaho National Laboratory. June 6-8, 2006, Reno Nevada INL/JOU-06- 11592 Submitted for INL approval 26-Jul-06.

[28] Inoue. M.- Thermal conductivity of uranium-plutonium oxide fuel for fast reactors - Journal of Nuclear Materials 282 (2000) 186-195

[29] Häfele W, Holdren JP, Kessler G, & Kulcinski GL (1977). Fusion and Fast Breeder Reactors. IIASA Research Report. IIASA, Laxenburg, Austria: RR-77-008.

[30] Guidez. J, Prêlé. G – Superphenix Technical and Scientific Achievements Atlantis Press (2017).

[31] Nuclear Engineering International, " Criticidade para o primeiro reator rápido da China.", 23 de julho de 2010. <https://web.archive.org/web/20110613091020/http://www.neimagazine.com/story.asp?sectionCode=132&storyCode=2056921> Acessado em 06/04/2021.

[32] World Nuclear Association, "Fast Neutron Reactors.", December 2020. <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/fast-neutron-reactors.aspx> Acessado em 06/04/2021.

[33] ANNUAL REPORT – GEN-IV International Forum, (2016).

[34] Nuclear Engineering International, " Críticas para o primeiro reator rápido da China", julho de 2010.



<https://web.archive.org/web/20110613091020/http://www.neimagazine.com/story.asp?sectionCode=132&storyCode=2056921> Página visitada em 18/01/2021.

[35] ITAR-TASS, "Russia, China Ink Deal on Nuclear Power Plant, Plan more Deals.", 27 de September de 2010. <https://www.aa.com.tr/en/energy/nuclear/russia-china-ink-four-nuclear-deals-in-beijing/20422> Acessado em 18/01/2021.

[36] Word Nuclear News, "Reator rápido chinês completa ciclo operacional de teste", agosto 2020. <<https://world-nuclear-news.org/Articles/Chinese-fast-reactor-completes-trial-operating-cyc>> Acessado em 18/01/2021.

[37] CFR-600, Instituto de Energia Atômica da China, China, (IAEA), 2012.

[38] Word Nuclear News, "Reator rápido russo atinge potência total", agosto 2016. <<https://www.world-nuclear-news.org/NN-Russian-fast-reactor-reaches-full-power-1708165.html>> acessado em 18/01/2021.

[39] Engenharia Nuclear Internacional, "Combustível MOX para BN-800 da Rússia". <<https://www.neimagazine.com/news/newsmox-fuel-for-russias-bn-800-4838389>>, acessado em 18/01/2021.

[40] Word Nuclear News, "Rússia adia BN-1200 para melhorar o projeto de combustível", abril 2015. <<https://www.world-nuclear-news.org/NN-Russia-postpones-BN-1200-in-order-to-improve-fuel-design-16041502.html>> acessado em 18/01/2021.

[41] Dalton David, NUNCNET, "Sem decisão em Beloyarsk BN-1200 ante de 2019", março 2016. <<https://www.world-nuclear-news.org/NN-Russian-fast-reactor-reaches-full-power-1708165.html>> acessado em 18/01/2021.

[42] Anatoly Diakov, Pavel Podvig, "A construção do reator de nêutrons rápidos BN-1200 da Rússia adiada até 2030", agosto 2019, <http://fissilematerials.org/blog/2019/08/the_construction_of_the_b.html> (acessado em 25/01/2021).

[43] Lenka. D., et al – Sensitivity Studies of ALLEGRO GFR Demonstrator - Institute of Nuclear and Physical Engineering, Slovak University of Technology in Bratislava, Ilkovičova 3, Bratislava, Slovakia, EU.

[44] Judd. A. M., - An Introduction to The Engineering of Nuclear reactors – Cambridge University Press – First edition 2014.

[45] ANZIEU. P., et al., - Gas-Cooled Fast Reactor (GFR): Overview and Perspectives – Gen-IV International Forum, GIF symposium, Paris, France 9-10 September 2009.

[46] Barbosa. F., Produção de Hidrogênio por Biomassa. Disponível em http://www.bioflu.uff.br/apresentacoes/1500_1530/UFF/ProducaodeHidrogenioporbio massa.pdf (Acesso em abril de 2015).

[47] Cruz, F. E., - Produção de hidrogênio em refinarias de petróleo: avaliação energética e custo de produção. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica de Energia de Fluidos) - Escola Politécnica, University of São Paulo, São Paulo, 2010.