

ARTIGO

# A GEOPOLÍTICA DO URÂNIO: PODER, SOBERANIA E A NOVA ORDEM ENERGÉTICA MUNDIAL

AUTOR

Leonom Guimarães

Este artigo expressa as opiniões dos autores, não representando necessariamente a opinião institucional da FGV.

## A GEOPOLÍTICA DO URÂNIO: PODER, SOBERANIA E A NOVA ORDEM ENERGÉTICA MUNDIAL

Leonam dos Santos Guimarães

### RESUMO

Este artigo analisa o papel estratégico do urânio na nova ordem energética global, abordando-o como vetor de soberania tecnológica e poder geopolítico. Da mineração ao reprocessamento, cada etapa do ciclo do combustível nuclear é examinada como uma camada de autonomia, cujo domínio determina a capacidade de uma nação produzir energia limpa, firme e independente. O estudo explora as assimetrias globais na produção de urânio e nas capacidades industriais, destacando a crescente influência do eixo sino-russo, os esforços do bloco ocidental para reorganizar suas cadeias de suprimento e a posição singular do Brasil, que reúne recursos, tecnologia e estabilidade institucional para completar seu ciclo nuclear. Com base em relatórios técnicos, tratados internacionais e estudos de caso comparativos, argumenta-se que a geopolítica do urânio não se limita ao acesso ao recurso mineral, mas estende-se ao domínio de tecnologias complexas e à diplomacia estratégica. No contexto da transição energética e das exigências climáticas, o urânio ressurge como ativo geopolítico, cujo valor se mede não apenas em toneladas de minério, mas em sua capacidade de gerar energia limpa e autonomia política.

**Palavras-chave:** urânio; ciclo do combustível nuclear; soberania energética; autonomia geopolítica; Brasil; transição energética.

### INTRODUÇÃO

A transição energética global recolocou a energia nuclear no centro das estratégias nacionais de segurança energética e descarbonização. Nesse contexto, o urânio assume um papel que extrapola sua condição de insumo industrial, configurando-se como ativo geopolítico de elevada sensibilidade. Conforme destaca Yergin (2020), os sistemas energéticos contemporâneos não podem ser compreendidos apenas sob a ótica econômica, mas também como expressões diretas de poder, segurança e soberania estatal. A disponibilidade de fontes limpas e firmes de energia tornou-se parte essencial da agenda climática, e a energia nuclear ressurge como componente-chave para cumprir metas de redução de emissões sem comprometer a segurança de suprimento.

Diferentemente do petróleo e do gás natural, cuja geopolítica se estrutura sobretudo em torno do controle de fluxos comerciais, o urânio está intrinsecamente associado ao domínio tecnológico e a regimes internacionais de controle. O ciclo do combustível nuclear, da mineração ao

reprocessamento, constitui uma cadeia de valor fortemente regulada, na qual cada etapa representa um patamar distinto de autonomia estratégica (IAEA, 2023a). Enquanto hidrocarbonetos podem ser comercializados como commodities convencionais, os materiais nucleares e suas tecnologias correlatas são objeto de salvaguardas, acordos multilaterais e restrições de proliferação, conferindo ao urânio uma dimensão geopolítica singular.

A literatura especializada reconhece que “o verdadeiro poder nuclear não reside apenas no acesso ao recurso mineral, mas na capacidade de controlar e integrar as etapas sensíveis do ciclo do combustível” (Deutsch; Moniz, 2009, p. 71). Essa característica confere ao urânio uma singularidade estratégica: sua exploração e utilização permanecem indissociáveis do papel do Estado nacional e de seus compromissos internacionais.

Em outras palavras, possuir reservas de urânio é importante, mas possuir tecnologia de enriquecimento ou reprocessamento eleva exponencialmente a importância geopolítica de um país. Nesse sentido, a governança do

urânio envolve uma tensão constante entre soberania energética e obrigações do Tratado de Não Proliferação Nuclear (TNP), criando uma dinâmica própria na ordem energética mundial.

Nas últimas décadas, observa-se crescente concentração da produção e das capacidades industriais do ciclo nuclear, paralelamente à ascensão de atores estatais fortemente integrados, em especial Rússia e China. Esse movimento tem provocado uma reorganização das cadeias ocidentais de suprimento e reacendido o debate sobre autonomia energética (NEA, 2022). Enquanto o Ocidente reduzia investimentos nucleares após o fim da Guerra Fria e acidentes como Chernobyl e Fukushima, o eixo sino-russo avançou na verticalização do ciclo nuclear, gerando novas assimetrias de poder [1][2]. A invasão da Ucrânia em 2022 intensificou essas preocupações, ao evidenciar a dependência europeia de serviços russos do combustível nuclear e motivar iniciativas para diversificar suprimentos.

Nesse cenário, o Brasil apresenta características singulares. Detentor de expressivas reservas de urânio, domínio tecnológico relevante e estabilidade institucional, o país reúne condições para estruturar um ciclo nuclear completo. O desenvolvimento histórico do programa nuclear brasileiro, do domínio da tecnologia de ultracentrifugação à criação da agência binacional ABACC com a Argentina, ilustra uma busca por autonomia equilibrada com compromissos internacionais.

O objetivo deste artigo é analisar a geopolítica do urânio sob uma perspectiva técnico-estratégica, examinando cada etapa do ciclo do combustível como camada de poder e discutindo suas implicações para a soberania e a inserção internacional do Brasil. Adicionalmente, incorporam-se estudos de caso de diferentes países (França, Irã, EUA e Índia) e discute-se o papel do urânio na transição energética global, incluindo o advento de novas tecnologias nucleares.

## METODOLOGIA

O estudo adota uma abordagem qualitativa e analítica, de natureza interdisciplinar, articulando engenharia nuclear, economia política internacional e estudos estratégicos. A metodologia baseia-se na decomposição analítica do ciclo do combustível nuclear em suas principais etapas, mineração, beneficiamento, conversão, enriquecimento, fabricação do combustível, uso em reatores, gestão do combustível irradiado e reprocessamento, examinadas como instrumentos de poder geopolítico. Cada etapa será analisada quanto aos requisitos tecnológicos, barreiras de entrada, distribuição global de capacidades industriais e relevância estratégica.

A pesquisa fundamenta-se em documentos técnicos e relatórios institucionais da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), da Agência de Energia Nuclear

da OCDE (NEA) e da World Nuclear Association (WNA), complementados por literatura acadêmica sobre geopolítica da energia e proliferação nuclear (Sagan; Waltz, 2003; Hymans, 2012). Dados quantitativos recentes, como produção mineral, capacidades industriais e fluxos comerciais, foram incorporados para atualizar as informações até 2025, em alinhamento com o contexto pós-pandemia e pós-conflito na Ucrânia. Esses dados foram extraídos de relatórios anuais (por exemplo, *Red Book* da NEA/IAEA de 2023-2024) e bases de dados setoriais, assegurando-se o uso das estatísticas mais recentes disponíveis.

O método comparativo é utilizado para analisar a organização das cadeias do combustível nuclear em diferentes blocos geopolíticos, com atenção especial ao eixo sino-russo, às economias ocidentais e ao caso brasileiro. São desenvolvidos estudos de caso de países selecionados que exemplificam diferentes modelos de abordagem do ciclo nuclear: França (modelo integrado e exportador), Irã (desafio proliferacionista e disputa diplomática), Estados Unidos (declínio e retomada do parque nuclear) e Índia (modelo híbrido fora do TNP). Não se empregam métodos quantitativos de modelagem preditiva, pois o foco reside na análise estrutural e estratégica do poder associado ao domínio do ciclo nuclear, em uma perspectiva predominantemente qualitativa.

## RESULTADOS

### O ciclo do combustível nuclear como arquitetura de poder

A análise evidencia que o ciclo do combustível nuclear configura uma arquitetura escalonada de poder, na qual o avanço de cada etapa representa um incremento na autonomia estratégica de um Estado. Países que dominam apenas a mineração e o beneficiamento do urânio permanecem estruturalmente dependentes de serviços tecnológicos externos, sobretudo nas etapas sensíveis de conversão e enriquecimento. Segundo a IAEA (2023b), menos de uma dezena de países concentra a quase totalidade das capacidades industriais de conversão e enriquecimento no mundo, ilustrando a exclusividade técnica dessas fases. Assim, embora cerca de vinte países realizem mineração de urânio, poucos conseguem transformar esse urânio bruto em combustível nuclear sem auxílio externo.

As etapas iniciais – prospecção, extração e beneficiamento do urânio – conferem acesso ao recurso físico. Minérios de urânio estão distribuídos globalmente de forma relativamente concentrada: três países (Cazaquistão, Canadá e Austrália) responderam juntos por aproximadamente 75% da produção mundial de urânio em 2024[3]. O Cazaquistão, em particular, destacou-se com cerca de 39% da oferta global, seguido pelo Canadá (24%)

e Namíbia (12%)[4]. Essa concentração na origem cria uma base de poder natural, mas ainda limitada: deter minas de urânio garante renda e influência comercial, porém não assegura independência no suprimento de combustível nuclear pronto para uso em reatores. Ademais, mais de 50% do urânio mundial já é produzido via métodos não convencionais (como lixiviação in situ), o que demanda know-how químico específico e pode envolver empresas multinacionais em joint ventures, diluindo parcialmente o poder do Estado de origem sobre a produção (NEA, 2022).

À medida que avançamos no ciclo, o grau de complexidade técnica e de regulação internacional se eleva. A conversão, processo químico de refinar o concentrado de urânio (yellowcake,  $U_3O_8$ ) e transformá-lo em gás hexafluoreto de urânio ( $UF_6$ ), é realizada comercialmente em pouquíssimos países (Canadá, França, China, Rússia e parcialmente nos EUA) [5][6]. Em 2022, a capacidade mundial de conversão era da ordem de 62 mil toneladas de urânio por ano, distribuída majoritariamente entre cinco empresas nesses cinco países [6].

Observa-se significativa ociosidade histórica nesse segmento: por exemplo, nos EUA a única planta (ConverDyn, em Illinois) ficou anos parada, levando a uma produção nula em 2022 [7]. Isso gerou vulnerabilidades, evidenciadas quando interrupções ou reduzida produção de conversão criaram gargalos de suprimento na década de 2010. A partir de 2022-2023, com a escassez relativa e a meta ocidental de reduzir dependência de conversão russa (20% da capacidade global) [8], houve movimentos para reativar e ampliar plantas – como a própria ConverDyn nos EUA, reaberta em 2023, e expansões planejadas na China para atender sua frota doméstica (WNA, 2024).

O enriquecimento desponta como o principal gargalo geopolítico de todo o ciclo nuclear. Trata-se do processo pelo qual o teor do isótopo físsil U-235 é aumentado em relação ao urânio natural, tornando-o apto a uso como combustível em reatores de água leve (que requerem cerca de 3-5% de U-235). Por ser altamente intensivo em capital, tecnologia e energia, o enriquecimento ficou historicamente restrito a um clube muito seletivo de países – essencialmente aqueles com arsenais nucleares ou aliados próximos destes.

Além disso, é objeto de severos controles internacionais de não proliferação, já que a mesma tecnologia pode produzir urânio altamente enriquecido para armas nucleares se extrapolados os níveis de enriquecimento. Como observam Sagan e Waltz (2003), a capacidade de enriquecer urânio constitui simultaneamente um ativo energético e um potencial vetor de poder estratégico, razão pela qual permanece sob vigilância constante da comunidade internacional.

Em 2022, quatro grandes atores detinham virtualmente toda a capacidade global de enriquecimento comercial: Rússia (Rosatom/Tenex), com cerca de 27 milhões de unidades de trabalho de separação por ano – SWU/ano; o consórcio Urenco (Europa Ocidental, com plantas também nos EUA), com ~18 milhões SWU/ano; a Orano (França), com 7,5 milhões SWU/ano; e a estatal chinesa CNNC, com aproximadamente 9 milhões SWU/ano[9][10]. Juntos, esses atores representavam mais de 60 milhões SWU de capacidade, contra uma demanda anual na casa de 50 milhões SWU para suprir todos os reatores do mundo. A Rússia sozinha detém cerca de 46% da capacidade global de enriquecimento [8], suprindo não apenas suas usinas domésticas mas também fornecendo serviços de enriquecimento a diversos países (especialmente na Europa e Ásia, mas também aos EUA).

Esse quadro confere a Moscou considerável influência: por exemplo, até 2021, empresas de eletricidade na União Europeia importavam do consórcio russo Tenex cerca de 20-30% dos serviços de enriquecimento de que necessitavam. Tal dependência tornou-se crítica após 2022, levando a esforços ocidentais para expansão urgente de capacidades domésticas e de parceiros confiáveis [11]. Vale notar que outros países possuem enriquecimento em menor escala, como Brasil, Japão, Irã, Paquistão, Índia, porém em volumes insuficientes para o mercado global e frequentemente limitados a usos domésticos ou de pesquisa [12]. Assim, o enriquecimento é a etapa que melhor exemplifica o “poder concentrado” no ciclo nuclear: poucos detentores, alta barreira de entrada e implicações diretas para a segurança internacional.

A fabricação de combustível nuclear, por sua vez, embora tecnologicamente complexa, está mais disseminada geograficamente, pois muitos países operadores de usinas construíram fábricas de montagem de elementos combustíveis. Trata-se da etapa de converter o urânio enriquecido (geralmente na forma de pó de  $UO_2$ ) em pastilhas cerâmicas e montá-las em varetas e em conjuntos combustíveis adaptados a cada tipo de reator.

Essa atividade é tipicamente realizada pelo próprio país ou pelo fornecedor da tecnologia nuclear: por exemplo, a Westinghouse e a Framatome produzem elementos combustíveis para reatores tipo PWR/BWR em diversos países (EUA, Suécia, Alemanha, etc.), enquanto a russa TVEL fabrica para reatores VVER e outras linhas soviéticas, e assim por diante. Apesar de mais países envolvidos, o mercado de fabricação também possui uma estrutura oligopolista, dominado por poucas corporações, muitas delas pertencentes aos mesmos grupos que constroem os reatores.

A participação da Rússia nesse segmento é estimada em 10% da capacidade mundial [8], fornecendo principalmente combustível para as usinas de projeto

soviético em seu território e no exterior (Europa Oriental, Ásia). Após 2022, a fabricação de combustíveis do tipo russo (VVER) tornou-se também questão estratégica: consórcios ocidentais têm rapidamente desenvolvido combustíveis alternativos para reatores VVER-1000 e VVER-440 operando na Ucrânia, Finlândia, Eslováquia, Ucrânia e Bulgária, buscando eliminar a necessidade de importação de elementos combustíveis da TVEL russa [13][14]. Portanto, mesmo nessa etapa, a geopolítica se faz presente, com esforços de diversificação de fornecedores por razões de segurança de suprimento.

Finalmente, as etapas finais do ciclo, gestão do combustível irradiado, reprocessamento e disposição final, agregam novas dimensões de poder e controvérsia. O gerenciamento de rejeitos radioativos e do combustível usado é crítico tanto do ponto de vista ambiental quanto estratégico. Países que desenvolvem reprocessamento (separação de urânio e plutônio do combustível esgotado para reciclagem) atingem o mais alto patamar tecnológico do ciclo, mas ao custo de preocupação proliferacionista, pois o plutônio extraído pode, em teoria<sup>1</sup>, ser desviado para artefatos nucleares.

Atualmente, apenas um punhado de nações mantém programas de reprocessamento comercial de combustível: França e Rússia são os principais, tendo capacidade industrial instalada (em La Hague e Ozersk/Mayak, respectivamente) para processar algumas centenas de toneladas de combustível por ano [15]. A França opera duas plantas em La Hague desde os anos 1980, com capacidade combinada em torno de 1700 toneladas/ano, reprocessando combustível de suas usinas e de clientes estrangeiros [16][15]. A Rússia possui capacidade menor (cerca de 400 t/ano) focada em combustível de reatores domésticos e estoca boa parte do plutônio separado [15]. O Reino Unido historicamente reprocessou combustível (usinas de Sellafield), porém encerrou essa atividade em 2022. Japão investiu em uma grande planta em Rokkasho (800 t/ano), que após muitos adiamentos estava prevista para iniciar operações por volta de 2024-2025 [17]. A Índia reprocessa quantidades modestas de combustível de seus reatores de água pesada (PHWR) para aproveitamento de plutônio em seu programa de reatores rápidos, enquanto China e outros avaliam estabelecer essa capacidade nas próximas décadas.

Em âmbito global, já foram descarregadas cerca de 400 mil toneladas de combustível irradiado desde o início da era nuclear, das quais aproximadamente 30% foram reprocessadas [17]. Ou seja, a maior parte encontra-se

<sup>1</sup> O plutônio separado do combustível irradiado de reatores a água leve (PWR e BWR) não é considerado “weapons grade” porque contém uma alta proporção do isótopo Pu-240, que tem alta taxa de fissão espontânea. Isso torna sua utilização em armas nucleares instável e tecnicamente arriscada, devido à possibilidade de pré-detonação. O

estocada em piscinas ou depósitos secos, representando um passivo estratégico de longo prazo. Quem domina o reprocessamento e a reciclagem (por exemplo, na forma de combustível MOX, óxido misto de urânio e plutônio) consegue reduzir a demanda por urânio natural em até ~30%, fechando parcialmente o ciclo nuclear [18][19]. Isso pode ser visto como um vetor de autonomia em relação ao suprimento primário de urânio, além de diminuir o volume de resíduos de alta atividade a serem dispostos geologicamente.

Entretanto, os custos elevados e as sensibilidades políticas fizeram com que muitos países optassem por não reprocessar, enviando o combustível usado diretamente para armazenamento final geológico (estratégia *open fuel cycle*). Assim, o reprocessamento permanece uma opção exercida por poucos, reforçando a assimetria de poder tecnológico no cenário internacional.

O ciclo do combustível nuclear configura-se como uma escada de degraus tecnológicos: a simples posse do minério por si só confere vantagem limitada. A capacidade de convertê-lo e enriquecê-lo confere autonomia significativa e possibilidade de influência e atenção internacional, *c* a fabricação de combustível consolidada permite sustentar parques nucleares internamente e exportar tecnologia, e *d* o fechamento do ciclo via reprocessamento eleva o país ao patamar dos protagonistas tecnológicos, com todos os benefícios e encargos decorrentes (incluindo pressões políticas no regime de não proliferação).

Cada etapa dominada internamente reduz dependências de fornecedores externos e aumenta o poder de barganha do país nas arenas internacionais – mas também implica em maiores responsabilidades regulatórias e em visibilidade geopolítica. Em essência, quem controla integralmente o ciclo nuclear detém não apenas segurança energética de longo prazo, mas também um instrumento de política externa e de projeção de poder, seja pelo fornecimento estratégico de combustível a aliados, seja pela sinalização de capacidade tecnológica de ponta.

### Concentração produtiva e vulnerabilidade sistêmica

Os resultados indicam elevada concentração tanto da produção de urânio natural quanto, sobretudo, das etapas industriais sensíveis do ciclo. Esse grau de concentração cria vulnerabilidades sistêmicas para importadores dependentes e reflete escolhas político-tecnológicas de longo prazo.

“plutônio de grau bélico” (weapons grade) possui mais de 90% de Pu-239, o que só é obtido com queima muito baixa e reprocessamento rápido, algo não típico em reatores comerciais.

De acordo com o Red Book da OECD/IAEA (2023), poucos países respondem pela maior parte da produção mundial de urânio, e uma proporção significativa dessa produção é controlada por empresas estatais ou paraestatais, revelando a interseção entre recursos naturais e estratégias nacionais.

Conforme mencionado, cerca de três quartos do urânio extraído de minas provêm de apenas três nações [3], e quando ampliamos o escopo para as dez principais, já se cobre quase 95% da produção global. Essa geografia concentrada implica que choques políticos, econômicos ou logísticos em um único país-chave podem afetar imediatamente a oferta mundial. Um exemplo frequentemente citado é o Cazaquistão: instabilidades internas ou sanções envolvendo esse país centro-asiático, hoje o maior produtor, teriam repercussão direta nos mercados de urânio e potencialmente no abastecimento de usinas ao redor do globo.

De fato, eventos como a redução deliberada de produção pelas mineradoras cazaques em 2017-18 para conter queda de preços demonstraram como decisões de um ator dominante repercutem no equilíbrio oferta-demanda. Importadores com parque nuclear significativo, mas pouca produção doméstica (caso de muitos países europeus, Japão, Coreia do Sul), ficam à mercê desses fluxos externos. A existência de estoques estratégicos e de mercados secundários (por exemplo, estoques comerciais, urânio proveniente do desmanche de ogivas) mitiga parcialmente o risco, mas não o elimina, especialmente em um contexto de crescimento projetado da demanda nuclear.

Entretanto, a concentração é ainda mais acentuada nas etapas do *front-end nuclear*. A já citada oligopolização do enriquecimento (praticamente restrito a quatro fornecedores comerciais globais) significa que interrupções na capacidade de qualquer um deles (por avaria técnica, decisões políticas ou conflitos) criam gargalos imediatos. Conforme assinala a NEA (2022), interrupções ou restrições nessas cadeias têm impactos imediatos sobre a segurança energética de países nuclearmente dependentes.

Um caso ilustrativo é a dependência europeia de enriquecimento russo: após a eclosão da guerra na Ucrânia e as subsequentes sanções, as *utilities* na União Europeia enfrentaram o desafio de substituir gradualmente serviços de enriquecimento e até mesmo urânio proveniente da Rússia, sob pena de comprometer o suprimento de combustível para dezenas de reatores [11]. Essa vulnerabilidade catalisou ações coordenadas, como planos de expansão da Urenco e Orano e parcerias transatlânticas para financiar a produção ocidental de urânio enriquecido de alto teor (HALEU) necessário a futuros reatores avançados [20][21].

Cabe destacar que mais de 50% da produção mundial de urânio está sob controle de empresas estatais ou parcerias com participação governamental majoritária, o que reforça a dimensão geopolítica da oferta. Em 2024, as três maiores empresas produtoras, Kazatomprom (Cazaquistão), Cameco (Canadá) e Orano (França) juntas respondiam por quase 50% da extração global [22]. Se ampliarmos às dez maiores companhias (incluindo Uranium One/Rosatom, CGN/China, Navoi/Uzbequistão, CNNC/China, ARMZ/Rússia, BHP/Austrália etc.), elas representavam mais de 90% da produção mundial [23].

Notadamente, muitas dessas empresas têm o Estado como acionista controlador ou influente: Kazatomprom é estatal cazaque; Orano possui controle estatal francês; CGN e CNNC são estatais chinesas; Uranium One e ARMZ são braços da estatal russa Rosatom. Essa realidade confere aos governos instrumentos de influência sobre o mercado de urânio, seja regulando volumes exportados, preços, ou direcionando fluxos preferenciais a certos clientes.

O relatório NEA (2022) sublinha que mais da metade da produção mundial pode, em certas circunstâncias, priorizar *secure supply* (suprimento garantido aos próprios países ou aliados) em vez de mecanismos puramente comerciais [24]. Em um mundo onde considerações de segurança energética ganham contornos estratégicos, é plausível antecipar que Estados integrem a posse do urânio e do ciclo nuclear às suas políticas de *hedging* contra choques externos.

Essa concentração ampliou o poder de barganha dos países integrados e transformou o urânio em instrumento de pressão (ainda que indireta). Por exemplo, embora raramente se imponham “embargos de urânio” declarados, até porque o mercado é menos visível politicamente que o do petróleo, a mera possibilidade de restrição de fornecimento de combustível nuclear russo após 2022 foi suficiente para países importadores considerarem mudanças onerosas em suas políticas (como prolongar operação de usinas a carvão por precaução). O urânio e seus derivados tornaram-se, nesse sentido, parte da equação de segurança energética assim como o gás natural o foi na Europa.

No âmbito do ciclo completo, poucos países hoje conseguem se considerar autossuficientes em todas as etapas: EUA, Rússia, China e França são exemplos notáveis, ainda que paradoxalmente, os EUA dependam de importações de urânio e serviços de conversão e enriquecimento para suprir seu parque nuclear, fruto de políticas de mercado que levaram ao declínio de suas indústrias internas. A China, apesar de grandes recursos minerais, ainda importa significativa quantidade de urânio bruto para estocar, mas desenvolve aceleradamente suas capacidades do *front-end*.

Essas assimetrias geram vulnerabilidades para uns e oportunidades estratégicas para outros: países que detêm excedentes em alguma etapa crítica podem usá-los como moeda de troca diplomática ou alavanca econômica.

A Rússia, por exemplo, ao oferecer pacotes completos de construção de usinas nucleares junto com fornecimento vitalício de combustível e serviços (estratégia *build-own-operate BOO*), garante influência de longo prazo nos países clientes. A França utiliza sua competência no ciclo (via Orano) para firmar parcerias de reciclagem e gestão de resíduos com outros países, reforçando sua imagem de líder nuclear. Em contraste, países sem domínio dessas etapas precisam se ancorar em acordos internacionais, como consórcios de fornecimento multinacional (caso do consórcio URENCO no enriquecimento, que atende vários países ocidentais sob um arranjo trinacional composto pela Alemanha, Holanda e Grã-Bretanha) ou reservas estratégicas coordenadas pela IAEA (como o Banco de Urânio de Baixo Enriquecimento estabelecido no Cazaquistão para emergências de abastecimento).

Em suma, a forte concentração observada no ciclo nuclear mundial decorre menos de vantagens naturais absolutas e mais de decisões estatais deliberadas e investimentos de longo prazo. Isso gerou vulnerabilidades sistêmicas: importadores dependentes de poucos fornecedores ficam expostos, e qualquer ruptura, seja por conflitos, seja por disputas comerciais, reverbera no sistema inteiro. Ao mesmo tempo, tal configuração confere poder assimétrico aos detentores das capacidades-chaves, permitindo-lhes moldar condições de mercado e influenciar agendas políticas (por exemplo, exigindo contrapartidas ou alinhamentos para manter suprimentos estáveis de combustível). Esses resultados corroboram a tese de que a geopolítica do urânio é, essencialmente, a geopolítica da autonomia: garantir o domínio de mais etapas do ciclo é sinônimo de ampliar graus de liberdade e resiliência diante de um cenário internacional incerto.

### Ascensão sino-russa no ciclo nuclear global

Tem sido verificada a consolidação de um eixo sino-russo como elemento central da atual geopolítica do urânio e do nuclear. Rússia e China estruturaram estratégias estatais de longo prazo voltadas ao controle vertical do ciclo do combustível, integrando recursos minerais, domínio tecnológico, financiamento estatal e diplomacia nuclear ativa (Kuznetsov, 2020; Li, 2022). Essa convergência não

<sup>2</sup> MOX (Mixed Oxide Fuel) é um tipo de combustível nuclear fabricado a partir de uma mistura de dióxido de plutônio, recuperado de combustível irradiado, e dióxido de urânio natural, empobrecido ou levemente enriquecido. Utilizado principalmente em reatores térmicos, permite o reaproveitamento do plutônio proveniente de usinas nucleares ou de arsenais desmobilizados, contribuindo para a redução de estoques estratégicos e a sustentabilidade do ciclo do combustível nuclear.

é uma aliança formal declarada, mas evidencia interesses e políticas complementares que reforçam mutuamente sua posição dominante no cenário nuclear.

No caso da Rússia, a herança soviética deixou um vasto complexo nuclear integrado, que foi modernizado e orientado para o mercado externo sob gestão da corporação estatal Rosatom ao longo das últimas duas décadas. A Rússia não apenas possui reservas de urânio e capacidade mineradora doméstica (embora contribua com somente ~6% da produção mundial de urânio bruto) [8], como também garante suprimento adicional via participações em minas no Cazaquistão (Uranium One) e contratos de longo prazo na Ásia e África. A Rússia investiu pesadamente na manutenção e expansão de suas instalações de conversão e enriquecimento herdadas da URSS, tornando-se o *hub* mundial nessas etapas. Como já visto, cerca de 46% de toda capacidade global de SWU pertence à Rosatom [8], em quatro grandes plantas de ultracentrífugas em seu território.

Essa capacidade excedente permite à Rússia ser exportadora líquida de serviços de enriquecimento, atendendo clientes na Europa, Ásia e nas Américas. Adicionalmente, a Rosatom controla a fabricação de combustível nuclear para reatores de projeto soviético/russo (linha VVER, RBMK etc.) através da subsidiária TVEL, e detém tecnologia de reprocessamento e reciclagem (incluindo desenvolvimento de combustíveis MOX<sup>2</sup> e REMIX<sup>3</sup>).

Em termos diplomáticos, Moscou adotou a oferta de pacotes completos como instrumento de influência: em países como Turquia, Egito, Bangladesh e Hungria, a Rosatom financia, constrói e opera usinas, fornece o combustível (enriquecido e fabricado na Rússia) e recupera o combustível usado de volta (para armazenamento ou reprocessamento em seu território). Esse modelo *turn key* cria dependência prolongada dos clientes em relação à Rússia, não apenas economicamente, mas também em termos de política externa, já que a segurança energética desses países passa a estar atrelada à boa vontade e estabilidade do fornecedor russo.

Como observa Li (2022), a exportação de tecnologia nuclear chinesa, e pode-se dizer o mesmo da russa, é inseparável de objetivos geopolíticos mais amplos, nos quais o urânio e o combustível desempenham papel estruturante. No caso russo, ao amarrar países a contratos de fornecimento de combustível de 60 anos (vida típica de

<sup>3</sup> REMIX (Regenerated Mixture) é um combustível desenvolvido na Rússia que combina urânio empobrecido com plutônio recuperado de combustível irradiado, formando uma mistura homogênea reutilizável em reatores térmicos. Ele permite múltiplos reciclos no mesmo tipo de reator, reduz a necessidade de enriquecimento e minimiza resíduos de alto nível, promovendo um ciclo do combustível mais fechado e sustentável.

uma usina), garante-se um laço de influência que transcende governos e conjunturas de curto prazo.

A China, por sua vez, emergiu nas últimas décadas como potência nuclear civil tanto pela expansão doméstica quanto pelo incipiente movimento de exportação de reatores. O país implementou uma política de aquisição de *know-how* estrangeiro (absorvendo tecnologia francesa, canadense, russa e americana), seguida pela nacionalização e inovação local. Em relação ao ciclo do combustível, a China partiu de uma situação limitada nos anos 1990 para, em 2020, ser praticamente autossuficiente em conversão, enriquecimento e fabricação de combustível para sua frota interna, além de iniciar esforços em mineração doméstica e no exterior.

A CNNC chinesa hoje opera duas plantas de conversão que atendem plenamente à demanda doméstica crescente [25][26]. No enriquecimento, a China possui cerca de 9 milhões SWU/ano em 2022 (com previsão de quase dobrar até 2030) [9], tendo alcançado tal patamar combinando transferência de tecnologia das centrifugas russas (nos anos 2000) com o desenvolvimento de máquinas próprias mais modernas [10]. Assim, Pequim reduziu drasticamente importações de serviços de enriquecimento e projeta inclusive exportar no futuro.

Em mineração, a escassez de reservas domésticas de alto teor levou a investimentos chineses em mineradoras africanas (por exemplo, Husab na Namíbia, hoje controlada pela chinesa CGN e já o terceiro maior depósito em produção no mundo [27]). Essa aquisição assegura fornecimento dedicado para a China no longo prazo. No *back-end*, a China firmou acordo com a França para construção de uma instalação de reprocessamento em seu território (a ser construída pela Orano), indicativo de que planeja fechar parte de seu ciclo e reutilizar materiais valorizáveis. Enquanto isso, expandiu a capacidade de armazenar combustível usado e pesquisa reprocessamento piloto.

Um aspecto importante da ascensão sino-russa é a complementaridade e cooperação em certos campos. Os dois países têm colaborado, por exemplo, no desenvolvimento de reatores rápidos (a Rússia forneceu à China um reator rápido experimental e coopera no projeto de outros), no fornecimento de urânio (a China importou grandes quantidades de urânio natural do Cazaquistão, viabilizado em parte por joint ventures cazaque-russas), e em iniciativas diplomáticas conjuntas defendendo o direito ao uso pacífico da energia nuclear sem discriminações.

Ambos se opõem a restrições adicionais como o *Additional Protocol* da IAEA quando convém (a Rússia enquanto *nuclear weapon state* não precisa, mas alinha-se retoricamente com preocupações de soberania; a China demorou a adotar o protocolo e apoiou a ideia de arranjos

regionais alternativos, ressonante com visões brasileiras e de outros). Politicamente, a Rússia e a China advogam por um mundo multipolar também na governança nuclear, em contraste à ordem dominada pelo ocidente pós-1970. Patrocinam, por exemplo, bancos regionais de combustível sob os auspícios da AIEA (o banco de LEU no Cazaquistão contou com apoio russo, enquanto a China propôs um banco de combustível asiático).

Esse modelo sino-russo permite a oferta de pacotes completos de tecnologia nuclear, reforçando dependências estratégicas. A experiência russa já foi mencionada; no caso chinês, que começa a exportar seus projetos de reator Hualong One (para Paquistão e, prospectivamente, para a Argentina e outros), a estratégia segue linha similar: financiamento facilitado, treinamento de pessoal, acordo de fornecimento de combustível (em geral, urânio enriquecido fornecido pela China), e promessas de gestão integrada do ciclo do combustível.

Embora a China ainda não retire combustível usado de outros países (como faz a Rússia), oferece ajuda na construção de instalações de armazenamento e potencial reciclagem futura. Dessa forma, ao vender um reator, tanto Moscou quanto Pequim procuram “amarra” o cliente a um ecossistema nuclear no qual eles serão provedores centrais. Como resultado, tais clientes podem se alinhar politicamente com os interesses desses fornecedores, seja votando de determinada forma em agências internacionais ou apoiando iniciativas nucleares dos mesmos (por exemplo, países receptores de tecnologia russa apoiam consistentemente as propostas russas na IAEA e resistiram a moções que pudesse prejudicar a Rosatom).

A ascensão sino-russa no ciclo nuclear global ilustra um repositionamento de poder no século XXI. Enquanto até os anos 1990 a liderança nuclear civil residia amplamente com EUA, Europa Ocidental e Japão (no campo tecnológico e industrial), hoje Rússia e China capturaram parcela substancial desse protagonismo, especialmente no *front-end* do ciclo e na capacidade de financiar/exportar projetos completos. Isso foi viabilizado por decisão política de tratar o nuclear como setor estratégico, com investimentos estatais continuados mesmo em fases de baixa econômica e por diplomacia proativa em oferecer parcerias a emergentes.

O impacto geopolítico é evidente: definem-se novas dependências (países consumidores ligados ao eixo sino-russo); desloca-se o equilíbrio de normas (com maior tolerância a modelos alternativos de salvaguardas e críticas a monopólios ocidentais); e coloca-se pressão sobre o Ocidente para revitalizar suas indústrias nucleares se quiser manter influência.

Em outras palavras, o controle do ciclo do combustível, quando articulado à diplomacia e ao financiamento,

transformou-se numa ferramenta de projeção de poder – exatamente como argumentava Kuznetsov (2020) ao analisar a estratégia russa. O eixo sino-russo demonstra que domínio nuclear não é apenas uma questão de energia, mas de posição geoestratégica na ordem global emergente.

### Reorganização das cadeias ocidentais

Em resposta às dinâmicas acima, países ocidentais iniciaram processos de reestruturação de suas cadeias de suprimento nuclear, buscando reduzir dependências críticas e resgatar capacidades há muito negligenciadas. Nas últimas décadas do século XX, muitos países ocidentais desaceleraram investimentos no ciclo nuclear completo em virtude de excesso de oferta, considerações de custo ou pressão antinuclear. Houve fechamento de minas pouco competitivas, consolidação de instalações de conversão (por exemplo, a Europa concentrou tudo em uma planta no Canadá e outra na França), e abandono de enriquecimento doméstico em alguns casos (a Holanda, o Reino Unido e a Alemanha fundiram esforços no Urenco; a Espanha e a Suécia fecharam plantas; os EUA encerraram enriquecimento por difusão em 2013 e ficaram sem capacidade própria por anos). Essa retração ocidental ocorreu paralelamente ao avanço russo-chinês, gerando complacência que apenas recentemente foi confrontada.

Segundo a WNA (2023), observa-se uma retomada de investimentos em conversão e enriquecimento em países que haviam desativado ou reduzido essas capacidades nas décadas anteriores [28][29]. Nos EUA, por exemplo, o governo federal aprovou em 2022–2023 fundos significativos (mais de US\$ 1,5 bilhão) para reconstruir uma cadeia de suprimento nuclear doméstica, incluindo incentivo à extração de urânio, reabertura da planta de conversão Metropolis e, principalmente, apoio à empresa Centrus Energy para implantar cascatas de centrifugadoras para produção de urânio de baixo enriquecimento com alto teor (LEU+ e HALEU)<sup>4</sup> em Pilketon, Ohio [30][21]. A meta explícita é reduzir e eventualmente eliminar a dependência de combustíveis nucleares russos até 2030 [8].

A União Europeia, por sua vez, tem financiado projetos para qualificar combustíveis não russos para reatores VVER, e a Urenco anunciou planos de ampliar sua produção de SWU tanto nos EUA quanto na Europa [29][31]. A França, que já era relativamente autossuficiente, decidiu em 2023 expandir sua planta de enriquecimento Georges Besse II em 2,5 milhões SWU (um aumento de 33%) [32], além de considerar novas centrifugadoras de última geração em parceria potencial com a Urenco e outros.

<sup>4</sup> LEU (Low Enriched Uranium) é urânio com teor de U-235 entre 3% e 5%. LEU+ é uma variação com enriquecimento entre 5% e 10%.

O Canadá, tradicional fornecedor de urânio natural e conversão, planeja aumentar a conversão em Port Hope e estuda enriquecer urânio para suprir combustíveis de pequenos reatores modulares (SMR) que vierem a ser implantados domesticamente.

Entretanto, a literatura aponta limitações relevantes nessas iniciativas, associadas a custos elevados, prazos longos e entraves regulatórios (NEA, 2022). Por exemplo, reativar minas de urânio fechadas no Ocidente esbarra em questões ambientais e na volatilidade do preço do urânio que, embora tenha subido pós-2021, historicamente ficou baixo no período 2011–2018, desestimulando investimentos de longo prazo. Da mesma forma, erguer novas plantas de enriquecimento ocidentais requer não apenas capital intensivo como também tempo (tipicamente 5–10 anos para construir e escalar uma grande instalação). Enquanto isso, as usinas existentes precisam garantir suprimentos imediatos: logo, no curto prazo, a mitigação tem ocorrido via parcerias estratégicas.

Países com recursos e estabilidade institucional têm sido cortejados para integrar cadeias ocidentais: a Austrália (aliada Ocidental com 28% das reservas mundiais de urânio [33]) intensificou acordos de fornecimento de urânio aos EUA e Europa; acordos comerciais com o Cazaquistão (apesar de sua proximidade à Rússia) foram mantidos e até ampliados para assegurar urânio aos mercados ocidentais; e países emergentes confiáveis, como a Namíbia, tornaram-se foco de investimentos europeus para diversificar a oferta africana em detrimento de fornecimentos vinculados à China.

Na conversão, a Orano (França) e a Cameco (Canadá) anunciaram uma aliança para aumentar a produção e possivelmente coordenar oferta, evitando déficits que forçariam clientes a recorrer à Rússia. E no enriquecimento, discute-se até uma iniciativa multilateral para produção de HALEU envolvendo EUA, Canadá, Reino Unido e possivelmente o Japão, de modo a preterir a tecnologia russa nessa nova frente comercial.

O resultado dessas medidas tende a ser uma recomposição parcial das cadeias ocidentais, mas não sua independência total em curto prazo. A Ocidente procura reconstruir capacidade nas etapas críticas, mas realisticamente dependerá ainda de alguns elos externos (por exemplo, urânio do Cazaquistão ou Austrália, até que minas locais prosperem; ou serviços de enriquecimento do Urenco e Orano suprindo diversos países que não terão seus próprios). Assim, caminha-se para uma fragmentação geopolítica das cadeias de suprimento: de um lado, um bloco sino-russo (e satélites) integrado nuclearmente; de

HALEU (High-Assay Low Enriched Uranium) é urânio com teor de U-235 entre 10% e 20%, usado em reatores avançados.

outro, um bloco Ocidental revitalizado, alicerçado em cooperação entre si e com parceiros confiáveis.

Essa divisão, se cristalizada, representaria uma mudança significativa em relação à interdependência pré-2020, quando insumos do ciclo circulavam globalmente com relativa fluidez comercial. Doravante, considerações de segurança nacional filtram essas trocas.

Um caso notório é o da energia nuclear na Europa pós-2022: ao perceberem que importavam praticamente 100% do urânio enriquecido da Rússia para certas usinas, vários países da UE, junto à Comissão Europeia, lançaram em 2023 um plano de ação para assegurar insumos nucleares. Esse plano incluiu financiamento para que a empresa Urenco amplie rapidamente a produção em suas plantas nos Países Baixos e Alemanha [31], incentivo para a Westinghouse estabelecer fábrica de combustível para VVER na UE (projeto em andamento na Suécia e Espanha), e até compras conjuntas de urânio natural para barganhar melhores condições no mercado (similar ao consórcio de compra de gás). Ou seja, a reorganização não é apenas industrial, mas também institucional, com mecanismos coletivizados de resposta a riscos de suprimento.

Em paralelo, a consciência de vulnerabilidade levou alguns países a reavaliar decisões passadas de abandono do nuclear. Como exemplo, a Polônia, que não tinha programa nuclear, decidiu ingressar e garantir que todo o ciclo de suprimentos de suas futuras usinas seja diversificado e amigável: assinou contratos para comprar urânio do Austrália e combustíveis de projeto americano, evitando amarras com Rússia ou China. O Japão, que tradicionalmente importava a maior parte do ciclo, anunciou investimentos para retomar capacidade interna de enriquecimento e ampliar seu consórcio de reprocessamento (Rokkasho), em parte para diminuir exposição externa e reconquistar confiança pública no programa nuclear doméstico, visto agora como vital para independência energética e metas de carbono.

A reorganização das cadeias ocidentais confirma que a energia nuclear voltou a ser tratada como questão de segurança nacional, e não meramente um assunto comercial ou tecnológico. Os países ocidentais parecem dispostos a arcar com custos adicionais, como subsídios e duplicação de capacidades, para garantir que o combustível de suas usinas não se torne um ponto de pressão geopolítica a ser explorado por rivais estratégicos. Essa reordenação, embora ainda incipiente, representa uma inflexão na geopolítica do urânio: um realinhamento de fluxos de materiais e tecnologia alinhado a clivagens geopolíticas mais amplas, marcando o fim de uma era de hiperglobalização também para o setor nuclear.

## O papel estratégico do Brasil

O Brasil emerge como caso singular entre as economias emergentes e países não nuclearmente armados. O país detém uma das maiores reservas de urânio do mundo, cerca de 5% das reservas identificadas globais, concentradas principalmente em Jazida de Santa Quitéria (CE) e Lagoa Real (BA) e acumulou competências tecnológicas relevantes ao longo do desenvolvimento de seu programa nuclear (IPEN, 2022). O domínio progressivo do ciclo do combustível no Brasil foi concebido desde a década de 1970 como instrumento de soberania e desenvolvimento nacional. Essa visão estratégica perpassou diferentes regimes políticos, desde o programa nuclear autônomo durante o governo militar até os esforços pós-1990 de transparência e uso pacífico, indicando um consenso duradouro sobre a importância geopolítica do nuclear.

Atualmente, o Brasil possui capacitações nas principais etapas do ciclo: realiza a mineração e beneficiamento de urânio (embora de forma intermitente e ainda não em larga escala comercial, com a INB operando a unidade de Caetité e planejando Santa Quitéria nos próximos anos); domina a etapa de conversão em escala piloto (um unidade de conversão de UF<sub>6</sub> foi desenvolvida em Iperó para pequenas quantidades, mas o país continua enviando parte do *yellowcake* ao exterior quando necessita enriquecimento externo); detém tecnologia própria de enriquecimento isotópico via ultracentrífugas, desenvolvida pelo Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo e dominada industrialmente pela INB na fábrica de Resende (RJ). Desde 2009, a INB produz localmente urânio enriquecido para as recargas das usinas de Angra, ainda que parcial: em 2022, a capacidade instalada atendia cerca de 60–70% das necessidades de Angra 1 [34], com planos de expansão para suprir 100% de Angra 1 e 2 até meados dos anos 2030 [35].

Ou seja, o Brasil caminha para autossuficiência em enriquecimento para seu atual parque. Ademais, o país conta com uma instalação de fabricação de combustível nuclear em Resende, operada pela INB, que produz os elementos combustíveis para Angra 1 e 2 a partir do pó de UO<sub>2</sub> (importado enriquecido ou agora parcialmente enriquecido domesticamente). Isso faz do Brasil um dos poucos do Hemisfério Sul com ciclo nuclear *quase completo* dominado. Austrália, por exemplo, tem urânio, mas não enriquece nem fabrica combustível; África do Sul desmantelou sua capacidade de enriquecimento nos anos 90; a Argentina enriquece em escala piloto apenas. Em gestão de combustível irradiado, o Brasil segue a estratégia padrão de armazenamento (piscinas e em seguida depósito a seco), não optando por reprocessamento no momento.

A análise indica que o País reúne condições objetivas para completar seu ciclo nuclear, reduzindo vulnerabilidades externas e ampliando sua autonomia estratégica. Isso

significa que, caso haja vontade política e investimento, o Brasil poderia desde a mineração até a fabricação de combustível sem depender de fornecimento estrangeiro. Por exemplo, a retomada da produção doméstica de urânio (suspensa entre 2015 e 2019 e reiniciada em 2020 de forma limitada) é crucial: com Angra 3 prevista para entrar em operação por volta de 2032, a demanda anual de urânio do Brasil aumentará, mas as reservas identificadas (cerca de 276 mil toneladas de  $U_3O_8$ , equivalentes a ~210 mil tU) [36][37] seriam suficientes para suprir um parque nuclear bem maior por muitas décadas. O desenvolvimento de Santa Quitéria, em parceria público-privada, visa produzir até 2400 tU/ano, o que excederia em muito o consumo doméstico e permitiria exportação, inserindo o Brasil entre os 5-6 maiores produtores globais. No enriquecimento, a tecnologia nacional de ultracentrífugas provou-se viável e escalável; a restrição tem sido principalmente orçamentária. Com investimento, o Brasil poderia ampliar Resende ou construir uma segunda planta para até mesmo oferecer serviços de enriquecimento a vizinhos (por ora hipotético, dado nenhum outro país da América do Sul tem usina nuclear além da Argentina).

Essa perspectiva de ciclo completo nacionalizado confere ao Brasil um potencial de potência energética e tecnológica no contexto da transição energética global, especialmente se o país decidir expandir sua geração nuclear para reduzir emissões de carbono e garantir estabilidade ao sistema elétrico (conforme sugerido em documentos de planejamento como o Plano Nacional de Energia 2050, que projeta até 10 GW nucleares instalados) [38][39].

Importante frisar que a singularidade brasileira não se traduz em isolamento internacional – ao contrário, o Brasil teve um papel construtivo na arquitetura de não proliferação regional. Após décadas de desconfiança mútua com a Argentina, os dois países firmaram em 1991 o Acordo de Guadalajara que estabeleceu a ABACC (Agência Brasileiro-Argentina de Contabilidade e Controle de Materiais Nucleares) [40][41], implementando salvaguardas bilaterais abrangentes. Em paralelo, assinaram com a IAEA o Acordo Quadripartite (INFCIRC/435) que submete todas as instalações nucleares de ambos à inspeção conjunta ABACC-IAEA [42][43].

Esse arranjo único garantiu transparência e confiança suficientes para que Brasil e Argentina aderissem ao TNP como não-armados nos anos 1990 e para que a comunidade internacional aceitasse seus programas nucleares independentes. Na prática, o Brasil abriu mão de uma opção nuclear militar latente e colheu em troca acesso a tecnologia estrangeira (como a cooperação com Alemanha nos anos 80) e mais recentemente a possibilidade de participar do comércio global nuclear sem tantas restrições. Além disso, o Brasil é desde 1997 membro do Grupo de Supridores Nucleares (NSG) e do Regime de Controle de

Tecnologia de Mísseis (MTCR), engajando-se nos fóruns de governança de exportações sensíveis.

Todavia, há áreas em que o Brasil reivindica tratamento diferenciado: o país até hoje não aderiu ao Protocolo Adicional da IAEA, argumentando que as salvaguardas da ABACC já fornecem verificação robusta e que o Protocolo Adicional seria discriminatório – impondo inspeções intrusivas aos não-armados enquanto potências nucleares não reduzem seus arsenais [44][45]. Essa posição, ainda que contestada por alguns parceiros, reflete a ênfase brasileira na soberania tecnológica. Assim, o Brasil navega um equilíbrio entre cumprir suas obrigações de não proliferação e proteger seus segredos tecnológicos, como exemplificado no acordo com a IAEA para Resende, onde as centrífugas nacionais são resguardadas visualmente durante inspeções (para proteger detalhes industriais). Esse zelo indica que o Brasil percebe sua tecnologia nuclear como patrimônio estratégico a resguardar.

No contexto internacional, o Brasil tem potencial para atuar não apenas como consumidor, mas como fornecedor no mercado nuclear. Além de eventualmente exportar concentrado de urânio, discute-se a possibilidade de prestar serviços de enriquecimento e fabricação de combustível para reatores de pesquisa regionais ou futuros SMRs que países vizinhos venham a adotar. Tal papel reforçaria a liderança regional brasileira em tecnologia de ponta e agregaria valor econômico à cadeia do urânio dominada internamente. Ademais, com a experiência da ABACC, Brasil e Argentina poderiam juntos promover modelos de cooperação sul-sul na área nuclear, apresentando a ABACC como exemplo de salvaguardas regionais de sucesso, algo relevante em regiões como Oriente Médio, caso se aspire a mecanismos locais de confiança para projetos nucleares (tema esse trazido à tona em debates diplomáticos).

Em suma, o Brasil destaca-se como ator com potencial singular. Ao reunir recursos, tecnologia e estabilidade institucional, o país dispõe das condições necessárias para completar seu ciclo nuclear e afirmar-se como uma potência energética e tecnológica. Os desafios para isso residem na continuidade institucional e na integração estratégica do setor nuclear às políticas de desenvolvimento, evitando descontinuidades de investimento ou mudanças bruscas de diretrizes. Se superados esses desafios, o Brasil poderá ter no urânio e no ciclo do combustível não apenas uma fonte de energia limpa para uso interno, mas um vetor de influência internacional e geração de divisas, posicionando-se vantajosamente em um mundo em transição para matrizes mais limpas. A trajetória brasileira ilustra que, mesmo para países não detentores de armas nucleares, o domínio do ciclo nuclear pode servir como pilar de soberania, uma “autonomia pela tecnologia” que aumenta a resiliência

diantre de flutuações geopolíticas e abre novas frentes de atuação global.

### Estudos de caso internacionais

Para aprofundar a compreensão teórico-empírica, são examinados quatro estudos de caso internacionais que ilustram diferentes abordagens e implicações geopolíticas do ciclo do combustível nuclear: França, Irã, Estados Unidos e Índia. Esses casos exemplificam modelos contrastantes, de plena integração à controvérsia proliferacionista, de declínio de capacidades à inovação fora dos marcos do TNP, oferecendo lições sobre como o urânio e seu ciclo incidem na autonomia e na diplomacia dos países.

#### França: o modelo integrado de autonomia (AREVA/Framatome e Orano)<sup>5</sup>

A França é amplamente reconhecida por ter desenvolvido um dos ciclos nucleares mais completos e integrados do mundo, o que lhe confere elevado grau de independência e influência no domínio nuclear civil. Desde a decisão do General De Gaulle, nos anos 1960, de apostar maciçamente na energia nuclear para garantir a segurança energética, a França construiu não apenas dezenas de reatores (atualmente 57 operacionais, provendo ~70% da eletricidade do país), mas também toda a infraestrutura de *front-end* e *back-end*.

A criação da Comissão de Energia Atômica (CEA) e de empresas nucleares estatais (CEA-Industrie, posteriormente COGEMA, Areva e as atuais Framatome e Orano) fomentou uma cadeia completa: mineração (na França até esgotar as jazidas nos anos 90, e depois minas no Níger, Gabão, Cazaquistão e Canadá via COGEMA/Areva/Orano), conversão (planta de Malvési e Pierrelatte), enriquecimento (usinas Georges Besse I por difusão, substituída por Georges Besse II por centrifugação em 2010), fabricação de combustível (unidade de produção em Romans-sur-Isère), reprocessamento (La Hague, operando desde 1976) e fabricação de combustível reciclado MOX (unidade de produção MELOX em Marcoule).

A França “desenvolveu uma indústria nuclear nacional completa, dominando o projeto e construção de instalações de geração de energia, o enriquecimento de urânio, a fabricação de combustível, bem como o tratamento, reciclagem e gestão de rejeitos” [46][47].

<sup>5</sup> A Areva foi criada em 2001 a partir da fusão de empresas francesas do setor nuclear, incluindo a Cogema (mineração e ciclo do combustível), a Framatome (engenharia de reatores) e a Technicatome. O objetivo era integrar toda a cadeia do setor nuclear civil sob uma única companhia estatal. Após dificuldades financeiras causadas por atrasos e custos excessivos no projeto do reator EPR em Olkiluoto (Finlândia), o

Essa integração vertical foi personificada pela AREVA, criada em 2001 unindo a Framatome (construtora de reatores) e a COGEMA (ciclo do combustível). “Areva era a única empresa presente em todas as partes do ciclo do combustível nuclear”[48], desde a mineração até o descomissionamento. Embora questões financeiras nos anos 2010 tenham levado à reestruturação (separando Areva em Orano – ciclo combustível – e Framatome – engenharia de reatores), o modelo persiste.

Geopoliticamente, essa estratégia deu à França considerável autonomia energética, frequentemente citada como cerca de 50% de independência energética graças ao nuclear [49][50] e também ferramenta diplomática. A França foi capaz de exportar reatores (para países como Bélgica, África do Sul, China) e combustíveis, oferecendo-se como fornecedor único confiável. Sua capacidade de reprocessamento lhe permitiu firmar contratos para reciclar combustível de Alemanha, Japão, Bélgica, Suíça e outros, repatriando os resíduos vitrificados e fornecendo MOX para uso em reatores desses clientes [51].

Com isso, a França insere-se como provedor de um serviço sensível que poucos fazem, aumentando sua relevância junto a essas nações. Além disso, ao deter *expertise* em gerenciamento de rejeitos de alta atividade e propor um repositório geológico nacional (projeto CIGÉO), a França apresenta-se na UE como liderança em soluções para o backend nuclear. Em fóruns internacionais, a França equilibra sua postura: é defensora do TNP e de controles de exportação (sendo membro fundador do NSG), mas também advoga pelo direito à reciclagem e ao acesso a tecnologias nucleares pacíficas – obviamente para poder vendê-las.

Essa dualidade ficou patente na controvérsia sobre o Irã: a França apoiou sanções contra o enriquecimento iraniano, mas paralelamente nos anos 2010 negocou com Teerã possibilidades de suprimento de urânio pela AREVA caso o Irã suspendesse seu programa, ilustrando que, uma vez detentor do ciclo, pode-se barganhar arranjos comerciais em troca de concessões políticas.

O modelo AREVA de integração total e presença global teve percalços: investimentos equivocados (como compra de minas de urânio Uramin na África que se revelaram improdutivas [52]), problemas em megaprojetos (atrasos do reator EPR em Olkiluoto e Flamanville), e a própria evolução do mercado pós-Fukushima que reduziu pedidos de novos reatores. Contudo, a essência estratégica se

governo francês decidiu, entre 2016 e 2018, reestruturar a empresa. A divisão resultou na criação de duas entidades principais: Orano, responsável pelo ciclo do combustível nuclear (mineração, conversão, enriquecimento, reprocessamento e logística) e Framatome: focada no projeto, fabricação e manutenção de reatores nucleares. Essa reorganização visou preservar competências estratégicas e garantir a sustentabilidade da indústria nuclear francesa.

manteve: o governo francês interveio, resgatou financeiramente a indústria e reafirmou em 2022 um plano de construção de ao menos seis novos reatores até 2050 [53][54], garantindo assim demanda interna e justificativa para manutenção das cadeias industriais. A França demonstrou que controlar o ciclo equivale a ter liberdade de ação: ao contrário da Alemanha que, apesar de avançada industrialmente, decidiu sair do nuclear e ficou sujeita a importação de energia fóssil, a França manteve baixos custos de eletricidade doméstica e até exportou excedentes (chegando a ser o maior exportador líquido de eletricidade do mundo nos anos 2000) [55]. Isso só foi possível porque podia operar suas usinas sem temer boicotes de combustível e com economia de escala em sua frota padronizada.

Em termos de soberania tecnológica, mesmo não possuindo reservas abundantes de urânio no próprio território (as minas francesas eram modestas e se exauriram), a França contornou essa limitação via controle acionário de minas no estrangeiro (Niger especialmente) e via eficiência no uso do urânio graças ao reprocessamento. A lógica foi: se não temos tanto minério, vamos extrair o máximo do que importamos, reciclando. Assim, o plutônio recuperado abastece cerca de 10% do parque nuclear francês via combustíveis MOX, poupando urânio natural equivalente [51].

Ainda, a armazenagem de urânio reprocessado (URT), do qual a França tem milhares de toneladas estocadas é vista como garantia para o futuro, caso haja escassez de urânio ou aumento abrupto de preços. Em um horizonte de um século, essa política dá à França uma reserva estratégica em material nuclear valioso, reforçando sua segurança.

O caso francês exemplifica a via da autonomia pela verticalização: investindo em todo o ciclo, a França obteve independência energética, poder de exportação e status de líder nuclear global. Os custos foram elevados (estima-se que o programa nuclear francês custou o equivalente a 400 bilhões de francos até 1993) [56], mas os benefícios se provaram substanciais em resiliência e na balança comercial (o nuclear é o 3º maior setor industrial do país, com 220 mil empregos e 6 bilhões de euros/ano em saldo positivo na balança) [57][58].

Para outros países, a lição francesa é que a aposta de longo prazo no ciclo completo pode compensar em autonomia, porém requer constância de política de Estado, escala de economia e aceitação pública, ingredientes nem sempre replicáveis.

<sup>6</sup> O Dr. Abdul Qadeer Khan foi um cientista paquistanês considerado o pai da bomba atômica do Paquistão. Em 2004, ele admitiu ter chefiado uma rede clandestina que transferiu tecnologia nuclear para Irã, Coreia do Norte e Líbia. O caso revelou falhas nos mecanismos de controle internacional e expôs os riscos de proliferação por meio de canais não

### Irã: disputa diplomática e o ciclo como barganha de poder

O caso do Irã ilustra como a busca de domínio do ciclo do combustível nuclear pode se converter em uma crise diplomática internacional, quando há suspeitas de objetivos militares envolvidos. O programa nuclear iraniano, iniciado nos anos 1970 com apoio ocidental, transformou-se após a Revolução de 1979 em um ponto focal de controvérsia. Sob o Xá, o Irã tinha planos de usinas e até participou do consórcio Eurodif na França, emprestando dinheiro em troca de uma fatia do enriquecimento produzido lá [59]. Contudo, após o novo governo pós-1979 romper contratos, a França nunca entregou o urânio enriquecido correspondente à participação iraniana em Eurodif, mesmo após o empréstimo ter sido pago com juros [59]. Esse episódio serviu para o Irã, nas palavras de seus líderes, como “prova da inconfiabilidade de suprimentos externos” e justificativa para buscar independência nuclear total [60]. Ou seja, um argumento de soberania: se dependermos dos outros, poderemos ser traídos; logo, façamos tudo nós mesmos.

A partir dos anos 1980, clandestinamente, o Irã desenvolveu atividades de conversão de urânio (na instalação de Isfahan), mineração (em Saghād) e, crucialmente, iniciou a construção secreta de plantas de enriquecimento por ultracentrifugação em Natanz (e depois Fordow) [61][62]. Esse programa foi revelado publicamente em 2002 por dissidentes, precipitando inspeções da IAEA e a constatação de que o Irã havia descumprido obrigações de salvaguardas ao não declarar tais instalações.

Dali em diante, instaurou-se uma crise: de um lado, o Irã afirmava seu direito sob o TNP de desenvolver ciclo completo para fins pacíficos; de outro, potências ocidentais (especialmente EUA, França, Reino Unido, Alemanha) suspeitavam que o verdadeiro intuito era produzir material físsil para armas nucleares ou ao menos adquirir o *breakout capacity* (capacidade de fabricar rapidamente uma arma se decidir). Enriquecer urânio tornou-se o centro da disputa, algo normalmente uma questão técnica virou sinônimo de desafio ao regime de não proliferação.

Os esforços diplomáticos (e coercitivos) focaram em frear ou congelar o progresso iraniano em enriquecimento. Sanções econômicas severas foram impostas, afetando desde a exportação de petróleo iraniano até a aquisição de insumos para suas centrífugas. Ainda assim, o Irã perseverou, instalando dezenas de milhares de centrífugas IR-1 (derivadas do design paquistanês de A.Q. Khan<sup>6</sup>) em

estatais. Khan foi colocado em prisão domiciliar, mas permaneceu figura nacional controversa até sua morte em 2021.

Natanz, suficientes para produzir urânio de baixo enriquecimento (até 5%) para um eventual programa de usinas, embora o Irã tivesse na época apenas a usina de Bushehr, abastecida pela Rússia.

A questão central: por que o Irã investiria tanto em um ciclo que economicamente não fazia sentido (era mais barato comprar combustível do que enriquecer localmente para apenas um reator)? A resposta geopolítica prevalecente: porque o ciclo nuclear dá poder de barganha. Com a centrifugação dominada, o Irã poderia, em teoria, produzir urânio altamente enriquecido para armas se rompesse com o TNP, isto é, deter o ciclo completo confere uma capacidade latente de produzir armamentos, um “seguro de regime” num Oriente Médio hostil.

No auge das tensões (2010-2012), o Irã começou a enriquecer a 20% U-235, ostensivamente para produzir combustível para seu reator de pesquisas em Teerã, mas esse movimento alarmou as potências pois 20% é tecnicamente 90% do caminho até grau bélico em termos de esforço necessário [63]. Sagan e Waltz (2003) já apontavam que enriquecimento além de certo nível se torna quase sinônimo de opção bélica, e o caso iraniano confirmou essa preocupação. Foram realizados atos de sabotagem (como o vírus Stuxnet, que danificou centenas de centrífugas iranianas em 2009-2010) [64] e até assassinatos de cientistas nucleares iranianos, numa guerra encoberta para retardar o programa.

O impasse somente arrefeceu com o acordo de 2015, o Plano de Ação Conjunto Global (JCPOA), no qual o Irã concordou em limitar drasticamente seu estoque de urânio enriquecido, seu nível máximo (3,67%), e o número de centrífugas operando, em troca do alívio de sanções. Ficou estabelecido que o Irã manteria um programa de enriquecimento simbólico (cerca de 5 mil centrífugas IR-1) e converteria a planta de Fordow para outros usos. Entretanto, o JCPOA não durou; os EUA se retiraram em 2018, reimpondo sanções, e o Irã gradativamente quebrou os limites, chegando a enriquecer a 60% U-235 em 2021-22 [65][66]. Em 2025, o Irã anunciou oficialmente que não estava mais aderindo a restrições, embora mantivesse diálogo aberto (mas tenso) com a AIEA [67][68]. Assim, a disputa persiste.

Do ponto de vista geopolítico, o Irã ilustra o conceito de “*hedging*” nuclear: ao dominar o ciclo do urânio, especialmente o enriquecimento, um país ganha alavancagem, pode não construir armas, mas fica perigosamente próximo, forçando outros a levá-lo a sério.

<sup>7</sup> O banco de LEU da IAEA é uma reserva internacional de urânio pouco enriquecido (até 4,95% de U-235), mantida no Cazaquistão e gerida pela Agência Internacional de Energia Atômica. Ele serve como fonte de último recurso para países-membros que enfrentem interrupções no fornecimento de LEU para geração de energia e que cumpram os

O urânio virou moeda de troca na mesa de negociações: por exemplo, propostas surgiram de criar um consórcio internacional de enriquecimento no próprio Irã com participação estrangeira, para permitir que Teerã tivesse acesso a combustível sem controle exclusivo (uma ideia explorada pela UE em 2005 e novamente em meios acadêmicos recentes [69]).

Outra sugestão foi o Irã receber combustível de outros e desistir do seu, semelhante à política seguida pela Emirados Árabes de “zero enriquecimento doméstico”. Mas o Irã rejeitou isso, vendo no ciclo nuclear uma questão de orgulho nacional e soberania após o trauma de Eurodif. Em última instância, o caso iraniano mostra que o ciclo do combustível pode ser interpretado como caminho de proliferação, e assim desencadear reações geopolíticas intensas – diferentemente do caso brasileiro ou japonês, onde a confiança internacional foi maior e as suspeitas menores.

Internamente, a elite iraniana conseguiu capitalizar o programa nuclear em termos políticos, como símbolo de independência frente a “pressões imperialistas”. A população foi convencida de que enriquecer urânio era um direito inalienável, quase comparável à nacionalização do petróleo nos anos 1950. Isso uniu facções e tornou qualquer concessão mais difícil, ampliando a longevidade do confronto. O *timing* geopolítico também foi adverso: vizinhos regionais (Israel, Arábia Saudita) veem potencial nuclear iraniano como ameaça existencial e pressionaram por postura dura.

O Irã expõe o lado obscuro da geopolítica do urânio: quando o ciclo nuclear deixa de ser apenas fonte de energia e vira elemento de dissuasão e prestígio estratégico, ele solapa a confiança internacional e pode levar a isolamento severo. O Irã obteve domínio técnico substancial, das minas de urânio (mesmo modestas), tem conversão (Usina UCF em Isfahan produziu toneladas de UF<sub>6</sub>), enriquecimento a 60%, fabricação de combustível para seu reator de pesquisa, mas ao custo de sanções devastadoras para sua economia. O seu caso serviu de motivação para iniciativas como o Banco de Combustível da AIEA<sup>7</sup>: a ideia de que países não precisem enriquecer, podendo obter urânio LEU garantido internacionalmente, para evitar novos “Irãs”. Porém, enquanto armas nucleares conferirem poder diferenciado, alguns Estados talvez vejam no ciclo completo uma espécie de seguro estratégico, ainda que a maioria renuncie por tratados ou confiança em alianças.

requisitos de não proliferação, garantindo acesso confiável sem necessidade de desenvolver capacidades próprias de enriquecimento.

## Estados Unidos: declínio e retomada do parque nuclear e do ciclo

Os Estados Unidos, pioneiros da energia nuclear, viveram um ciclo histórico peculiar: lideraram o desenvolvimento e difusão da tecnologia nos anos 1950-70, depois enfrentaram um declínio relativo na expansão nuclear e em certas capacidades industriais, e recentemente buscam uma retomada estimulada por preocupações climáticas e de concorrência geopolítica.

Nos anos 1960 e 1970, os EUA construíram dezenas de usinas (chegando a 104 reatores comerciais operando no auge, por volta de 2010), estabeleceram o primeiro ciclo nuclear completo (mineração abundante no seu território e importada, conversão em Metropolis, enriquecimento gigantesco via gaseificação por difusão em Paducah e Portsmouth, fabricação de combustível por General Electric e Westinghouse, e até reprocessamento experimental em West Valley antes de 1977).

Contudo, acidentes como Three Mile Island (1979) abalaram a confiança pública, combinados com fatores econômicos (inflação, alta de juros) que tornaram projetos nucleares muito caros. Resultado: nenhuma nova usina encomendada de 1979 até 2012; cancelamento de dezenas de unidades planejadas; consolidação do setor. Apesar disso, a frota existente aumentou produção e desempenhou papel crucial fornecendo ~20% da eletricidade norte-americana por décadas [70], com fatores de capacidade superiores a 90% nos anos 2000 [71]. Ou seja, não crescia em número, mas tornava-se mais eficiente.

Em termos de *front-end*, entretanto, houve um desmonte parcial: o Departamento de Energia encerrou o enriquecimento por difusão em 2013, sem que o empreendimento privado de centrifugação (USEC/American Centrifuge) conseguisse sucesso comercial [72][73].

Assim, desde 2014 os EUA passaram a depender integralmente de fornecedores externos para urânio enriquecido (Urenco fornece de sua planta no Novo México e via importações da Europa, e a Rússia supria cerca de 20% via acordos pós-Guerra Fria até 2020). Na mineração, a produção doméstica despencou de 16 mil tU/ano em 1980 para praticamente zero em 2020 [74][75], dado o baixo preço do urânio e disponibilidade mais barata no exterior (Canadá, Austrália, Cazaquistão). A conversão igualmente parou entre 2017-2022 (a fábrica da Honeywell ficou em *standby*). Isso tornou a maior potência nuclear eletricidade dependente do exterior em seu combustível: em 2023, 95% do urânio utilizado nos reatores dos EUA era importado [76], principalmente do Canadá, Cazaquistão, Austrália e Rússia [76].

Em proporção da geração, tal dependência não era vista nem no petróleo (onde os EUA mantêm produção doméstica alta). Contudo, essa situação foi tolerada por anos pois o fim da Guerra Fria e a abundância global deram sensação de segurança de suprimento.

O contexto mudou na virada da década de 2020. Dois fatores convergiram: a crise climática, que levou a reavaliar o fechamento de usinas nucleares (por serem fontes limpas firmes), e a competição estratégica com Rússia e China, exacerbada pela invasão da Ucrânia.

De 2013 a 2021, 13 reatores nos EUA fecharam antecipadamente por questões econômicas [77], devido à concorrência do gás natural barato e à falta de valorização do atributo carbono-zero no mercado [78]. Isso reduziu a contagem para 94 reatores operacionais (em 2024) [79], e a participação nuclear caiu ligeiramente para ~18-19% da eletricidade [70][80]. Porém, vários estados e o governo federal reagiram: subsídios e créditos de carbono foram introduzidos para manter usinas (New York, Illinois, etc., aprovaram créditos de energia limpa para nucleares [81]).

No âmbito federal, leis como a Inflation Reduction Act (2022) proveram crédito de produção para usinas nucleares existentes e financiamento a novos projetos avançados [82][83]. O resultado é que nenhuma usina mais fechou desde 2021 e há discussão de estender operações de algumas até 80 anos. Mais simbolicamente, em 2022-24 entraram em operação os primeiros novos grandes reatores em décadas – Vogtle 3 e 4, na Geórgia, adicionando ~2,2 GW – marcando uma retomada modesta, mas importante, de construção [84].

No ciclo de combustível, a conscientização de vulnerabilidade levou a um consenso bipartidário pela reconstrução. Como já mencionado, foram alocados US\$ 1,5 bi emergenciais em 2022 para compra de urânio e LEU não russo e para apoiar urânio de alto teor (HALEU) doméstico [30]. Em 2023-24, passaram legislações proibindo gradualmente importações de urânio enriquecido russo até 2028 e totalmente até 2040 [85][86].

Isso efetivamente força a criação de capacidade equivalente dentro ou com aliados. O DOE financiou a Centrus para montar cascatas de centrifugação para HALEU, necessários a reatores avançados e também potencialmente substituindo combustível russo em reatores de pesquisa [87]. Em mineração, um fundo de estocagem de urânio foi criado para estimular mineradoras domésticas a reabrir (o Texas e Wyoming viram pequenos reinícios em 2022). A conversão em Metropolis foi reiniciada em 2023, prevendo-se produção de UF<sub>6</sub> em 2024 [25]. Assim, há uma tendência de ressurgimento deliberado da base industrial do combustível nuclear nos EUA, movida por motivações de segurança nacional, algo não visto desde a Guerra Fria.

Geopoliticamente, os EUA buscam agora não só suprimir dependência, mas retomar a iniciativa: por exemplo, promovem parcerias para exportar seus futuros SMRs e garantir que o abastecimento de combustível desses SMRs (que podem requerer HALEU, 19,75% U-235) venha de consórcios ocidentais. A agenda de não proliferação americana também se adaptou: antes pregava-se que países abrissem mão de enriquecimento (como Emirados fizeram), mas diante da agressividade russa, Washington passou a oferecer combustível como serviço: “não enriqueça, nós fornecemos tudo”.

Para isso, claro, precisa ter indústria robusta que dê conta da demanda global. A colaboração com enriquecedores aliados (Urenco, Orano) intensificou-se, e há discussões inclusive de acordos em que os EUA importariam SWU europeu para reexportar como “combustível americano” a países com restrições políticas a insumos russos.

Em termos de capacidade tecnológica, os EUA buscam inovação para recuperar terreno: iniciativas de laser (GLE – Global Laser Enrichment, parceria com a australiana Silex e Cameco) estão em P&D com apoio do DOE [88], podendo ser um *game changer* se bem-sucedidas (enriquecimento a laser seria mais compacto e furtivo, mas também com risco de proliferação elevado). Também investem em combustíveis avançados (TRISO, combustível resfriado a gás etc.) dentro dos programas ARDP e do Laboratório de Idaho<sup>8</sup>.

Assim, o panorama norte-americano passou de acomodação à reativação. A “retomada do parque nuclear” refere-se tanto a preservar e prolongar os reatores existentes (porque imprescindíveis para metas de carbono, sendo 47% da eletricidade limpa do país nuclear [80]) quanto a viabilizar nova geração de usinas (SMRs, avançados) até 2030. E a “retomada do ciclo” implica reconstruir a independência em urânio: meta expressa por autoridades de que, por exemplo, nenhuma usina dos EUA tenha de fechar por falta de combustível caso importações cessem, uma situação hipotética, mas ilustrativa pós- Ucrânia.

A lição do caso americano é dupla: mesmo um país altamente desenvolvido pode ver sua base nuclear minguar se o contexto econômico e político desfavorecer, mas também pode recuperá-la se houver mudança de prioridades estratégicas. O declínio mostrou que mercado sozinho, em era de abundância de fósseis, não sustentou o nuclear; a retomada mostra que quando se reconhece o

<sup>8</sup> O ARDP (Advanced Reactor Demonstration Program) é um programa do Departamento de Energia dos EUA que financia o desenvolvimento e a demonstração de reatores nucleares avançados, com foco em segurança, eficiência e rapidez na implementação comercial. O Laboratório Nacional de Idaho (INL) é o principal centro de pesquisa nuclear dos EUA, responsável por testar novas tecnologias,

valor estratégico (seja por clima, seja por rivalidade global), políticas públicas fortes e investimento estatal retornam.

Para a geopolítica do urânio, isso significa que os EUA pretendem novamente ser provedores e não dependentes: já lideram conversas para suprir combustível (inclusive HALEU) a países do Leste Europeu que buscam sair da órbita russa, e programas como o “Partnership for Global Infrastructure” competem com ofertas chinesas e russas, incluindo promessa de abastecimento nuclear. Em essência, a posição dos EUA está em transição de importador complacente a exportador estratégico, resgatando sua histórica influência nuclear no novo contexto multipolar.

### Índia: modelo híbrido e a busca da autonomia fora do TNP

A Índia apresenta um caso distinto dos anteriores, pois desenvolveu seu programa nuclear em relativo isolamento internacional (devido a não adesão ao TNP até hoje e ao teste nuclear de 1974), criando um modelo híbrido que combina autossuficiência em parte do ciclo, parcerias seletivas e um roteiro tecnológico próprio (a célebre “estratégia nuclear de três fases”<sup>9</sup>). Desde o início, a motivação indiana foi duplamente estratégica: garantir energia para desenvolvimento e sustentar uma opção nuclear militar frente à China e ao Paquistão. Assim, a Índia nunca renunciou ao ciclo completo: pelo contrário, planejou-o cuidadosamente.

Com reservas domésticas de urânio relativamente pobres (cerca de 1-2% mundiais) mas vastos recursos de tório, a Índia concebeu o Programa de Três Fases: 1<sup>a</sup> fase – reatores de água pesada (PHWR) usando urânio natural para produzir plutônio; 2<sup>a</sup> fase – reatores rápidos (FBR) usando plutônio para gerar mais plutônio e também converter tório em U-233; 3<sup>a</sup> fase – reatores térmicos avançados (AHWR) usando tório/U-233 como combustível principal. A meta final seria independência de urânio importado, usando tório abundante como fonte de combustível.

Para isso, a Índia investiu desde cedo em reprocessamento do combustível das PHWR para extrair plutônio. De fato, a Índia foi o primeiro país asiático a ter uma planta de reprocessamento (Trombay, 1964), e tem hoje 3 unidades operacionais, extraíndo material para seu programa civil e arsenal nuclear.

combustíveis e materiais, além de apoiar projetos como o ARDP com infraestrutura e expertise técnica.

<sup>9</sup> Homi Bhabha foi o principal arquiteto do programa nuclear da Índia. Fundou o Tata Institute of Fundamental Research e planejou a estratégia nuclear em três fases para explorar o tório como fonte de energia. É considerado o pai da energia nuclear indiana.

No *front-end*, a Índia alcançou autossuficiência em fabricação de combustível para suas usinas PHWR e mesmo para algumas importadas.

Possui minas de urânio (p.ex. em Jaduguda, Andhra Pradesh), embora insuficientes, na década de 2000 chegou a enfrentar falta de urânio que reduziu fator de capacidade das usinas para 50-60% [89]. Desenvolveu uma pequena capacidade de enriquecimento via centrifugas em Lasalgaon (secretaria, principalmente para produzir combustível do submarino nuclear e talvez suprir um reator russo antigo de pesquisa). Porém, a maior parte de suas 23 usinas operacionais são PHWRs de 220 MWe que não requerem urânio enriquecido (usam urânio natural), e os reatores importados (dois BWR GE nos anos 60 e dois VVER russos em Kudankulam desde 2013) dependiam de combustível enriquecido estrangeiro.

Sob sanções (1974-2008), a Índia não podia oficialmente importar urânio ou tecnologia, mas houve discretamente acordos, por exemplo, a Rússia forneceu combustível para os BWR de Tarapur quando outros recusaram [90]. Mesmo assim, a oferta era incerta e levou a Índia a estocar urânio e acelerar prospecção doméstica.

O modelo híbrido se refere ao fato de que a Índia combinou um ciclo fechado autóctone (PHWR + reprocessamento + FBR) com abertura parcial após 2008 para cooperação internacional restrita ao setor civil. O Acordo Nuclear Indo-American de 2005-2008 reconheceu a Índia como exceção, permitindo-lhe comprar combustível e reatores no mercado global sem aderir ao TNP, em troca de separar suas instalações civis e militares e colocá-las sob salvaguardas da AIEA. Isso efetivamente criou dois circuitos: instalações civis (incluindo 14 reatores designados civis, como Tarapur, Kudankulam, etc.) são inspeccionadas e podem usar material importado; instalações militares (reatores de produção, enriquecimento, reprocessamento militar) ficam fora de inspeção.

Com isso, a Índia pôde acessar urânio do mercado mundial, assinou contratos com fornecedores como França, Cazaquistão, Canadá, e isso rapidamente resolveu a escassez, fazendo os fatores de capacidade voltarem a ~80% em 2011 [89]. Ao mesmo tempo, a Índia preservou sua autonomia: não precisou abdicar do enriquecimento ou reprocessamento como o Irã foi pressionado a fazer. O NSG lhe deu uma isenção para comércio nuclear, mas não exigiu Protocolo Adicional nem proibição de enriquecimento, fundamentalmente por motivações geopolíticas (alinhamento com EUA contra China).

Assim, a Índia pôde “ter o bolo e comê-lo”: integrou-se parcialmente ao regime, obtendo insumos e tecnologia (ex.: mais reatores russos VVER em construção, acordos para reatores franceses EPR e possivelmente americanos

AP1000), e ainda assim manteve seu arsenal nuclear e seu ciclo fechado estratégico.

A hibridização se nota também na tecnologia: os PHWR indianos hoje são versão nacional (220 MWe e agora 700 MWe em implantação [91][92]), mas a Índia também opera LWRs estrangeiros. Os combustíveis desses LWRs são fornecidos por Rússia e França, mas os das PHWR são feitos pela Nuclear Fuel Complex (NFC) em Hyderabad, com urânio indiano e importado. Já o plutônio separado alimenta o protótipo de reator rápido (PFBR de 500 MWe) que, após muitos atrasos, deve entrar em operação em 2026. Se bem-sucedido, a Índia planeja uma série de FBRs para gerar mais combustível a partir de urânio natural e combustível usado (meta de 4 FBRs). Em paralelo, desenvolve o reator de Tório (AHWR de 300 MWe) para a 3ª fase, mas isso é de horizonte mais distante.

Do ponto de vista geopolítico, a Índia seguiu um caminho de autonomia desafiante ao *status quo*: não assinou TNP, fez testes nucleares (1974, 1998), foi punida, mas acabou sendo “perdoada” pela sua importância. O ciclo do combustível foi central nisso: se a Índia não tivesse capacidade robusta interna, talvez não pudesse resistir às sanções ou barganhar o acordo de 2008. Por exemplo, nos anos 90, malgrado sanções, conseguiu concluir usinas PHWR sem ajuda externa e manter seu arsenal, mostrando resiliência. Essa auto-suficiência parcial convenceu as potências de que era melhor trazê-la para dentro do regime informalmente do que tentar contê-la. Desde então, a Índia virou compradora significativa de urânio internacional (até 40% do urânio consumido por suas usinas vem de fora) [93], mas simultaneamente ainda investe em novas minas (em Meghalaya, Andhra) e busca extraír urânio de fontes como fosfatos.

Um aspecto único: a Índia, ao contrário de outros não signatários do TNP (Paquistão, Israel, Coreia do Norte), adotou um discurso de uso pacífico e de comportamento claro entre civil e militar. Esse “compartilhamento” no papel ajuda a legitimar seu programa civil globalmente. Entretanto, críticos apontam que a Índia, ao não assinar o TNP, não sofre restrições em enriquecer quanto quiser ou estocar plutônio. De fato, seu estoque de plutônio civil e não civil cresce, e poderia alimentar dezenas de armas adicionais se desviado. Mas a credibilidade da Índia como democracia estável e a necessidade de equilibrá-la contra a China levaram o Ocidente a aceitar esses riscos.

O modelo indiano mostra uma via alternativa de conquistar o ciclo nuclear completo: pela via independente, custe o que custar, e então negociar entrada nos mercados em seus próprios termos. Tecnicamente, conseguiu quase tudo: sabe enriquecer (embora não precisasse tanto para seus PHWR), sabe reprocessar (domina PUREX há décadas), sabe projetar reatores (PHWR e agora protótipo a tório).

Politicamente, colheu frutos: é tratada como potência nuclear de fato, com acordos de colaboração com França, EUA, Rússia, sem aderir a regimes que limitem seu ciclo. O ônus foi econômico (custos altos para “reinventar rodas” que poderiam ter sido importadas mais barato) e ambiental (minas mal gerenciadas, rejeitos de reprocessamento acumulados). Mas estrategicamente, a Índia alcançou o objetivo de autonomia soberana no nuclear, tornando-o o pilar de sua segurança energética futura (quer 25% da eletricidade de origem nuclear em 2050) e de sua segurança nacional (disuasão contra rivais). Assim, o urânio para a Índia é não só insumo, mas garantia de grandeza, tanto que o primeiro-ministro Modi frequentemente realça “a capacidade da Índia em todo ciclo nuclear” como triunfo científico nacional.

## DISCUSSÃO

Os resultados apresentados corroboram a tese de que a geopolítica do urânio é, essencialmente, a geopolítica da autonomia. Ao contrário de outras commodities energéticas, o urânio permanece fortemente estatizado e regulado, sendo o domínio tecnológico tão ou mais relevante que a mera disponibilidade do recurso mineral (Deutsch; Moniz, 2009). Cada etapa do ciclo do combustível nuclear funciona como um filtro estratégico: poucos países conseguem ultrapassar cada barreira, de modo que no topo (enriquecimento avançado, reprocessamento) restam somente atores com elevadíssima capacitação técnica e/ou determinação política. Isso faz do urânio, ou mais precisamente do combustível nuclear pronto para uso, um bem intrinsecamente geopolítico, pois sua obtenção depende de relações internacionais, acordos de salvaguardas e, em última instância, confiabilidade entre nações.

A concentração produtiva observada no setor não decorre apenas de vantagens naturais, mas de estratégias estatais deliberadas. Países como a Rússia e a França investiram pesado, apesar de custos, para deter toda a cadeia nuclear, justamente para não ficarem sujeitos a pressões externas. Por outro lado, economias que trataram o combustível nuclear apenas como mais um insumo de mercado (ex.: algumas nações ocidentais nas últimas décadas) descobriram que, em momentos de crise, tal dependência os fragiliza de forma semelhante ao que ocorre com gás natural ou petróleo, mas agravado pela falta de fornecedores alternativos no nuclear.

Assim, confirmam-se no campo nuclear as lições gerais da geopolítica da energia: diversificação de fontes e *supply chains* robustas são componentes de segurança nacional. A ascensão sino-russa demonstra que o controle vertical do ciclo do combustível, quando articulado à diplomacia e ao financiamento, transforma a energia nuclear em ferramenta de projeção de poder [94][95]. E a reorganização ocidental em curso demonstra que, para além de considerações

econômicas, a resiliência estratégica agora pauta decisões de investimento no ciclo nuclear, mesmo que isso implique subsídios estatais e cooperação supranacional.

No caso brasileiro, o principal desafio não reside na ausência de recursos ou capacidades, mas na continuidade institucional e na integração estratégica do setor nuclear às políticas de desenvolvimento. O Brasil oscilou historicamente entre períodos de impulso e hiato no nuclear, dependendo de conjunturas políticas e econômicas. Para capitalizar seu potencial (reservas de urânio, tecnologia de centrifugação própria, indústria eletroeletrônica apta a participar), é necessário um planejamento consistente de longo prazo, exatamente o que o Plano Nacional de Energia 2050 propõe ao indicar a expansão nuclear como vetor relevante para a segurança energética e a descarbonização [96].

Nesse documento, delineia-se uma visão em que o Brasil construirá novas usinas (inicialmente Angra 3 e possivelmente SMRs modulares no Norte/Nordeste), expandirá Resende para suprir essas plantas e buscará inserir-se em nichos como produção de radioisótopos e propulsão naval nuclear. Se implementado, tal plano consolidaria o ciclo completo e atenuaria um problema crônico: a descontinuidade. Afinal, como notado, capacidade técnica o Brasil tem: o que falta é mantê-la evoluindo e adaptando-se.

No contexto da transição energética global, a centralidade do urânio tende a se intensificar. Em sistemas elétricos crescentemente dependentes de fontes renováveis intermitentes (solar, eólica), a energia nuclear oferece geração firme, limpa e de alta densidade energética, complementando as renováveis e garantindo estabilidade de base. Muitos cenários de neutralidade climática projetam aumento significativo da capacidade nuclear mundial até 2050: a IAEA revisou para cima cinco anos seguidos suas projeções, indicando possível mais que dobrar a potência nuclear [97][98].

Nesse panorama, países que dispõem do ciclo do combustível completo ou de acesso estável a ele estarão em vantagem para aproveitar a “volta do nuclear”. Além disso, novas tecnologias nucleares despontam como parte da transição: pequenos reatores modulares (SMRs), microreatores para locais remotos, e reatores avançados de 4ª geração (rápidos, altos-temperatura, MSR etc.). Essas tecnologias muitas vezes requerem combustíveis diferenciados (alguns SMRs usam HALEU 19,75%, reatores rápidos usam MOX ou metal, MSRs usam sal fundido com urânio enriquecido etc.), o que cria uma nova camada de geopolítica do combustível.

Por exemplo, quem produzirá o HALEU para dezenas de microreatores que os EUA e Canadá planejam construir até 2035? Atualmente, só a Rússia tem capacidade

significativa para esse enriquecimento elevado; portanto, Estados Unidos e aliados estão correndo para preencher essa lacuna por motivos tanto comerciais quanto de segurança [99][100]. Da mesma forma, se reatores rápidos se popularizarem, o comércio de plutônio reciclado e de combustíveis metálicos pode emergir, algo que hoje seria restrito a pouquíssimos (Rússia, França, Japão se retomar). Em todos os cenários, vê-se que dominar o ciclo tradicional posiciona melhor os países para liderar a próxima onda tecnológica e fixar padrões de segurança e não proliferação adequados a elas.

No âmbito da descarbonização, a energia nuclear, e por extensão o urânio, assume também uma dimensão de legitimidade ambiental. Se nos anos 1980-2000 o nuclear era combatido por grupos ambientais pelo risco de acidentes e rejeitos, hoje parcela desses grupos reconhece- no como aliado contra as mudanças climáticas. Isso facilita decisões estatais de prolongar a vida útil das usinas (como ocorrido recentemente na Bélgica e França) ou construir novas (Polônia, Reino Unido, Holanda declarando planos). O urânio assim deixa de ser visto apenas sob a ótica da proliferação e passa a ser encarado como ativo para a segurança climática, uma mudança narrativa importante.

Países que têm reservas de urânio ou ciclo estabelecido podem se apresentar não só como “potências energéticas”, mas como parceiros climáticos. O Cazaquistão, maior fornecedor de urânio, já adota essa retórica de que seu produto ajuda o mundo a evitar emissões (apesar de paradoxalmente ser grande produtor de combustíveis fósseis também). A Austrália, embora não use nuclear internamente, argumenta que exportar urânio é sua contribuição às metas globais de carbono (adotando salvaguardas rígidas em troca). Em suma, o discurso global de transição energética oferece ao setor nuclear uma chance de se reposicionar positivamente, o que poderá reduzir algumas barreiras políticas internas em democracias, e se isso ocorrer, mais países entrarão no círculo do combustível nuclear, acirrando possivelmente a competição por urânio e tecnologia.

Diante do exposto, fica claro que o poder associado ao urânio e seu ciclo é multifacetado. É poder energético (garantir luz e calor a populações e indústrias), poder econômico (um mercado global de combustível que movimenta bilhões de dólares anuais), poder tecnológico (dominar ciências avançadas de materiais, química e física nuclear) e poder estratégico (conferir opção militar ou alavancagem diplomática). Essa convergência faz do urânio um recurso cuja governança escapa à lógica puramente de mercado: acordos como o TNP, NSG, tratados regionais (Tlatelolco, Pelindaba) e regimes bilaterais (ABACC) moldam profundamente quem pode fazer o quê com urânio.

Em última instância, o poder passa a ser medido não apenas em barris de petróleo, mas em quilogramas de  $U_3O_8$  e na capacidade institucional de transformá-los em energia, tecnologia e soberania (parafraseando Yergin, 2020) [95][101]. Isto é especialmente verdadeiro em um mundo que se afasta gradualmente dos combustíveis fósseis: possivelmente, disputas futuras girarão menos em torno de campos petrolíferos e mais em torno de fornecimento de lítio, terras-raras e, para os que optarem pelo nuclear, de acesso assegurado ao combustível nuclear. Assim, a discussão sugere algumas implicações de política.

- Países interessados em energia nuclear devem considerar o fortalecimento de suas cadeias de suprimento como parte indissociável da decisão, seja via desenvolvimento doméstico, seja via consórcios internacionais de confiança.
- A governança global precisará equilibrar expansão nuclear com prevenção de proliferação: mecanismos de garantia de combustível (bancos de LEU, serviços multilaterais de enriquecimento) podem ganhar protagonismo se proliferarem programas nucleares em países sem ciclo próprio, sob pena de vermos mais “Irãs” e “Coreias do Norte”.
- A cooperação Sul-Sul no nuclear (por exemplo, Brasil-Argentina via ABACC) pode servir de modelo para outras regiões, demonstrando que é possível buscar autonomia técnica dentro de arranjos de transparência mútua – um caminho intermediário entre dependência total e isolamento desafiador.
- A inovação tecnológica, SMRs, Gen IV, fusão no horizonte mais distante, não eliminará a geopolítica, apenas a transformará: quem largar na frente nessas inovações determinará novas dependências.

Em síntese, a geopolítica do urânio revela-se, em última instância, a geopolítica da autonomia: na proporção em que um Estado controla o ciclo nuclear, ele controla seu destino energético e reforça sua soberania; inversamente, abdicar desse controle implica confiar em regimes e fornecedores externos, o que funciona bem em tempos de paz e colaboração, mas torna-se crítico em tempos de rivalidade e conflito. No limiar de uma nova era de disputas tecnológicas e transição energética acelerada, o status do urânio como vetor de poder tende a se consolidar, recolocando-o no tabuleiro das grandes estratégias nacionais.

## CONCLUSÃO

Este artigo buscou demonstrar que o urânio ocupa posição estratégica singular na geopolítica contemporânea, configurando-se não apenas como recurso energético, mas como instrumento estruturante de poder e soberania

nacional. A análise do ciclo do combustível nuclear evidenciou que cada etapa representa uma camada de autonomia estratégica, e que o domínio (ou a falta dele) em tais etapas condiciona a inserção internacional dos países. Em suma, quem controla o ciclo do urânio controla, em grande medida, seu futuro energético e ganha um trunfo relevante nas relações internacionais.

Observou-se que a concentração global das capacidades produtivas reforça assimetrias de poder. Poucos países fornecem a maior parte do urânio e serviços de conversão e enriquecimento, criando uma dependência estrutural dos demais. Essa assimetria, se não for gerida por acordos de cooperação e confiança, pode se traduzir em vulnerabilidades, como exemplificado pela situação europeia face ao combustível russo pós-2022.

Por outro lado, a consolidação de blocos integrados, como o sino-russo, ilustra o papel central do Estado na geopolítica nuclear: investimentos estatais de longo prazo permitiram a esses países deterem todo o ciclo e usá-lo como alavanca de influência (seja por ofertas atrativas de construção de usinas, seja como pressão implícita em caso de divergências políticas). Isso levou potências tradicionais a reagirem, numa espécie de “novo grande jogo” nuclear, desta vez envolvendo componentes tecnológicos e de *supply chain*.

A reorganização das cadeias ocidentais confirma que a energia nuclear voltou a ser tratada como questão de segurança nacional. Políticas públicas, incentivos e regramentos estão sendo ajustados para assegurar que o pilar nuclear das matrizes energéticas seja resiliente a choques geopolíticos. Em paralelo, organismos internacionais, como a IAEA, desempenham papel crucial para mediar esse cenário, tentando fornecer garantias de combustível para países iniciantes e evitar que a busca por autonomia descambe em proliferação horizontal.

O Brasil destaca-se como ator com potencial singular nesse panorama. Ao reunir recursos naturais abundantes, tecnologia própria e estabilidade institucional, o país dispõe das condições necessárias para completar seu ciclo nuclear. Se conseguir alinhar tal capacidade a uma visão estratégica contínua, poderá afirmar-se como potência energética e tecnológica emergente, influenciando não só no contexto regional, mas também em fóruns globais de energia e clima. O exemplo brasileiro, inclusive, reforça a ideia de que caminhos cooperativos (como o tratado ABACC) podem conciliar autonomia e não proliferação, contribuição valiosa num mundo onde mais países talvez almejem segurar seu destino nuclear em suas próprias mãos.

Em um mundo em transição energética e recomposição de alianças, o urânio e seu ciclo adquirem relevância renovada. Na medida em que as nações buscam reduzir

carbono sem abrir mão de segurança de suprimento, a energia nuclear ressurge como opção, e com ela ressurgem questões sobre quem controlará os insumos e tecnologias críticas. A lição fundamental deste estudo é que a geopolítica do urânio reflete, em última instância, a geopolítica da autonomia: países que investem no domínio do ciclo nuclear ampliam sua margem de manobra e soberania, ao passo que aqueles que dele abrem mão precisam ancorar sua segurança em estruturas internacionais de confiança. Ambas as vias são legítimas, mas carregam *trade-offs* distintos de custo, risco e alinhamento político.

No longo prazo, é previsível que o equilíbrio entre iniciativas nacionais e mecanismos multilaterais definirá se o renascimento nuclear ocorrerá de forma cooperativa ou competitiva. Novos acordos talvez sejam necessários – quem sabe um “TNP 2.0” que envolva também garantias de combustível e integração de potências emergentes. O fato é que o ciclo do combustível nuclear seguirá no cerne de debates estratégicos, seja por seu vínculo com armas de destruição em massa, seja por seu papel na viabilidade de uma economia pós-carbono.

Entender sua geopolítica – como se tentou fazer aqui é, portanto, essencial para que políticas públicas, tanto nacionais quanto globais, sejam capazes de maximizar os benefícios da energia nuclear minimizando seus riscos. O urânio, outrora chamado de “ouro negro” da era atômica, mostra-se mais uma vez um barômetro de poder: quem o controla, e como o utiliza, continuará a influenciar fortemente os rumos da ordem energética mundial nas próximas décadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA). (2023a). *Relatório Anual*. Viena: IAEA.
- Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA). (2023b). *Uranium 2022: Resources, Production and Demand (Red Book)*. Paris: OECD-NEA/IAEA.
- Brazilian-Argentine Agency for Accounting and Control of Nuclear Materials (ABACC). (2021). *Relatório Anual*. Rio de Janeiro: ABACC.
- Deutsch, J.; Moniz, E. (2009). *Making Good on the Promise: The Future of Nuclear Energy*. Cambridge: MIT Press.
- Kuznetsov, V. (2020). “Nuclear Energy Diplomacy of Russia: Fuel Cycle as a Geopolitical Tool”. *International Affairs*, 66(2), 55-70.
- Li, X. (2022). “China’s Nuclear Exports and their Geopolitical Significance”. *Journal of Energy Policy*, 158, 112-123.
- Nuclear Energy Agency (NEA/OECD). (2022). *The Supply of Medical Radioisotopes and Nuclear Fuel Cycle Services*. Paris: NEA.

Sagan, S.; Waltz, K. (2003). *The Spread of Nuclear Weapons: A Debate Renewed*. New York: W.W. Norton.

### <sup>i</sup> NOTAS

[1] [2] [28] [38] [39] [94] [95] [96] [101] Comunicação verbal

[file:///file\\_000000003300720e87f63c2b43247752](file:///file_000000003300720e87f63c2b43247752)

[3] [4] [22] [23] [24] [27] [33] [36] [37] World Uranium Mining Production - World Nuclear Association

<https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production>

[5] [6] [7] [25] [26] Conversion and Deconversion - World Nuclear Association

<https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/conversion-and-deconversion>

[8] Dependencies of the European Union and the world on Russian nuclear fuel cycle services, and how to reduce them - ScienceDirect

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X2500286X>

[9] [10] [11] [12] [29] [31] [32] [34] [35] [72] [73] [87] [88] Uranium Enrichment - World Nuclear Association

<https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/uranium-enrichment>

[13] The EU is dependent on Russian nuclear fuel – but not for long

<https://hagueresearch.org/the-eu-is-dependent-on-russian-nuclear-fuel-but-not-for-long/>

[14] This German Town Could Decide the Future of EU Reliance on ...

<https://bellona.org/news/nuclear-issues/2025-01-this-german-town-could-decide-the-future-of-eu-reliance-on-russian-nuclear-fuel>

[15] [17] [18] [19] Processing of Used Nuclear Fuel - World Nuclear Association

<https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/processing-of-used-nuclear-fuel>

[16] Nuclear Power in Italy

<https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/italy>

World Nuclear Association (WNA). (2023). *The Nuclear Fuel Report – Global Scenarios for Demand and Supply Availability 2023-2040*. London: WNA.<sup>i</sup>

[20] [21] [30] [74] [75] [76] [85] [86] [99] [100] US Nuclear Fuel Cycle - World Nuclear Association

<https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/usa-nuclear-fuel-cycle>

[40] [41] [42] [43] ABACC

<https://www.nti.org/education-center/treaties-and-regimes/brazilian-argentine-agency-accounting-and-control-nuclear-materials-abacc/>

[44] [45] The NSG Decision on Sensitive Nuclear Transfers: ABACC and the Additional Protocol | Arms Control Association

<https://www.armscontrol.org/act/2012-11/nsg-decision-sensitive-nuclear-transfers-abacc-and-additional-protocol>

[46] [47] [49] [50] [57] [58] Nuclear energy - An asset for France's energy independence

<https://www.orano.group/en/unpacking-nuclear/nuclear-energy-an-asset-for-france-s-energy-independence>

[48] [52] [53] [54] [55] [56] Nuclear Power in France - World Nuclear Association

<https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/france>

[51] Mixed Oxide (MOX) Fuel - World Nuclear Association

<https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/mixed-oxide-fuel-mox>

[59] [60] [61] [62] [63] [64] [66] [67] [68] Nuclear Power in Iran - World Nuclear Association

<https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/iran>

[65] Iran's Nuclear Program Has a Long History of Advances, Setbacks ...

<https://www.stimson.org/2023/irans-nuclear-program-has-a-long-history-of-advances-setbacks-and-diplomatic-pauses/>

[69] Exclusive: Can 'nuclear consortium' bridge Iran-US divide?

<https://amwaj.media/article/can-a-regional-nuclear-consortium-bridge-iran-us-divide>

[70] [71] [79] [82] [84] Nuclear Power in the USA - World Nuclear Association

<https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/usa-nuclear-power>

---

[77] [78] [80] [81] [83] Nuclear Energy - Center for Climate and Energy SolutionsCenter for Climate and Energy Solutions

<https://www.c2es.org/content/nuclear-energy/>

[89] [90] [91] [92] [93] Nuclear Power in India - World Nuclear Association

<https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/india>

[97] [98] 6: IAEA: Worldwide Nuclear Generation Capacity Set to Skyrocket - NAM

<https://nam.org/6-iaea-worldwide-nuclear-generation-capacity-set-to-skyrocket-34825/>

## MANTENEDORES FGV ENERGIA

