

## OPINIÃO

## O Falso Mito de que a Gestão dos Resíduos de Combustível Nuclear Usado não é Segura e Confiável para o Desenvolvimento da Indústria da Energia Nuclear

**Autores:** Leonam dos Santos Guimarães e Luiz Roberto Bezerra

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

Os resíduos de combustível nuclear usado (UNF, na sigla em inglês) têm sido gerenciados com segurança desde o início da indústria nuclear civil na década de 1950. Desde então, é uma atividade industrial madura que garante continuamente a gestão responsável desse UNF e de todos os resíduos radioativos decorrentes dessas atividades. Qualquer sistema de geração de energia deve planejar toda a cadeia de suprimentos em seu ciclo de vida completo, ou seja, do seu “berço ao túmulo” (*from cradle to grave*). No caso específico da energia nuclear, isto inclui a gestão do UNF e dos resíduos radioativos associados, que é considerada desde a fase de planejamento para implantação ou expansão de um programa de energia nuclear. Sendo assim, a indústria de energia nuclear compreende como de suma importância tanto o planejamento de uma gestão eficaz do UNF, utilizando práticas comprovadas internacionalmente, como também o acompanhamento contínuo dos desenvolvimentos e pesquisas inovadoras nesta área.

### Situação Atual

Historicamente, dois caminhos básicos de gestão foram implementados industrialmente por governos e operadores de reatores nucleares para a gestão do combustível usado. São eles:

- Armazenamento intermediário do combustível usado, seja no local do reator ou em uma instalação de armazenamento fora do local, até o descarte futuro em um repositório geológico profundo (DGR, na sigla em inglês) ou reprocessamento.
- Reprocessamento do combustível usado para reciclar materiais nucleares úteis em combustível novo, enquanto se vitrificam (incorporam no vidro) os resíduos remanescentes e não úteis para descarte futuro em um DGR.

Uma prática adicional, que foi aplicada amplamente nos reatores de pesquisa<sup>1</sup> implantados pelos Estados Unidos e pela Rússia, é a devolução do UNF proveniente desses reatores ao país de origem para reciclagem ou condicionamento para descarte. Essa prática passou a ser aplicada pela Rússia nos seus reatores de potência<sup>2</sup> no exterior e somente para o combustível que foi fabricado por aquela nação. Essa prática é chamada de "take back" e vem sendo avaliada para aplicação nos reatores nucleares avançados SMR<sup>3</sup>.

Resíduos de alto nível de radioatividade<sup>4</sup> devem ser condicionados de forma que estejam em uma forma adequada para seu transporte, armazenamento e descarte final em uma instalação geológica profunda. O UNF caracterizado como resíduo de alto nível de radioatividade será colocado em recipientes especialmente projetados; os resíduos separados do reprocessamento serão vitrificados e selados em contêineres de aço inoxidável. O descarte final de UNF e/ou resíduos de alto nível de radioatividade do reprocessamento encontra-se ainda em fase de implantação incipiente, com as atividades de licenciamento e construção já em andamento na França e na Rússia, países que realizam industrialmente esse processo.

Empresas como a EDF e a Rosatom possuem competência comprovada e histórico de sucesso na gestão de combustível nuclear usado. Empresas como a Orano (França) e a Tenexco (Rússia) prestam serviços de transporte, armazenamento, reprocessamento e reciclagem de combustível usado que são muito bem regulamentados, fiscalizados e controlados pelas autoridades de segurança nuclear nacionais.

### **Armazenamento de UNF:**

Existem várias tecnologias disponíveis para o armazenamento do UNF, seja utilizando piscinas de combustível usado ou tecnologias de armazenamento a seco. Essas tecnologias são licenciadas pelas autoridades competentes nos países que possuem usinas nucleares. Há diversas tecnologias concorrentes para o armazenamento de UNF no local do reator ou em uma instalação fora do local, com a seleção feita considerando o contexto específico dos países.

### **Reprocessamento e Reciclagem de UNF:**

---

<sup>1</sup> Reatores de pesquisa são aqueles utilizados com finalidades médicas, industriais e científicas.

<sup>2</sup> Reatores de potência são aqueles utilizados para geração de energia elétrica.

<sup>3</sup> SMR é a abreviatura de *Small Modular Reactor*.

<sup>4</sup> Os riscos radiológicos e de segurança dos resíduos radioativos variam de muito baixos, nos resíduos de vida curta e baixo nível de radioatividade, até muito altos nos resíduos altamente radioativos. Anualmente, cerca de 200.000 metros cúbicos de resíduos de nível baixo e intermediário e 10.000 metros cúbicos de resíduos de alto nível de radioatividade (bem como de combustíveis nucleares consumidos destinados à depósito definitivo) são gerados em todo o mundo pela produção de energia nuclear. Os resíduos de alto nível de radioatividade contêm cerca de 99 por cento dos radionuclídeos e representam, portanto, o maior risco radiológico. Os volumes de resíduos das aplicações nucleares são geralmente muito menores, de cerca de algumas dezenas de metros cúbicos ou menos por ano, por país.

O reprocessamento e a reciclagem têm sido amplamente empregados para extrair e reutilizar energia adicional do UNF. A instalação de La Hague, na França, atende às necessidades de reciclagem domésticas e oferece serviços de reprocessamento/reciclagem para outros países. Japão, Bélgica, Itália, Países Baixos, Espanha, Suíça e Alemanha são ou foram clientes da instalação de La Hague. O RT-1 da Rússia reprocessa UNF comercial há décadas tanto para suas necessidades domésticas quanto para combustível usado proveniente de outro país. Antes de 2022, o Reino Unido também realizava reprocessamento de combustível nuclear usado, doméstico e estrangeiro, principalmente em Sellafield. No Japão, uma planta de reprocessamento foi construída em Rokkasho, teve sua operação suspensa e ainda não retomou. China e Índia também operam plantas de reprocessamento para necessidades domésticas, embora ainda não em escala comercial. Os produtos reciclados do reprocessamento do combustível usado são urânio e plutônio, usados na fabricação de novos combustíveis. Outros materiais valiosos também podem ser extraídos do UNF, com sua valorização, por exemplo, na medicina nuclear.

### Repositórios de Descarte Profundo (DGR):

Repositórios subterrâneos estão progredindo em direção à implementação em alguns países, e a tecnologia e ciência são bem compreendidas. Muitas geologias são adequadas para o descarte final geológico de combustível usado ou resíduos vitrificados de alto nível. Alguns países (Finlândia, Suécia, França) obtiveram aceitação social para locais de DGR, enquanto outros países estão ainda enfrentando dificuldades de aceitação pública no processo de seleção de local. Nos EUA, a instalação de descarte geológico profundo para resíduos transurânicos<sup>5</sup>, *Waste Isolation Pilot Plant (WIPP)*, está em operação desde 1999 e se localiza afastada do maior centro de população, a 33 milhas a sudoeste de Carlsbad, no Condado de San Diego, Novo México. Entretanto, nos EUA houve um caso de insucesso na implantação de um DGR em Yucca Mountain por problemas de ordem política causados pela oposição ao Governo Barak Obama que polemizaram a opinião pública.<sup>6</sup>

O depósito definitivo de combustível nuclear usado na Finlândia, chamado Onkalo, foi inaugurado oficialmente em dezembro de 2022. Ele está localizado em Olkiluoto, na costa oeste do país, e é considerado o primeiro repositório geológico profundo do mundo a entrar em operação comercial. Esse projeto marca um avanço significativo na gestão de resíduos nucleares, pois o Onkalo foi desenvolvido para armazenar combustível nuclear usado de maneira segura

---

<sup>5</sup> Resíduos transurânicos são aqueles que são criados em laboratório e não existem na natureza. São elementos radioativos artificiais com número atômico 92 (urânio) ou superior. A maior parte dos resíduos transurânicos nos Estados Unidos vem de locais de produção de armas nucleares.

<sup>6</sup> Depois de mais de duas décadas de pesquisas e investimentos significativos, o projeto foi suspenso em 2010, devido a oposição política ao Governo do Barak Obama sob a alegação de preocupações com a segurança, especialmente em relação a um suposto risco de contaminação do lençol freático que polemizou o debate nas comunidades locais.

por pelo menos 100.000 anos, utilizando múltiplas barreiras de segurança naturais e artificiais. A construção do depósito começou em 2004, e após anos de desenvolvimento, testes e licenciamento, ele se tornou um modelo de como os resíduos nucleares podem e devem ser gerenciados a longo prazo.

O custo do reprocessamento e reciclagem pode ser considerado relativamente alto em comparação com os custos históricos do urânio extraído, mas isso pode mudar dependendo do nível de demanda por combustível nuclear no futuro. Isso, juntamente com considerações de sustentabilidade social e segurança de suprimento, somado ao desenvolvimento de soluções inovadoras, pode levar a reciclagem a se tornar a opção mais atraente para a gestão do UNF, particularmente para sistemas avançados de reatores e/ou ciclos de combustível.

### Situação do Brasil

A gestão do combustível nuclear usado em Angra 1 e Angra 2, as usinas nucleares em operação no Brasil, segue os padrões internacionais de segurança e está em plena conformidade com as diretrizes regulatórias brasileiras e globais.

Atualmente, a gestão do combustível nuclear usado em Angra 1 e Angra 2 envolve o armazenamento inicial em piscinas de resfriamento<sup>7</sup>, localizadas nas próprias usinas, e posterior transferência, após o adequado resfriamento, para armazenamento a seco<sup>8</sup>, que serve como solução de longo prazo, com a perspectivas de evoluir no futuro para a destinação final em um repositório geológico profundo ou reprocessamento. A solução de armazenamento a seco foi oficialmente anunciada em 2017 e os módulos de armazenamento a seco começaram a ser utilizados a partir de 2020.

### Opções Futuras

É provável que as opções de reciclagem ou descarte direto em um repositório geológico profundo permaneçam como os caminhos fundamentais para a gestão do combustível nuclear usado no futuro. Interessantes avenidas exploratórias podem ser imaginadas para o combustível comercial para complementar essas opções, por exemplo:

- Opções avançadas de reciclagem, como a multirreciclagem de materiais valiosos (urânio e plutônio) em reatores de água leve convencionais e/ou

---

<sup>7</sup> As piscinas de armazenamento são grandes reservatórios cheios de água que servem para reduzir o calor residual e conter a radiação emitida pelo combustível usado. O processo de resfriamento pode durar vários anos até que o combustível atinja temperaturas seguras para ser movido a outras formas de armazenamento.

<sup>8</sup> Este método envolve a transferência do combustível nuclear usado, após o adequado resfriamento nas piscinas de armazenamento, para recipientes selados e à prova de radiação, conhecidos como "módulos de concreto" que são armazenados em áreas estrategicamente projetadas para oferecer uma solução segura e de longo prazo para o armazenamento do combustível.

transição para ciclos de combustível fechados com reatores rápidos que utilizam totalmente os recursos de urânio natural.

- Opções avançadas, como a “incineração”, onde se faz a transmutação de actínídeos menores (radioisótopos de meia vida muito longa), que estão em diferentes estágios de pesquisa e desenvolvimento.
- Descarte em poços profundos (“*Deep Borehole Disposal*”<sup>9</sup>), onde até mesmo se considera a possibilidade de utilização de poços de petróleo esgotados<sup>10</sup>, que requerem, entretanto, mais programas de P&D para amadurecimento.

## Conclusão

A gestão dos resíduos de combustível nuclear usado tem sido gerenciada com segurança desde o início da indústria nuclear civil na década de 1950. Isto quer dizer que existem soluções sustentáveis e plenamente seguras e confiáveis, com perspectivas promissoras de opções inovadoras a serem adotadas num futuro próximo.

Diante de fatos e dados objetivos como os apresentados no presente artigo, não faz sentido a aversão ao desenvolvimento da indústria de energia nuclear sob a alegação de um falso mito de que a gestão dos resíduos de combustível nuclear usado não é tecnicamente viável, segura e confiável e, portanto, representaria um risco para o público e para o meio ambiente.

## AUTORES

---

<sup>9</sup> New CRP: Enhancing Global Knowledge on Deep Borehole Disposal for Nuclear Waste (T22003) - link:<https://www.iaea.org/newscenter/news/new-crp-enhancing-global-knowledge-on-deep-borehole-disposal-for-nuclear-waste-t22003>

<sup>10</sup> A disposição de resíduos nucleares em poços de petróleo esgotados é uma ideia promissora que explora a profundidade e a geologia estável desses poços para garantir contenção segura. Essa solução ainda requer o aprofundamento dos estudos técnicos e ambientais, a avaliação da integridade dos poços a longo prazo, do comportamento com os materiais remanescentes.



**Leonam dos Santos Guimarães** é Doutor em Engenharia Naval e Oceânica pela USP, Mestre em Engenharia Nuclear pela Universidade de Paris XI, e Capitão-de-Mar-e-Guerra da reserva do Corpo de Engenheiros da Marinha, a qual serviu por 30 anos. Foi CEO da Eletronuclear de 2017 a 2022, onde atualmente é Coordenador do Comitê Estatutário de Acompanhamento do Projeto da Usina Termonuclear Angra 3 (COANGRA). É membro do Grupo Permanente de Assessoria em Energia Nuclear do Diretor Geral da Agência Internacional de Energia Atômica – AIEA, membro do Conselho de Representantes da World Nuclear Association – WNA. Foi Presidente da Seção Latino Americana da Sociedade Nuclear Americana e foi Diretor Técnico- Comercial da Amazônia Azul Tecnologias de Defesa SA – AMAZUL, na sua criação, e Coordenador do Programa de Propulsão Nuclear do Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo – CTMSP.



**Luiz Roberto Bezerra** é Mestre em Engenharia Elétrica pela COPPE/UFRJ. Pós-Graduado pela Universidade Cândido Mendes (MBA em Gestão Empresarial) e pelo IBMEC/RJ (MBA Executivo em Finanças). Possui graduação em Engenharia Elétrica pela PUC/RJ. Assessor do Diretor da FGV Energia e Coordenador de Pesquisa do Setor Elétrico da FGV Energia desde fevereiro de 2014. Membro titular do Corpo de Árbitros na Câmara FGV de Conciliação e Arbitragem (desde 2018). Coordenador de projetos de pesquisa aplicada (P&D), com foco em energias renováveis complementares, recursos energéticos distribuídos, smart grid, eficiência energética, sustentabilidade, arranjos produtivos locais, economia circular e economia compartilhada.

MANTENEDORES FGV ENERGIA

