

# Energia nuclear e seus rejeitos radioativos: os desafios da justiça ambiental na transição energética sustentável

Nicholas Passeto de Oliveira Czekus \*

Fundação Armando Álvares Penteado – FAAP

\*Autor correspondente. E-mail: nich.br2004@gmail.com

## Resumo

Este trabalho analisa o uso da energia nuclear como alternativa de transição energética, diante da intensificação do debate internacional sobre seu uso, devido à crise climática e, e a crise no abastecimento de gás com a guerra da Ucrânia. Em conformidade com as metas do Acordo de Paris e dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 das Nações Unidas, a inclusão da energia nuclear na matriz energética sustentável deve incorporar as questões de justiça ambiental, e nessa perspectiva, através de revisão da literatura e análise documental de fontes jornalísticas, periódicos e dados de instituições relevantes, investiga-se como a utilização da energia nuclear pode ser realizada de forma justa, social e ambientalmente, diante dos desafios envolvidos no armazenamento e descarte dos rejeitos produzidos. São abordados os problemas técnicos, ambientais, sociais e institucionais relacionados à gestão dos resíduos radioativos, o debate internacional sobre sua governança, os diversos atores envolvidos, e as soluções que estão em curso, incluindo o estudo do caso do despejo de águas residuais radioativas de Fukushima no oceano Pacífico, iniciado em agosto de 2023. A pesquisa aponta que, embora a energia nuclear possa contribuir para uma matriz de baixo carbono, sua viabilidade depende não só de soluções técnica e economicamente eficazes, mas que também incorporem a justiça ambiental na gestão dos rejeitos radioativos produzidos, evitando o agravamento das desigualdades socioambientais e os impactos desproporcionais sobre comunidades mais vulneráveis.

**Palavras-chaves:** Energia nuclear, mudanças climáticas, justiça ambiental, gestão de rejeitos

## 1. Introdução

Tendo em vista que a geração de energia baseada em energia nuclear contribui com a maior parte dos rejeitos de alta radioatividade, historicamente o debate público sobre a gestão de resíduos radioativos produzidos tornou-se fortemente entrelaçado com as discussões frequentemente polarizadas sobre energia nuclear (Arentsen e Van Est 2023). A opinião pública em relação à energia nuclear ao redor do mundo demorou a se recuperar dos desastres de Three Mile Island, Chernobyl e Fukushima, mas o debate

tornou-se tópico novamente em vários países europeus (Schneider e Frogatt 2020) devido à crise climática e, a partir de 2022, à crise no abastecimento de gás depois da invasão russa da Ucrânia.

No contexto do Acordo de Paris e dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), a energia nuclear tem sido apresentada como uma possível tecnologia de baixo carbono para mitigar as mudanças climáticas. O Acordo de Paris estabelece o objetivo de limitar o aumento da temperatura global a 1,5°C, enquanto os ODS reforçam a necessidade de garantir acesso à energia limpa e acessível (ODS 7), combater as mudanças climáticas e seus impactos (ODS 13), e promover sociedades pacíficas e inclusivas para o desenvolvimento sustentável, garantindo a justiça social e ambiental (ODS 13 e 16).

A gestão e a disposição segura dos rejeitos radioativos representam um problema técnico e socioambiental significativo, uma vez que estes resíduos permanecem perigosos por milhares de anos, representando risco de acidentes catastróficos que podem contaminar extensas áreas por décadas ou séculos.

No caso da energia nuclear, a justiça ambiental é uma lente analítica indispensável para compreender os desequilíbrios estruturais associados à gestão de rejeitos radioativos. Comunidades no Sul Global são frequentemente alvos de práticas que violam normas ambientais a fim de reduzir os custos, perpetuando desigualdades históricas que contrariam os princípios de equidade. Além disso, os impactos de acidentes nucleares afetam desproporcionalmente populações que possuem menos recursos para lidar com as consequências, ampliando as desigualdades sociais e econômicas.

Dessa forma, ao considerar o uso da energia nuclear como tecnologia de transição energética, é necessário incorporar as questões de justiça ambiental para garantir que haja equidade na distribuição dos benefícios e riscos ambientais entre as comunidades afetadas, e que as soluções não ampliem as disparidades socioambientais e os impactos desproporcionais sobre comunidades mais vulneráveis.

Nesta discussão, que abarca as populações, governos, cientistas, empresários e Organizações como a Agência Internacional da Energia Atômica (IAEA em inglês), a Agência de Energia Nuclear (NEA em inglês) da Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico (OCDE), e a Associação Nuclear Mundial (WNA em inglês), os argumentos contrastantes são bem conhecidos. De acordo com Ramana (2018), os oponentes da energia nuclear argumentam que, apesar de décadas de esforços, a indústria nuclear ainda não dispõe de uma solução funcional para a gestão do combustível irradiado e dos resíduos de alto nível, os produtos mais radioativos gerados pelas centrais nucleares. Já os decisores políticos de todo o mundo têm defendido uma expansão da energia nuclear como forma de mitigar as alterações climáticas, e, ao mesmo tempo, têm enfatizado a importância de incorporar considerações de justiça ambiental e social durante a descarbonização (Höffken e Ramana 2024).

Diante desse cenário, cabe se questionar como utilizar a energia nuclear como tecnologia com zero ou baixas emissões de carbono para alcançar o propósito e os objetivos do Acordo de Paris e atender o pacto global da Agenda 2030, tendo em vista os problemas técnicos, ambientais e sociais envolvidos na gestão e disposição dos rejeitos nucleares produzidos?

O presente estudo tem como objetivo geral investigar como a inclusão da energia

nuclear como alternativa no combate às mudanças climáticas pode ser realizada de forma justa, social e ambientalmente, nos termos dos ODS 7, 13 e 16 da Agenda 2030. Para isso, se propõe a analisar os desafios técnicos, sociais e institucionais relacionados à gestão dos rejeitos radioativos, o debate internacional sobre sua governança, os diversos atores envolvidos, e as soluções que estão em curso.

Os métodos utilizados são a revisão conceitual sobre os rejeitos nucleares e seus impactos, e a revisão da literatura sobre as múltiplas dimensões envolvidas na governança de rejeitos radioativos gerados pelas usinas nucleares, os desafios técnicos e socioambientais. Foi realizada pesquisa documental digital em fontes jornalísticas, periódicos, sites especializados, e estudos e dados fornecidos por instituições e Organizações Internacionais. Para ilustrar a complexidade do tema, é apresentado o recente caso do processo de descarte das águas residuais radioativas, que se acumularam na usina nuclear de Fukushima desde o desastre de 2011. O descarte destes resíduos radioativos foi iniciado em agosto de 2023 e enfrenta oposição de outros governos, grupos regionais Organização Internacionais.

O trabalho está desenvolvido em quatro seções além desta introdução. Na primeira seção são apresentadas a conceitualização de resíduos radioativos e quais as alternativas de armazenamento e descarte. A segunda seção traz o conceito de justiça ambiental, sua relação com os resíduos radioativos gerados no uso da energia nuclear, e aborda os vários desafios e o debate mundial que estão em curso em torno da gestão destes rejeitos. A terceira seção apresenta como está o panorama atual do uso da energia nuclear no enfrentamento das mudanças climáticas, e da gestão do descarte e armazenamento de seus resíduos radioativos, abordando os impactos e os desafios enfrentados na governança destes rejeitos. A quarta seção discute um caso específico e atual de descarte de rejeito radioativo, o despejo de águas residuais radioativas de Fukushima, iniciado em agosto de 2023. Por fim, o trabalho traz as considerações finais com reflexões sobre a viabilidade da energia nuclear como alternativa de mitigação das mudanças climáticas, diante da necessidade de atender os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 7, 13 e 16 da Agenda 2030, que demandam fontes de energia limpas e acessíveis, produzidas com justiça social e ambiental.

## 2. Resíduos Radioativos – Conceitualização e Alternativas de Armazenamento e Descarte

De acordo com a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) rejeitos radioativos são “qualquer material resultante de atividades humanas, que contenha radionuclídeos em quantidades superiores aos limites de isenção de acordo com Norma da CNEN (1989), e para o qual a reutilização é imprópria ou ainda não prevista” (Norma CNEN NE 6.06, Resolução CNEN 014/89, página 4, publicação: DOU 24.01.1990).

Já a Comissão de Segurança Nuclear do Canadá (CNSC), em seu sítio eletrônico<sup>1</sup>, define resíduo radioativo como qualquer líquido, gás ou sólido que contenha uma substância nuclear radioativa e para o qual não haja uso previsível (CNSC 2023).

Dessa forma, material radioativo é aquele que possui partículas que emitem radiação espontaneamente – os radionuclídeos, e o rejeito radioativo é qualquer material

1. Government of Canadá, CNSC, Radioactive Waste. Disponível em: <https://www.cnsccsn.gc.ca/eng/waste/overview/>

radioativo que não tem mais utilidade e que apresentam níveis de radiação superiores aos limites estabelecidos pelas normas. Embora as especificações exatas variem de país para país, isto geralmente exclui materiais e resíduos com concentrações muito baixas de radionuclídeos.

Os rejeitos radioativos são gerados por atividades como usos médicos (radiodiagnóstico e radioterapia), usos industriais sem reatores nucleares (radiografia de componentes mecânicos, irradiação de bens para desinfecção/esterilização/conservação), e atividades militares, embora estejam principalmente associados à produção de eletricidade em usinas nucleares.

Os resíduos são classificados principalmente de acordo com o seu nível de radioatividade e o tempo em que permanecem radioativos, e dentro do setor de energia nuclear, uma categorização aproximada divide os resíduos em resíduos de muito baixo nível (VLLW), baixo nível (LLW), nível intermediário (ILW) e alto nível (HLW). Essa categorização varia ligeiramente de país para país, mas em geral a principal consideração para definir e categorizar resíduos é o tempo de meia-vida, ou seja, o tempo necessário para que os resíduos percam metade de sua radioatividade, o que define seu perigo potencial e determina a escolha do melhor método de tratamento e descarte, a contenção e o isolamento necessários.

Na gestão de resíduos radioativos a prioridade é reduzir o perigo potencial do fluxo de resíduos e isolar materiais da biosfera, do meio ambiente e da sociedade enquanto permanecerem perigosos. Para Silva et al. (2018), o confinamento seguro desses materiais, pelo tempo que se fizer necessário, deve visar 3 objetivos primordiais: (i) a minimização de qualquer efeito nocivo às gerações futuras; (ii) a proteção à saúde humana; e (iii) a proteção ao meio ambiente. Atualmente o rejeito produzido está armazenado em locais provisórios, pois o armazenamento permanente é uma questão ainda não resolvida.

Segundo Hansson (2023), de uma perspectiva social e política, é difícil imaginar como o mundo parecerá daqui a 10.000 anos – por ex. no ano 12.023 – e muito menos em 100.000 anos ou mais. Este é, no entanto, o período que enfrentamos quando se trata da tomada de decisões políticas sobre a eliminação a longo prazo de materiais radioativos.

Deste modo, a opção de descarte apropriada e a extensão das medidas de segurança dependem do tempo que os rejeitos permanecem perigosos. Onde os níveis de atividade dos materiais estão abaixo dos níveis de isenção, podem ser liberados do controle regulatório e tratados como resíduos não radioativos e como a radioatividade naturalmente decai com o tempo, alguns resíduos que estão armazenados por tempo suficiente podem mudar de categoria.

De acordo com Enokihara (1983), podem ser adotados o confinamento no interior da crosta terrestre e a eliminação dos rejeitos da biosfera. Já o confinamento de rejeitos radioativos na crosta terrestre engloba três conceitos: armazenamento ou estocagem, que permite recuperar o rejeito posteriormente; deposição, que é o armazenamento definitivo sem possibilidade de recuperação; repositório/depósito, que compreende todas as instalações de estocagem de rejeitos radioativos (Enokihara 1983).

Ainda conforme Enokihara (1983), quatro ambientes podem ser utilizados para fins de confinamento de rejeitos radioativos: os fundos oceânicos, as camadas de gelo

polar, depósito no solo e deposição em formações geológicas profundas.

A respeito do gerenciamento dos rejeitos radioativos, a WNA (2022), na sua biblioteca de informações, seção de gestão de rejeitos radioativos, define que o manejo destes resíduos abrange as etapas de tratamento, condicionamento, armazenamento e descarte.

O tratamento consiste em operações que modificam as características dos resíduos para aumentar sua segurança ou viabilidade econômica. Já o condicionamento busca convertê-los em uma forma apropriada para o manuseio, transporte, armazenamento e descarte de maneira segura.

O armazenamento, que pode ocorrer em qualquer etapa, mantém os resíduos recuperáveis e isolados, permitindo, por exemplo, a decomposição natural da radioatividade. Já o descarte é definitivo, sendo que resíduos de baixa e média atividade de curta duração são eliminados rapidamente em instalações de superfície, como as operantes no Reino Unido, Espanha, França, Suécia, Finlândia, Rússia, Coreia do Sul, Japão e EUA. Resíduos de vida longa exigem descarte em profundidades de dezenas a centenas de metros, enquanto os de alto nível, após décadas de armazenamento temporário, deve ser eliminados em depósitos geológicos profundos. Contudo, encontrar locais geologicamente adequados e politicamente aceitos para esse fim permanece um desafio.

No Tabela 1 é mostrada a classificação dos tipos de resíduos utilizada internacionalmente, juntamente com o método de gerenciamento sugerido (IAEA 2009).

Conforme a Vattenfall Media Relations (2023), a Suécia e a Finlândia são os pioneiros mundiais no esforço para uma solução final para os volumes crescentes de combustível nuclear irradiado. Na Finlândia, a empresa Posiva foi incumbida da responsabilidade de construir e operar o repositório final da Finlândia, com base num método desenvolvido pela Empresa Sueca de Gestão de Combustível Nuclear SKB, que também está projetando o depósito geológico profundo da Suécia.

O método chamado KBS-3 utiliza diversas barreiras para conter a radiação, onde o recipiente contendo o material radioativo é a primeira barreira. Neste recipiente a camada de ferro fundido garante estabilidade e a caixa de cobre evita a corrosão. A segunda barreira é a argila bentonita, que será colocada ao redor dos recipientes, para que possa absorver a água circundante e se expandir, mantendo os recipientes no lugar e os protegendo de movimentos na rocha. A terceira e última barreira é o próprio alicerce do depósito geológico.

### **3. Gestão dos Resíduos Radioativos Produzidos nas Usinas Nucleares – Perspectivas e Desafios**

Nesta seção é apresentado o conceito de justiça ambiental, que deve guiar a utilização da energia nuclear como alternativa de combate às mudanças climáticas, bem como os desafios envolvidos na segurança das instalações e na gestão dos rejeitos produzidos.

#### **3.1 Justiça Ambiental e os Rejeitos Radioativos**

O conceito de justiça ambiental é um aspecto fundamental pelo qual as preocupações de justiça têm sido discutidas no contexto das tecnologias energéticas, incluindo a energia nuclear, e o surgimento do termo está ligado aos movimentos sociais da

Quadro 1. Classificação e gerenciamento de resíduos radioativos

Tipo de Resíduo	Características	Gerenciamento sugerido
Resíduos isentos	Resíduos com um teor de radioatividade tão baixo que já não necessitam de controle por parte da autoridade reguladora. Nenhuma providência necessária para proteção contra radiação.	Disposição em aterros convencionais ou reciclados.
Resíduos de vida muito curta	Incluem resíduos frequentemente utilizados para pesquisa e fins médicos. Podem ser armazenados por um período limitado de até alguns anos para permitir a redução do seu teor de radioatividade por decaimento radioativo. Meias-vidas de 100 dias ou menos.	Armazenamento para decomposição.
Resíduos de nível muito baixo (VLLW)	Resíduos com níveis de concentração de atividade na região ou ligeiramente acima dos níveis especificados para liberação de material (operação ou descomissionamento de usinas nucleares). Incluem solo e entulho com baixos níveis de radioatividade provenientes de locais anteriormente contaminados por radioatividade.	Instalações projetadas do tipo aterro de superfície.
Resíduos de baixo nível (LLW)	Têm um elevado teor de radioatividade, mas contêm quantidades limitadas de radionuclídeos de longa vida. Requerem isolamento e contenção robustos por períodos de até algumas centenas de anos, e são adequados para descarte em instalações próximas à superfície. Abrangem uma gama muito vasta de resíduos.	Acondicionamento e eliminação numa instalação de superfície ou próxima da superfície.
Resíduos de nível intermediário (ILW)	Resíduos que contêm radionuclídeos de vida longa em quantidades que necessitam de um maior grau de contenção e isolamento da biosfera.	Eliminação numa instalação a uma profundidade entre algumas dezenas e algumas centenas de metros.
Resíduos de alto nível (HLW)	Resíduos que contêm grandes concentrações de radionuclídeos de vida curta e longa, e que necessitam de maior contenção e isolamento do ambiente acessível para segurança a longo prazo.  Combustível irradiado, resíduos acondicionados provenientes de reprocessamento.	Depósito geológico profundo com barreiras projetadas. É necessária a dissipação do calor gerado.

Fonte: Elaboração própria a partir de IAEA (2009). Classification of Radioactive Waste: General Safety Guide. IAEA Safety Standards Series No. GSG-1. 48p.

década de 1980 nos Estados Unidos. A partir daí, o discurso e a literatura sobre justiça ambiental evoluíram substancialmente, e a justiça ambiental como lente analítica tem sido aplicada a uma gama mais ampla de tópicos.

Conforme Bullard (2000), identifica-se uma relação direta entre a localização de aterros de resíduos perigosos e a raça e o status socioeconômico das comunidades afetadas. Empresas de descarte de resíduos frequentemente viam comunidades negras como alvos fáceis, devido à falta de organização comunitária e consciência ambiental, e a localização desses aterros geralmente coincide com áreas de alta concentração de moradores pobres, idosos, jovens e minorias.

Para Schlosberg e Collins (2014), o movimento de justiça ambiental nunca foi apenas sobre equidade, preocupando-se em saber por que aqueles que já são sujeitos a outras formas de desvantagem também estão expostos a males ambientais. Assim, os estudiosos da justiça ambiental passaram a abordar não apenas as desigualdades distributivas, mas também a “falta de reconhecimento, a privação de direitos e a exclusão e, mais amplamente, o enfraquecimento das necessidades básicas, das capacidades e do funcionamento dos indivíduos e das comunidades” (Schlosberg e Collins 2014, 361).

A partir desse movimento que defende a ética e a justiça nas decisões relacionadas ao meio ambiente, surgiu também o estudo de justiça energética, abordando a distribuição desigual de benefícios e impactos negativos, frequentemente vinculados a questões de injustiça racial e social, e as responsabilidades dentro do sistema energético.

Nesta área destaca-se McCauley et al. (2013), que introduziu a ideia de justiça energética abrangendo três dimensões principais: distributiva, focada na alocação equitativa de benefícios e impactos, frequentemente ligados a desigualdades raciais e econômicas; procedimental, que defende participação inclusiva e transparente nas decisões energéticas; e de reconhecimento, que promove igualdade de direitos, reparação de grupos prejudicados e maior equidade social.

Höffken e Ramana (2024) acrescentam, ainda, ao movimento da justiça ambiental, o conceito de injustiças intergeracionais. No caso dos projetos de energia nuclear e dos rejeitos radioativos produzidos, são os danos potenciais impostos às futuras gerações de seres humanos, uma vez que, como os materiais permanecem radioativos por centenas, até milhares de anos, a chance de haver acidentes em algum momento é muito alta. A produção de energia nuclear cria necessariamente uma série de injustiças ambientais devido à natureza radioativa dos resíduos produzidos em cada etapa da cadeia do combustível nuclear, inclusive na obtenção dos elementos químicos usados como insumos, e estes resíduos têm um impacto desproporcional nas comunidades socialmente vulneráveis, bem como nos seres não humanos.

Conforme Armknecht (2018) qualquer nação, desenvolvida ou do Sul Global, pode estar sujeita ao perigo causado pelos resíduos nucleares. A nação que produziu os resíduos nucleares é irrelevante para o perigo representado pelos resíduos nucleares, mas se pode razoavelmente presumir que a base industrial para a produção de resíduos nucleares inclui um conjunto de conhecimentos e um conjunto de competências superiores aos de uma nação que não tem qualquer base industrial nuclear. Agora, se uma nação em desenvolvimento não tiver regulamentos para lidar com os resíduos nucleares, podem surgir condições extremamente perigosas. Por exemplo, uma fonte radioativa usada em um dispositivo médico foi derretida e o metal foi usado em

vergalhões e móveis, entre dezembro de 1983 e fevereiro de 1984, em Ciudad Juarez, no México e nos Estados Unidos, um dos primeiros casos amplamente divulgados de exposição à radiação proveniente da destruição inadvertida de fontes órfãs através do processo de reciclagem de sucata. No Brasil, no município de Goiânia (GO), ocorreu em 13 de setembro de 1987 o que ficou registrado como o "maior desastre radiológico do mundo", quando o lacre de um aparelho abandonado de radioterapia em uma clínica foi rompido (Costa 2023).

### 3.2 *Dimensões e Perspectivas na Governança dos Resíduos Radioativos*

Com a inclusão e o reconhecimento da energia nuclear como uma das tecnologias de zero ou baixas emissões de carbono, a segurança das instalações e dos rejeitos gerados, especialmente os de alta radioatividade, que já representava um desafio, torna-se também uma questão central no contexto da descarbonização da matriz energética. Uma revisão da literatura sobre o tema reforça o caráter complexo e multidisciplinar da governança deste tipo de resíduos.

De acordo com Brunnengraber (2019), são identificadas cinco dimensões na gestão destes rejeitos. Em primeiro lugar, a localização de resíduos nucleares diz respeito a problemas que não são apenas caracterizados por fatos, mas também socialmente construídos, e nos quais as narrativas em mudança (com um papel central para visões, valores e expectativas) desempenham um papel importante. Em segundo lugar, não se trata apenas de um desafio técnico, mas sim de um desafio sociotécnico. E dada a complexa interação entre questões sociais e técnicas, não existe um plano para resolver o problema. Terceiro, a situação representa um duplo perigo porque a eliminação de resíduos radioativos levanta questões de segurança e de proteção, e as respostas às preocupações de segurança podem reforçar as preocupações de segurança. Quarto, ao lidar com resíduos radioativos estão envolvidos riscos sistêmicos, que surgem da interação entre tecnologia, política, sociedade e economia. Quinto, o problema dos resíduos radioativos é caracterizado por vastas escalas de tempo (Brunnengraber 2019, 336–352).

Hansson (2023) aborda o problema dos resíduos nucleares como um problema sociotécnico que necessita de solução urgente. Em muitos países, as suas dimensões sociais não foram adequadamente tratadas, o que levou a um impasse que bloqueia o progresso rumo a alternativas, sendo que a resolução de problemas nas interfaces entre política científica e política tecnológica tem um papel fundamental. De um ponto de vista prático, atribuir uma responsabilidade estrita a cada país pela eliminação segura de seus resíduos parece ser a melhor forma de evitar o risco de descarte inadequado em nações com baixa proteção ambiental. O despejo inseguro ainda é um grande problema para outros tipos de resíduos perigosos, e cabe se questionar qual o papel que a população local deverá ter na localização de um depósito subterrâneo de resíduos. Instalar-se num local onde a comunidade local diz “não” seria indesejável por muitas razões, mas, por outro lado, seria irresponsável permitir que as dificuldades com as opiniões locais levassem a uso muito prolongado de instalações de armazenamento intermediário ou à deposição permanente em uma formação geológica menos adequada (Hansson 2023).

Ao trazerem ao debate o aspecto das injustiças socioambientais das usinas nucleares

e seus resíduos, Höffken e Ramana (2024) destacam que a energia nuclear tem sido criticada não apenas por questões técnicas e econômicas, mas também pelas injustiças socioambientais que provoca. A cadeia do combustível nuclear gera grandes quantidades de resíduos perigosos, desde a mineração de urânio até o combustível irradiado, que precisa ser gerido por décadas. Com substâncias de longas meias-vidas, os resíduos nucleares criam uma injustiça intergeracional, pois gerações futuras herdarão os riscos sem se beneficiarem da energia produzida. Além disso, a mineração de urânio está associada a injustiças sociais, frequentemente afetando povos indígenas em países como Austrália, Canadá, Índia e Estados Unidos.

Sierra e Ott (2022) analisam a importância fundamental da participação pública na busca por um local para o depósito de resíduos radioativos de alto nível e nas decisões políticas e sociotécnicas nas etapas seguintes do processo de descarte final. Destacam a complexidade do problema, cuja solução não surge apenas de um ponto de vista científico ou técnico, mas que demanda também decisões políticas e a atuação dos diversos atores sociais afetados. As decisões políticas em sistemas democráticos, por sua vez, exigem a participação cidadã, seguindo os princípios de segurança e justiça.

Por fim, outra faceta do debate mundial sobre energia nuclear e a gestão e disposição dos seus rejeitos radioativos foi abordada por Sethi (2023) em seu trabalho sobre os riscos de usinas nucleares em zonas de guerra. A Ucrânia, com os seus 15 reatores distribuídos por quatro centrais nucleares, destacou uma nova vulnerabilidade das infraestruturas nucleares civis apanhadas em conflitos interestatais, pois a guerra Rússia-Ucrânia não só perturbou as operações dos reatores, afetando a disponibilidade global de eletricidade, mas também colocou em perigo a segurança e a proteção das centrais e dos locais de disposição dos resíduos radioativos.

Nesta conjuntura, e diante da análise de todo o contexto teórico, resta confirmado o quão complexo e transversal é o tema da viabilidade da utilização da energia nuclear como opção de energia na busca da neutralidade carbônica e enfrentamento das mudanças climática, frente aos desafios no descarte e armazenamento dos resíduos radioativos de alto nível produzidos.

#### **4. Apresentação e Análise dos Dados**

Esta seção apresenta como está o panorama atual do uso da energia nuclear no enfrentamento das mudanças climáticas, e os desafios na gestão do descarte e armazenamento de seus resíduos radioativos.

##### ***4.1 A Energia Nuclear como Alternativa na Descarbonização e o Trilema Energético***

Os líderes energéticos e os formuladores de políticas precisam gerenciar as demandas concorrentes do trilema energético, que consiste na tensão em equilibrar energia limpa e sustentável, a um custo acessível, com segurança de abastecimento. O Conselho Mundial de Energia (WEC), no seu Relatório de 2024, destaca os impactos de uma liderança energética global mais lotada, fragmentada e polarizada, e que os índices gerais continuam a mostrar os países europeus entre os melhores desempenhos, mas enfrentando grandes desafios desde o primeiro choque energético impulsionado pela demanda dos consumidores, após a invasão da Ucrânia.

Conforme informado na seção de Transição Energética do site da ENGIE, a confluência do aquecimento global e as questões político-econômicas como a guerra na Ucrânia, fez com que a União Europeia propusesse, em fevereiro/2022, a inclusão da energia nuclear entre os investimentos considerados verdes. Em seguida, o Parlamento Europeu votou em 21 de novembro de 2023 para incluir 17 tecnologias – incluindo a energia nuclear – na Lei da Indústria Net-Zero da UE. Conforme a EUROACTIV (2023), o presidente da comissão ambiental do Parlamento, Pascal Canfin, afirmou que a energia nuclear não deveria ser questionada, mas que provavelmente o debate nuclear ressurgirá durante as negociações com os Estados membros para finalizar a lei.

Nesta mesma linha de inclusão da energia nuclear na matriz energética para cumprir os acordos climáticos de Paris, a 28ª Conferência das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas (COP28), realizada em Dubai em dezembro de 2023, da qual participaram líderes mundiais e inovadores em soluções para as alterações climáticas, foi um acontecimento histórico para esta fonte de energia. Na 5ª sessão da Conferência das Partes, na qualidade de Reunião das Partes do Acordo de Paris (CMA 5) foi reconhecida a necessidade de “reduções profundas, rápidas e sustentadas nas emissões de gases com efeito de estufa, em linha com as trajetórias de 1,5 °C” e apela a esforços globais para acelerar a redução zero e tecnologias de baixas emissões, incluindo tecnologias nucleares, renováveis e tecnologias de redução e remoção, como captura, utilização e armazenamento de carbono. O Diretor-Geral da NEA, Magwood, comemorou a notícia, dizendo: “A Agência de Energia Nuclear da OCDE saúda o resultado do balanço global da COP 28, que pela primeira vez reconhece o papel crucial que a energia nuclear pode desempenhar para ajudar os países a reduzir as suas emissões de carbono. As emissões globais devem atingir zero líquido até 2050” (NEA 2023).

Também durante a COP28 foi assinada por 22 líderes mundiais uma declaração conjunta com o compromisso de triplicar a energia nuclear, como estratégia para zerar as emissões líquidas de gases de efeito estufa até 2050. A declaração, anunciada pelo Presidente da República Francesa, Emmanuel Macron em 2 de dezembro de 2023, baseou-se em uma análise da NEA de 2022, que concluiu que triplicar a capacidade de energia nuclear até 2050 ajudaria significativamente os países a atingirem as suas metas líquidas de emissão zero de carbono, ao mesmo tempo que criam e mantêm a segurança energética. E na COP 29, realizada em novembro de 2024, mais seis países endossaram a Declaração para Triplicar a Energia Nuclear até 2050 (NEA 2023).

Quando examinada à luz do trilema da política energética, os especialistas nucleares há muito tempo defendem que a energia nuclear, apesar dos seus vários desafios, garante a segurança do abastecimento num sistema energético de baixo carbono, sendo uma fonte de energia ambientalmente sustentável, confiável e acessível a longo prazo. No entanto, aqueles que promovem a energia nuclear como resposta aos desafios prementes das alterações climáticas são frequentemente aqueles que beneficiam desproporcionalmente de tal sistema (Ramana e Jeffery 2022).

Países como os EUA, Rússia, China e França têm um histórico de promoção da energia nuclear como parte de sua agenda de segurança nacional, bem como para fortalecer sua influência econômica e política. Os setores industriais como construção de usinas e fornecimento de combustível têm interesse econômico direto na expansão desse setor, buscando lucros através da construção de novas usinas e contratos públicos.

Isso pode levar a pressões sobre os governos para garantir subsídios e incentivos fiscais, frequentemente ignorando alternativas mais baratas e sustentáveis, como energia solar ou eólica, o que pode levar a decisões políticas que não consideram as necessidades das populações, principalmente as mais vulneráveis.

Diante dessa dinâmica de interesses fica claro o grande desafio de compatibilizar a energia nuclear como fonte de energia limpa e acessível, produzidas com justiça social e ambiental, de acordo com os requisitos dos ODS 7, 13 e 16 da Agenda Global 2030.

**4.2 Gestão do Descarte e Armazenamento de Resíduos Radioativos de Alto Nível na Atualidade**

O primeiro tratado internacional sobre a segurança dos resíduos radioativos com poder jurídico vinculante foi a Convenção Conjunta sobre a Segurança da Gestão do Combustível Irrradiado e sobre a Segurança da Gestão dos Resíduos Radioativos (Convenção Conjunta), que foi aberta à assinatura em 29 de setembro de 1997, e entrou em vigor em 18 de junho de 2001.

Examinando o resultado da CMA 5 na COP28 como parâmetro de aceitabilidade da energia nuclear para zero emissões e a triplicação do compromisso de energia nuclear até 2050, o mundo deve também estar atento aos desafios. A maioria dos países que assinou a declaração está em processo de planejamento e criação de soluções finais de armazenamento, mas nenhum ainda finalizou este processo.

No caso do combustível usado das usinas nucleares, o armazenamento pode ser feito em tanques ou tonéis secos, nos locais dos reatores ou centralmente. Além do armazenamento, a solução mais indicada para a gestão final de resíduos radioativos, publicamente aceitável, segura e ambientalmente correta é a eliminação geológica profunda. O Tabela 2 apresenta os projetos de eliminação geológica profunda mais avançados na atualidade (WNA 2024).

Quadro 2. Projetos de Depósitos Geológicos Profundos

Localização	Data de comissionamento	Organização Responsável	Cronograma
Onkalo, Finlândia	2024	Posiva	Construção em andamento. Pedido de licença para operação em análise.
França, Cigéo	2035	ANDRA	Licença de construção apresentada em 2023
Suécia, Forsmark	2030-2032	SKB	Pedido de licença para construção aprovado em 2022
Canadá	2040+	NWMO	Seleção do local até o final de 2024, dois locais em consideração. Licença de construção até 2032.
Japão	2035	NUMO	Seleção do local em andamento, província de Hokkaido, prevista para terminar em 2025.

Fonte: Elaboração própria a partir da WNA (2024). Storage and Disposal of Radioactive Waste.

O isolamento nestes depósitos geológicos profundos é garantido por uma combinação de barreiras naturais e de engenharia (rocha, sal, argila), e nenhuma obrigação de manter ativamente a instalação é transmitida às gerações futuras. No entanto, o ponto central está em como e onde construir tais instalações. Pelo Tabela 2 verifica-se que os planos para a eliminação do combustível irradiado estão particularmente avançados na Finlândia, bem como na Suécia e França. O repositório Onkalo da Finlândia será o primeiro repositório geológico profundo licenciado para a eliminação de combustível usado de reatores civis, e espera-se que comece a operar em 2024. Nos EUA, uma solução para a eliminação permanente do combustível nuclear irradiado está atualmente paralisada, devido a atrasos políticos.

No Brasil, a ELETRONUCLEAR está em processo de implementação de uma unidade de armazenamento complementar de combustíveis irradiados na central nuclear de Angra. Como informado no sítio eletrônico da empresa, a Unidade de Armazenamento Complementar a Seco (UAS) será erguida em uma área localizada dentro da central nuclear, entre Angra 2 e o canteiro de obras de Angra 3. A UAS vai ter capacidade para mais de 480 combustíveis irradiados, com previsão para expansão futura. Atualmente os rejeitos radioativos ficam em depósitos, dentro da área da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA), em Itaorna, até que a CNEN escolha um local para armazená-los definitivamente.

No entanto, mesmo que estes resíduos de alto nível produzidos nas usinas nucleares sejam armazenados em repositórios geológicos profundos, não há como garantir que não haverá a fuga de materiais radioativos para a água e para a terra durante os períodos de tempo históricos durante os quais permanecerão (Ramana 2018). As múltiplas injustiças sociais causadas pela energia nuclear e os impactos devastadores da cadeia de combustível nuclear em sistemas socioecológicos mais amplos têm sido estudados há décadas, especialmente em áreas próximas de locais de acidentes graves como Chernobyl e Fukushima (Mousseau e Møller 2020).

## **5. Um Caso Atual e Controverso de Descarte de Resíduos Radioativos: O Despejo das Águas Residuais Radioativas da Usina Nuclear de Fukushima no Oceano Pacífico**

Desde o desastre na Central Nuclear de Fukushima Daiichi (FDNPS) de Fukushima, no Japão, em 11 de março de 2011, a holding japonesa de energia elétrica Tokyo Electric Power Co. (TEPCO,) responsável pela usina, tem armazenado em tanques as águas residuais radioativas usadas no resfriamento dos reatores que derreteram.

Entretanto, com o esgotamento do espaço de armazenamento, foi elaborado um plano para liberar gradualmente estas águas residuais nos próximos 30 anos no Pacífico. Embora a IAEA – o órgão de fiscalização nuclear da ONU – avalie o plano como seguro, o projeto levantou inúmeras preocupações e provocou um debate internacional controverso, o que torna este caso de descarte de resíduo radioativo extremamente relevante para a análise de todos os impactos socioambientais e institucionais envolvidos na utilização da energia nuclear e no manejo dos resíduos radioativos produzidos no processo. O primeiro lote de descarte ocorreu em 24 de agosto de 2023, e o terceiro lote, de 7.800 toneladas, terminou de ser liberado no início de novembro do mesmo ano.

O tratamento e descarte das águas residuais radioativas não é uma questão puramente científica e técnica, e as consequências de executar o plano de liberação de água de Fukushima são multifacetadas e têm implicações abrangentes tanto para o Japão como para os países vizinhos, trazendo tensões diplomáticas, e potenciais consequências econômicas. A principal preocupação em torno do plano é o potencial impacto ambiental no oceano, e os ambientalistas argumentam que a liberação de água radioativa no mar pode prejudicar a vida marinha, perturbar os ecossistemas e pôr em perigo a saúde humana através do consumo de pescados e frutos do mar contaminados.

A questão nuclear é uma questão particularmente sensível em todas as ilhas do Pacífico, uma vez que a radioatividade de estoques de testes de armas nucleares americanos, britânicos e franceses durante a Guerra Fria continua a causar problemas de saúde até hoje. E com exceção de apenas alguns estados da Oceania, o Japão enfrentou uma difícil batalha para convencer a região de que a liberação de Fukushima é segura. Os Estados simplesmente não estão convencidos de que as águas residuais radioativas, mesmo que tratadas de acordo com as normas da IAEA, sejam seguras. Conforme Blume da National Geographic, o chefe do Fórum das Ilhas do Pacífico, uma organização que representa 18 nações insulares, apelidou o processo de caixa de Pandora. É um evento transfronteiriço e transgeracional”, afirma Robert Richmond, diretor do Laboratório Marinho Kewalo da Universidade do Havaí e consultor científico sobre o plano de descarga do Fórum das Ilhas do Pacífico. “Qualquer coisa lançada no oceano ao largo de Fukushima não vai ficar no mesmo lugar”, diz Richmond<sup>2</sup>.

Conforme a agência Reuters a China – um rival em termos de influência na região – está a explorar os problemas do Japão para obter ganhos geopolíticos próprios, tendo anunciado uma proibição imediata e geral de todos os produtos aquáticos do Japão. Hong Kong e Macau também anunciaram a sua própria proibição, que abrange as importações japonesas de marisco de 10 regiões.

No mesmo debate, a *CNSC (2023)* declarou publicamente a confiança de que a decisão do Japão de libertar as águas residuais de Fukushima é justificada por dados científicos sólidos, que mostram que todos os radioisótopos perigosos foram removidos da água antes da liberação, exceto o trítio, que não pode ser totalmente removido. No entanto, esta água tratada contém quantidades de trítio tão pequenas que a sua liberação não causará danos à vida marinha, aos microrganismos ou às pessoas. No mesmo comunicado afirma que muitas instalações nucleares na Coreia do Sul, bem como na China, também libertam água contendo trítio no ambiente marinho - muitas vezes em quantidades que excedem, em muito, o que está sendo planejado para lançamento de Fukushima.

A IAEA lançou uma página web pública sobre a liberação de água tratada da central nuclear de Fukushima no seu website<sup>3</sup>, para garantir que o público pudesse

---

2. Conforme o artigo da National Geographic “Japan releases nuclear wastewater into the Pacific. How worried should we be?” de 24 de Agosto de 2023. Disponível em: <https://www.nationalgeographic.com/premium/article/fukushima-japan-nuclear-wastewater-pacific-ocean>

3. O website da IAEA apresenta os dados constantemente atualizados sobre a descarga de água residual tratada da usina de Fukushima Daiichi. Disponível em: <https://www.iaea.org/topics/response/fukushima-daiichi-nuclear-accident/fukushima-daiichi-alps-treated-water-discharge/tepc-data>.

acompanhar e reconhecer que não há prejuízo para o ambiente, a vida marinha/animal ou os seres humanos. Os dados fornecidos incluem taxas de fluxo de água, dados de monitoramento de radiação e concentração de trítio após diluição. Em entrevista à BBC NEWS o cientista Gerry Thomas, que trabalhou com cientistas japoneses em pesquisas sobre a radiação e assessorou a IAEA nos relatórios que a agência produziu sobre Fukushima, assegurou que “a água descartada será uma gota no oceano tanto em volume quanto em radioatividade. Não há evidências de que esses níveis extremamente baixos de radioisótopos tenham um efeito prejudicial à saúde”, garante Thomas.

## 6. Considerações finais

Recentemente tem havido muitos debates internacionais sobre a ideia de rotular as centrais nucleares como um investimento verde. A energia nuclear tem potencial para contribuir significativamente na transição para uma matriz energética com emissão reduzida de carbono, e, juntamente com outras tecnologias energéticas como eólica e solar, pode ser essencial para reduzir a nossa dependência dos combustíveis fósseis, enfrentar as alterações climáticas e a poluição atmosférica, e alcançar uma economia sustentável.

Para isso, a energia nuclear deve se basear em planos claros relativos à eliminação segura de resíduos radioativos. O impacto potencial dos rejeitos radioativos, gerados nas atividades de mineração de urânio e nas usinas nucleares, sobre a água, solo, atmosfera e saúde pública, exige urgência na busca de soluções seguras, sustentáveis e socialmente toleráveis para o problema da gestão, disposição e armazenamento destes resíduos. Embora tenha havido progressos significativos na redução do volume destes resíduos radioativos finais, ainda não há no mundo depósitos permanentes dos rejeitos nucleares de alto nível, respeitando marcos internacionalmente acordados e minimizando seus impactos negativos sobre a saúde humana, ao longo das gerações.

Para atender os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 7, 13 e 16 da Agenda 2030, o uso da energia nuclear exige o cumprimento rigoroso de critérios de segurança e justiça ambiental, e devem ser enfrentados desafios como a desigualdade na distribuição dos custos ambientais, sociais e econômicos, que recaem desproporcionalmente sobre populações vulneráveis e comunidades próximas, enquanto os benefícios tendem a se concentrar em grandes corporações.

Diante da ameaça direta ao meio ambiente e à saúde pública, além das consequências geopolíticas, incluindo contaminação e relações diplomáticas tensas, abordar a gestão do armazenamento e descarte dos rejeitos radioativos requer uma estratégia multidimensional, equitativa e cooperativa, como evidenciado no caso recente do descarte das águas residuais radioativas de Fukushima.

Soluções seguras e sustentáveis para a gestão e o armazenamento desses resíduos são urgentes, incluindo o investimento em tecnologias de reprocessamento que reduzam o volume de rejeitos e a busca por uma abordagem global coordenada. Parcerias internacionais, harmonização de padrões de segurança nuclear e cooperação científica podem fortalecer a confiança e mitigar riscos, especialmente em países do Sul Global, onde transições energéticas injustas são mais sentidas. Além disso, a aceitação pública é essencial para o sucesso da energia nuclear, exigindo diálogo transparente, consultas comunitárias e envolvimento democrático. O engajamento das comunidades locais e

a comunicação aberta com países vizinhos podem minimizar conflitos, aumentar a supervisão e promover transições energéticas mais seguras e robustas.

Portanto, enfrentar os desafios da energia nuclear em um contexto de mudanças climáticas demanda cooperação multilateral, pesquisas científicas inovadoras e participação social efetiva. Somente com estratégias inclusivas e coordenadas, envolvendo as Organizações Internacionais e seus Estados Membros, e garantindo a participação da comunidade internacional, será possível utilizar essa fonte de energia com justiça ambiental no futuro energético global.

Recebido em: 23/06/2024.

Aprovado em: 16/12/2024.

## Referências

- Arentsen, Maarten e Rinie Van Est. 2023. *The Future of Radioactive Waste Governance: Lessons from Europe*. Acesso em: mar. 2024. <https://www.springerprofessional.de/en/the-future-of-radioactive-waste-governance/25218720>.
- Armknrecht, Rick. 2018. *How could nuclear wastes be dangerous to poor countries that do not produce them?* Quora. Acesso em: abr. 2024. <https://www.quora.com/How-could-nuclear-wastes-be-dangerous-to-poor-countries-that-do-not-produce-them>.
- Brunnengräber, A. 2019. The wicked problem of long-term radioactive waste governance: Ten characteristics of a complex technical and societal challenge. Em *Conflicts, Participation and Acceptability in Nuclear Waste Governance: An International Comparison (Volume III)*, editado por A. Brunnengräber e M. R. Di Nucci, 335–355. Acesso em: dez. 2024. Springer VS. [https://doi.org/10.1007/978-3-658-27107-7\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-658-27107-7_17).
- Bullard, R. D. 2000. *Dumping In Dixie: Race, Class, And Environmental Quality, Third Edition*. 3rd. Acesso em: dez. 2024. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780429495274>.
- CNEN, Comissão Nacional de Energia Nuclear. 1989. *NORMA CNEN-NE-6.06. Seleção e Escolha de Locais para Depósitos de Rejeitos Radioativos*. Acesso em: dez. 2024. <https://www.gov.br/cnen/pt-br/acao-rapido/normas/grupo-6/grupo6-nrm606.pdf>.
- CNSC, Canadian Nuclear Safety Commission. 2023. *Radioactive Waste*. Acesso em: dez. 2024. <https://www.cnsccsn.gc.ca/eng/waste/overview/>.
- Costa, Heitor Scalabrini. 2023. “Cidades nucleares” – o que fazer com os rejeitos radioativos. Accessed: 2024-04. [https://portal.unicap.br/ihu/noticias-humanitas/-/asset\\_publisher/pInt2V3lofyd/content/id/3544571?\\_com\\_liferay\\_asset\\_publisher\\_web\\_portlet\\_AssetPublisherPortlet\\_INSTANCE\\_pInt2V3lofyd\\_languageId=pt\\_BR](https://portal.unicap.br/ihu/noticias-humanitas/-/asset_publisher/pInt2V3lofyd/content/id/3544571?_com_liferay_asset_publisher_web_portlet_AssetPublisherPortlet_INSTANCE_pInt2V3lofyd_languageId=pt_BR).

- Enokihara, C. T. 1983. *O Armazenamento de Rejeitos Radioativos no Brasil, com Ênfase Especial em Rochas*. Relatório técnico. Acesso em dez. 2024. São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/40/094/40094780.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/40/094/40094780.pdf).
- EUROACTIV. 2023. EU Parliament backs broad net-zero industry list ahead of tough trilogue talks. Accessed: 2024-05. <https://www.euractiv.com/section/energy-environment/news/eu-parliament-back-broad-net-zero-industry-list-ahead-of-tough-trilogue-talks/>.
- Hansson, S. O. 2023. Nuclear waste as a socio-technical problem. Acesso em: mar. 2024, *TATuP - Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis* 32 (2): 50–56. <https://doi.org/10.14512/tatup.32.2.50>.
- Höffken, J. e M. V. Ramana. 2024. Nuclear power and environmental injustice. Acesso em: mar. 2024, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment* 13 (1). <https://doi.org/10.1002/wene.498>.
- IAEA. 2009. Classification of Radioactive Waste: General Safety Guide. IAEA Safety Standards Series No. GSG-1. 48p. Accessed: 2024-03. [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1419\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1419_web.pdf).
- McCauley, D., R. Heffron, H. Stephan e K. Jenkins. 2013. Advancing energy justice: the triumvirate of tenets and systems thinking. Acesso em: dez. 2024, *International Energy Law Review* 32 (3): 107–116. <https://research-repository.st-andrews.ac.uk/handle/10023/6078>.
- Mousseau, Timothy A. e Anders P. Møller. 2020. Plants in the light of ionizing radiation: What have we learned from Chernobyl, Fukushima, and other “hot” places? Acesso em dez. 2024, *Frontiers in Plant Science* 11:1–9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00552>. <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2020.00552/full>.
- NEA, Nuclear Energy Agency. 2023. COP28 recognises the critical role of nuclear energy for reducing the effects of climate change. Accessed: 2024-04. [https://www.oecd-neo.org/jcms/pl\\_89153/cop28-recognises-the-critical-role-of-nuclear-energy-for-reducing-the-effects-of-climate-change](https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_89153/cop28-recognises-the-critical-role-of-nuclear-energy-for-reducing-the-effects-of-climate-change).
- Ramana, M.V. 2018. Technical and social problems of nuclear waste. Acesso em: mar. 2024, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment* 7 (4). <https://doi.org/10.1002/wene.289>.
- Ramana, M.V. e C. Jeffery. 2022. Bill Gates and techno-fix delusions. Acesso em: mai. 2024, *Against the Current* 220. <https://againstthecurrent.org/atc220/bill-gates-and-techno-fix-delusions>.
- Schlosberg, D. e L. B. Collins. 2014. From environmental to climate justice: Climate change and the discourse of environmental justice. Acesso em: dez. 2024, *WIREs Climate Change* 5 (3): 359–374. <https://doi.org/10.1002/wcc.275>.
- Schneider, M. e A. Frogatt. 2020. The Challenges of Nuclear Power in the Age of COVID-19. Acesso em: mar. 2024, *World Nuclear Industry Status Report*, <https://eu.boell.org/en/WNISR2020>.
- Sethi, Manpreet. 2023. Nuclear Power Plants in War Zones: Risks and Remedies. IPCS Institute of Peace and Conflict Studies. Accessed: 2024-04. <https://reliefweb.int/organization/ipcs>.

- Sierra, R. e K. Ott. 2022. Citizen participation in the long-term process of high-level radioactive waste disposal: Future tasks and adequate forms of participation. Acesso em: mar. 2024, *TATuP - Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis* 31 (3): 44–50. <https://doi.org/10.14512/tatup.31.3.44>.
- Silva, Corbiniano, Paulo Fernando Lavalle Heilbron Filho, Rex Nazaré Alves, Ana Maria Xavier, Monica da Costa Pereira Lavalle Heilbron e Claudio de Morisson Valeriano. 2018. Disposição geológica de rejeitos radioativos: diretrizes no contexto da proteção radiológica, requisitos e avaliação de segurança. *Terrae Didactica* (Campinas, SP) 14 (3): 196–206. <https://doi.org/10.20396/td.v14i3.8651289>.
- Vattenfall Media Relations. 2023. Finland to open the world's first final repository for spent nuclear fuel. Accessed: 2024-03. <https://group.vattenfall.com/press-and-media/newsroom/2023/finland-to-open-the-worlds-first-final-repository-for-spent-nuclear-fuel>.
- WNA, World Nuclear Association. 2022. Radioactive Waste Management. Accessed: 2024-03. <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/radioactive-waste-management.aspx>.
- . 2024. Storage and Disposal of Radioactive Waste. Accessed: 2024-05. <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-waste/storage-and-disposal-of-radioactive-waste>.