

GESTÃO DE RESÍDUOS RADIOATIVOS NO BRASIL: TRANSPORTE, ARMAZENAGEM E ANÁLISE COM BASE EM DADOS PÚBLICOS DO IPEN

José Wesley Micael de Oliveira¹, Patrick Henrique Ramos de Lima², Orientador: Prof. MSc. Érico Francisco Innocente³

¹*Faculdade de Tecnologia de Jundiaí – Centro Paula Souza, Jundiaí, Brasil
(Jose.oliveira219@fatec.sp.gov.br)*

²*Faculdade de Tecnologia de Jundiaí – Centro Paula Souza, Jundiaí, Brasil
(patrick.lima4@fatec.sp.gov.br)*

³*Faculdade de Tecnologia de Jundiaí – Centro Paula Souza, Jundiaí, Brasil
(erico.innocente@cps.sp.gov.br)*

Resumo: O trabalho analisa a gestão de resíduos radioativos no Brasil, com foco no transporte e na armazenagem, a partir de dados do IPEN. São abordados o marco regulatório, a classificação dos rejeitos, as embalagens e os sistemas de armazenagem. Os resultados indicam conformidade normativa, ausência de incidentes no transporte e desafios como a inexistência de repositório definitivo, reforçando a necessidade de investimentos e capacitação contínua.

Palavras-chave: resíduos radioativos; transporte nuclear; armazenagem; IPEN; segurança radiológica

INTRODUÇÃO

A gestão de rejeitos radioativos é um tema central para a segurança pública e para a sustentabilidade do setor nuclear, uma vez que erros de acondicionamento, transporte ou armazenagem podem gerar impactos duradouros sobre trabalhadores, populações vizinhas e o meio ambiente.

Por essa razão, países que utilizam materiais radioativos em larga escala mantêm órgãos reguladores dedicados a essa função, com normas específicas para cada etapa do ciclo de gerenciamento dos rejeitos.

A utilização de materiais radioativos em aplicações médicas, industriais e de pesquisa gera rejeitos que exigem gerenciamento especializado.

No Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) regulamenta e fiscaliza essas atividades, enquanto o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) atua como referência na produção de radiofármacos, operação de reatores de pesquisa e tratamento de rejeitos.

A gestão desses resíduos abrange tratamento, acondicionamento, transporte e armazenagem, conforme normas nacionais e internacionais.

Em âmbito internacional, a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) estabelece diretrizes de segurança que orientam os países membros na gestão

de rejeitos radioativos, da geração à disposição final, com vistas a minimizar riscos à saúde humana e ao meio ambiente (AIEA, 2018).

O Brasil acompanha essas diretrizes por meio da regulamentação da CNEN, o que aproxima a prática nacional dos padrões internacionais de radioproteção e de segurança no transporte de materiais radioativos.

Este trabalho tem como objetivo analisar as práticas brasileiras de transporte e armazenagem de rejeitos radioativos, com base em dados públicos do IPEN, contemplando o marco regulatório vigente, os principais desafios operacionais e as perspectivas do setor nuclear nacional.

MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa é bibliográfica e documental, fundamentada em normas da CNEN, publicações da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), relatórios públicos do IPEN e documentos regulatórios da ANTT, IATA e IMO.

Não foram realizadas visitas técnicas ou entrevistas, sendo utilizadas exclusivamente fontes secundárias de acesso público.

Foram priorizados documentos vigentes e relatórios institucionais publicados entre 2014 e 2022, disponíveis nos portais oficiais da CNEN, do IPEN e das demais entidades reguladoras citadas.

A partir desse levantamento, os dados foram organizados em eixos temáticos (classificação, transporte, armazenagem e monitoramento), permitindo uma leitura comparativa entre o que determinam as normas e o que é efetivamente reportado pelo IPEN em seus relatórios de gestão.

Como principal limitação, destaca-se que o estudo se restringe às informações tornadas públicas pelo IPEN e pelos órgãos reguladores, não sendo possível verificar de forma independente os dados apresentados nos relatórios institucionais.

Ainda assim, considera-se que o conjunto de documentos consultados é suficiente para caracterizar, de forma consistente, o panorama atual da gestão de rejeitos radioativos no país.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise documental são apresentados a seguir, organizados em seis eixos: classificação dos rejeitos, evolução do volume gerado entre 2019 e 2022, transporte e transbordo, armazenagem e condicionamento, monitoramento radiológico ambiental e, por fim, os avanços e desafios identificados na gestão brasileira de rejeitos radioativos.

1. Classificação dos rejeitos radioativos

A Norma CNEN NN 8.01/2014 classifica os rejeitos radioativos, conforme o nível de atividade e a meia-vida dos radionuclídeos, em quatro classes:

0 (rejeitos isentos), 1 (meia-vida muito curta), 2 (baixo e médio níveis de radiação, subdivididos pela meia-vida) e 3 (alto nível de radiação) (CNEN, 2014a).

Essa classificação determina os requisitos de acondicionamento, transporte e disposição final de cada tipo de rejeito, resumidos no Quadro 1.

Quadro 1. Classificação de rejeitos radioativos segundo a CNEN NN 8.01/2014

Classe	Nível de atividade e meia vida	Características principais	Acondicionamento	Transporte	Disposição final
0 Rejeitos isentos (RI)	Atividade igual ou inferior aos níveis de dispensa	Não representam risco radiológico significativo para a população e para o meio ambiente.	Não requer acondicionamento específico	Não requer requisitos específicos de transporte.	Disposição em terrenos convencionais
1 Meia-vida muito curta (RVMC)	Meia-vida inferior a cerca de 100 dias	Decaem a níveis desprezíveis de atividade em um período curto de tempo.	Acondicionamento para decaimento em instalação autorizada	Transportes sob requisitos específicos para rejeitos da Classe 1	Decaimento em instalação autorizada e liberação para descarte isento.
2 Baixo e médio níveis de atividade (RBMS)	Meia-vida curta ou longa; atividade baixa e média T ₁ ≤ 100 dias, T ₂ 100 dias < T ≤ 31 anos, T ₃ ≥ 31 anos.	Exigem controle e isolamento por períodos compatíveis com a meia-vida dos radionuclídeos.	Acondicionamento adequado à subclasse (T ₁ , T ₂ ou T ₃).	Transporte conforme requisitos para rejeitos da Classe 2.	Disposição em repositórios próprios para rejeitos da Classe 2, conforme a subclasse.
3 Alto nível de radiação (RAN)	Elevada atividade e calor de decaimento	Geram calor e requerem isolamento robusto por longos períodos.	Acondicionamento em embalagens robustas específicas.	Transporte sob requisitos rigorosos para rejeitos da Classe 3.	Disposição em repositórios geológicos profundos projetados para rejeitos da Classe 3.

Como mostra o Quadro 1, cada classe corresponde a um destino diferente: enquanto os rejeitos isentos podem seguir para disposição convencional e os de meia-vida muito curta apenas aguardam decaimento

em depósito, as classes 2 e 3 já pressupõem depósitos provisórios ou intermediários e, no limite, um repositório geológico profundo — instalação que, como será discutido adiante, o Brasil ainda não possui.

Na prática do IPEN, os rejeitos de baixo nível representam a maior parcela do volume gerado, enquanto os de médio e alto nível concentram a maior parte da atividade radiológica total, exigindo maior rigor de blindagem, acondicionamento e controle.

Essa concentração de atividade nas classes superiores é o que justifica, do ponto de vista regulatório, o tratamento diferenciado dado a cada categoria: rejeitos de baixo nível podem, em muitos casos, ser gerenciados com procedimentos relativamente simples, ao passo que os de médio e alto nível demandam blindagem robusta, controle de acesso mais rigoroso e, no limite, soluções de disposição final ainda não disponíveis no país.

2. Evolução do volume de rejeitos (2019–2022)

Os relatórios de gestão do IPEN referentes ao período indicam (IPEN, 2022):

- aumento de 13,9% no volume total de rejeitos gerados;
- crescimento proporcional maior nas classes de médio e alto nível que nas de baixo nível;
- ampliação do uso de embalagens Tipo A e Tipo B;
- zero incidentes de transporte registrados no período.

A Figura 1 ilustra essa evolução relativa por classe, com 2019 como ano-base (índice 100).

O crescimento mais acentuado nas classes de médio e alto nível é coerente com a ampliação da produção de radiofármacos e da operação do reator IEA-R1 no período.

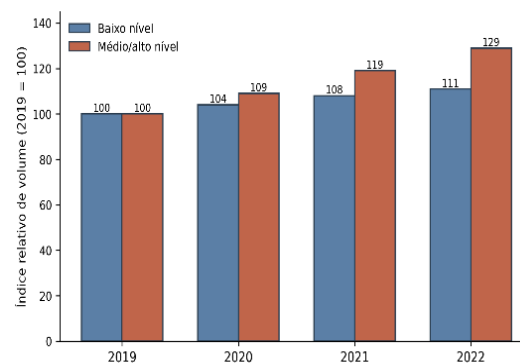


Figura 1. Evolução relativa do volume de rejeitos, elaborado pelos autores

O crescimento mais acentuado nas classes de médio e alto nível, ainda que positivo em termos de conformidade com o registro de zero incidentes, sinaliza uma tendência que merece atenção: se a produção de radiofármacos e a operação do reator

IEA-R1 continuarem em expansão, a pressão sobre as instalações provisórias de armazenagem tende a crescer na mesma proporção, reforçando a urgência de avançar em soluções de disposição final de médio e longo prazo.

A ampliação do uso de embalagens Tipo A e Tipo B ao longo do período também merece destaque, pois indica um esforço institucional de adequação às exigências normativas: embalagens Tipo A atendem materiais de atividade mais baixa, enquanto as do Tipo B, sujeitas a ensaios de queda, incêndio e imersão, são exigidas para os rejeitos mais críticos.

O uso crescente dessa segunda categoria é coerente com o próprio aumento de volume nas classes de médio e alto nível registrado nos relatórios do período.

3. Transporte e transbordo de material radioativo

O transbordo de material radioativo consiste na transferência de materiais entre equipamentos ou diferentes modais de transporte, como rodoviário, ferroviário, aéreo e marítimo, utilizando recursos como paleteiras, empilhadeiras e pallets.

Essa etapa é considerada crítica do ponto de vista da radioproteção, pois concentra o manuseio direto das embalagens pelos operadores, exigindo procedimentos padronizados para verificação da integridade das embalagens, sinalização, conforme exemplificado na Figura 2, e isolamento da área de operação antes, durante e após a movimentação da carga.

Os resíduos radioativos são materiais sólidos, líquidos ou gasosos, de origem natural ou decorrentes de atividades humanas, que apresentam níveis de radioatividade acima dos limites estabelecidos pela legislação.

No Brasil, o IPEN realiza principalmente o transporte rodoviário, conforme a Norma CNEN NN 5.01 (CNEN, 2021), a Norma CNEN NE 5.02 (CNEN, 2003) e a Resolução ANTT nº 5.998/2022 (ANTT, 2022), que atualizou a antiga Resolução ANTT nº 420/2004, utilizando o modal aéreo para radiofármacos de meia-vida curta, em conformidade com a IATA DGR (IATA, ed. vigente).

As embalagens seguem os requisitos da AIEA SSR-6 (AIEA, 2018) e, para materiais de alta atividade, são exigidos planos de emergência envolvendo órgãos competentes, como Corpo de Bombeiros, Defesa Civil e autoridades de trânsito.

A coexistência de dois modais distintos no dia a dia do IPEN reflete a lógica das próprias normas: o transporte aéreo é reservado a materiais cuja meia-vida curta

torna o tempo de trânsito um fator crítico, ao passo que o modal rodoviário atende às cargas de menor urgência temporal, porém sujeitas a exigências mais rígidas de blindagem e de planos de emergência.



Figura 2 – Carregamento da embalagem no veículo de transporte.

Fonte: CNEN (2017).

A ausência de incidentes registrados no período, discutida no eixo seguinte, é um indicativo de que essa divisão de responsabilidades entre os modais tem funcionado na prática.

4. Armazenagem e condicionamento

Depósito Provisório de Baixo Nível (DPBN): destinado ao armazenamento temporário de rejeitos radioativos de baixa atividade, garantindo o acondicionamento seguro até sua destinação final.

Depósito Provisório de Médio Nível (DPMN): utilizado para o armazenamento de rejeitos de média atividade, atendendo aos requisitos de segurança radiológica e proteção ambiental.

Piscina de combustível irradiado do reator IEA-R1: responsável pelo resfriamento e armazenamento seguro do combustível nuclear irradiado, permitindo a dissipação do calor residual e a redução dos níveis de radiação.

Processos de condicionamento: os rejeitos são submetidos a técnicas que reduzem seu volume e aumentam sua estabilidade, como compactação, evaporação, incineração e vitrificação.

Vitrificação: considerada pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) uma das técnicas mais seguras para rejeitos de alta atividade, pois incorpora os radionuclídeos em uma matriz vítrea de elevada resistência física e química, favorecendo o armazenamento de longo prazo.

Diferentemente da compactação e da incineração, que reduzem principalmente o volume dos rejeitos, a vitrificação atua sobre a estabilidade química do material, o que a torna especialmente indicada para



rejeitos de alto nível destinados a permanecer isolados por longos períodos, ainda que sua adoção em escala industrial no Brasil dependa de investimentos específicos em equipamentos e infraestrutura.

Em conjunto, os três depósitos e os quatro processos de condicionamento descritos configuram uma estrutura de armazenamento essencialmente provisória: nenhuma dessas instalações substitui um repositório definitivo, o que reforça, já nesta seção, um ponto que retornará na discussão sobre os desafios do setor.

5. Monitoramento radiológico ambiental

O IPEN realiza medições periódicas de dose, ar, água e solo, seguindo a Norma CNEN NN 3.01 (CNEN, 2014b). Os resultados permanecem dentro dos limites regulatórios, indicando ausência de impacto ambiental significativo.

Esse monitoramento contínuo funciona como um mecanismo de verificação independente dos demais eixos: é ele que permite confirmar, com base em medição direta, que a classificação, o transporte e o armazenamento descritos anteriormente não estão gerando impacto mensurável fora das instalações do instituto.

6. Avanços e desafios

Avanços

Arcabouço regulatório robusto: o gerenciamento de rejeitos radioativos no Brasil é respaldado por um conjunto abrangente de normas nacionais e internacionais, estabelecidas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) e Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), garantindo elevados padrões de segurança em todas as etapas do processo.

Vale destacar que a classificação em quatro níveis adotada pela CNEN (2014a) segue a mesma lógica geral das recomendações da AIEA (2018), o que facilita o diálogo técnico do Brasil com outros países que adotam padrões semelhantes e reduz a necessidade de adaptações específicas nas embalagens e nos procedimentos utilizados no transporte internacional de materiais radioativos.

Conformidade operacional: as atividades desenvolvidas pelo IPEN seguem rigorosamente os requisitos técnicos e legais relacionados ao acondicionamento, armazenamento e transporte de materiais radioativos, assegurando a proteção dos trabalhadores, da população e do meio ambiente.

Ausência de incidentes: os registros operacionais demonstram um histórico consistente de segurança, sem ocorrência de acidentes relevantes durante o transporte e a armazenagem dos rejeitos radioativos, evidenciando a eficácia dos procedimentos adotados.

É importante notar que "zero incidentes" não significa ausência de risco, mas sim que os controles em vigor — planos de emergência, ensaios de embalagem e monitoramento contínuo — têm sido suficientes para conter os riscos inerentes à atividade dentro dos limites aceitáveis.

Manter esse histórico à medida que o volume de rejeitos cresce é, portanto, um desafio contínuo, e não uma garantia permanente.

Sistema de gestão da qualidade (ISO 9001:2015): a certificação conforme a norma ISO 9001:2015 (ISO, 2015) reforça o compromisso institucional com a melhoria contínua, a padronização dos processos e a confiabilidade das atividades relacionadas ao gerenciamento de materiais e rejeitos radioativos.

Desafios

Ausência de um repositório definitivo: o Brasil ainda não dispõe de uma instalação definitiva para a disposição final de rejeitos radioativos de médio e alto nível, o que torna necessário o armazenamento prolongado desses materiais em instalações provisórias até a implementação de uma solução permanente.

Um repositório geológico profundo é uma instalação projetada para isolar rejeitos de alto nível por períodos que ultrapassam séculos, combinando barreiras de engenharia com formações rochosas estáveis.

A ausência dessa estrutura no Brasil não é uma particularidade nacional: poucos países no mundo concluíram instalações desse tipo, o que reflete tanto a complexidade técnica do empreendimento quanto o longo horizonte de planejamento e de aceitação social que ele exige.

Ainda assim, a dependência de depósitos provisórios por prazo indeterminado é reconhecida, inclusive pelo próprio setor, como uma solução transitória, o que reforça a necessidade de que o tema permaneça na agenda de investimentos do país.

Capacidade limitada de vitrificação: embora a vitrificação seja reconhecida como uma das tecnologias mais seguras para o acondicionamento de rejeitos de alta atividade, sua aplicação no país ainda



é restrita, exigindo investimentos em infraestrutura, pesquisa e desenvolvimento tecnológico.

Expansão da infraestrutura: a implantação do Reator Multipropósito Brasileiro (RMB) deverá ampliar significativamente a geração de materiais radioativos para pesquisa, produção de radioisótopos e testes de combustíveis nucleares.

Esse cenário demandará a modernização e ampliação das instalações de armazenamento, tratamento e gerenciamento de rejeitos, garantindo que a infraestrutura acompanhe o crescimento das atividades nucleares no país.

O RMB é apresentado pelo próprio setor nuclear brasileiro como um marco para a pesquisa e para a produção nacional de radioisótopos, reduzindo a dependência de importação de materiais hoje utilizados em medicina nuclear e em aplicações industriais.

Esse ganho estratégico, no entanto, só se sustenta se vier acompanhado do correspondente investimento em armazenagem e tratamento de rejeitos, sob risco de o país repetir, em maior escala, o mesmo gargalo já observado hoje na ausência de um repositório definitivo.

Os quatro avanços e os três desafios aqui discutidos não são independentes entre si: o mesmo arcabouço regulatório que sustenta a conformidade operacional e a ausência de incidentes é o que, paradoxalmente, ainda não avançou o suficiente para resolver a questão do repositório definitivo.

Isso sugere que os próximos passos do setor dependem menos de novas normas e mais de investimento efetivo nas soluções tecnológicas — como a vitrificação em maior escala — já previstas, mas ainda pouco implementadas no país.

CONCLUSÃO

O Brasil possui estrutura normativa sólida para a gestão de rejeitos radioativos, e o IPEN demonstra elevado padrão operacional, com ausência de incidentes e programas de monitoramento ambiental eficazes.

A análise documental mostrou que a classificação dos rejeitos, o transporte por modal rodoviário e aéreo, o armazenamento em depósitos provisórios e o monitoramento ambiental seguem, de forma consistente, o que determinam as normas da CNEN e as diretrizes da AIEA.

O crescimento de 13,9% no volume de rejeitos entre 2019 e 2022, mais acentuado nas classes de médio e alto nível, indica que essa estrutura vem sendo exigida

de forma crescente, o que reforça a importância de acompanhar sua evolução nos próximos anos.

Contudo, a falta de repositório definitivo e as limitações de capacidade de vitrificação representam desafios críticos para o futuro do setor nuclear, sobretudo diante da expansão de atividades prevista com a implantação do Reator Multipropósito Brasileiro.

Investimentos em infraestrutura, capacitação profissional e políticas públicas de longo prazo são essenciais para garantir segurança radiológica e proteção ambiental, de modo que o país consiga sustentar, também no médio e longo prazo, o padrão de conformidade hoje observado no transporte e na armazenagem provisória de seus rejeitos radioativos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Faculdade de Tecnologia de Jundiaí, aos docentes do curso de Gestão de Logística Integrada e ao orientador Prof. MSc. Érico Francisco Innocente pelo apoio e orientação.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA (AIEA). Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, 2018 Edition. Safety Standards Series nº SSR-6 (Rev. 1). Viena: IAEA, 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). Resolução nº 420, de 12 de fevereiro de 2004. Aprova as Instruções Complementares ao Regulamento do Transporte Terrestre de Produtos Perigosos. Brasília: ANTT, 2004. (Revogada).
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). Resolução nº 5.998, de 4 de novembro de 2022. Atualiza o Regulamento para o Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos e aprova suas Instruções Complementares. Brasília: ANTT, 2022.
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). Norma CNEN NE 5.02: Transporte, Recebimento, Armazenagem e Manuseio de Elementos Combustíveis de Usinas Nucleoelétricas (Portaria CNEN/PR nº 08/2003). Rio de Janeiro: CNEN, 2003.
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). Norma CNEN NN 8.01: Gerência de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação. Rio de Janeiro: CNEN, 2014a.



COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). Norma CNEN NN 3.01: Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica. Rio de Janeiro: CNEN, 2014b.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). Norma CNEN NN 5.01: Regulamento para o Transporte Seguro de Materiais Radioativos (Resolução CNEN nº 271/2021, substitui a Norma CNEN NE-5.01/1988). Rio de Janeiro: CNEN, 2021.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). *CNEN realiza transporte de fontes radioativas de radioterapia para o IEN*. Brasília: CNEN, 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/assunto/ultimas-noticias/cnen-realiza-transporte-de-fontes-radioativas-de-radioterapia-para-o-ien>. Acesso em: 05 jul. 2026.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES (IPEN). Relatórios de gestão e relatórios de atividades, 2019–2022. São Paulo: IPEN/CNEN, 2022.

INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION (IATA). Dangerous Goods Regulations (DGR). Montreal: IATA, ed. vigente.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). International Maritime Dangerous Goods (IMDG) Code. Londres: IMO, ed. vigente.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 9001:2015 — Quality management systems: requirements. Genebra: ISO, 2015.