

**SEGURANÇA E LOGÍSTICA
PARA SMRS: A
CONTRIBUIÇÃO DO BRASIL
NA MODELAGEM DO
TRANSPORTE DE
COMBUSTÍVEL IRRADIADO
BASEADA EM DADOS DE
PWR**

**SAFETY AND LOGISTICS FOR SMRS: BRAZIL'S CONTRIBUTION TO
MODELING RADIATED FUEL TRANSPORT BASED ON PWR DATA**

Engenharias • 26/03/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/774557115](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/774557115)

Gleyson Teixeira dos Santos¹

Luiz Vicente Gomes Tarelho²

José Ubiratan Delgado³

RESUMO

A transição energética global aponta para os Reatores Modulares Pequenos (SMRs) como uma solução promissora para a descarbonização e para a expansão nuclear flexível. Contudo, o sucesso desta tecnologia depende criticamente da resolução de seus desafios logísticos e de segurança inerentes, especialmente no transporte de combustível novo e irradiado. Este estudo aborda uma lacuna regulatória e operacional emergente, utilizando a vasta e consolidada experiência do Brasil com reatores de Água Pressurizada (PWR) — base tecnológica provável para a primeira geração de SMRs — como um estudo de caso essencial. Os artigos de referência (*Nuclear Technology*, 2019; *Waste Management*, 2018) já sinalizaram que a modularidade e o *design* compacto dos SMRs alteraram fundamentalmente as estratégias de embalagem e transporte, exigindo uma reavaliação das normas de segurança. Este trabalho propõe um roteiro prático e adaptativo que garante a segurança radiológica e física do transporte de combustível de SMR-PWRs no Brasil e, por extensão, em qualquer nação com histórico em PWR.

Palavras-chave: SMRs, Segurança Nuclear, Transporte de Material Radioativo, Combustível Irradiado, PWR.

ABSTRACT

The global energy transition points to Small Modular Reactors (SMRs) as a promising solution for decarbonization and flexible nuclear expansion. However, the success of this technology critically depends on resolving its inherent logistical and safety challenges, especially when transporting new and irradiated fuel. This study addresses an emerging regulatory and operational gap, using Brazil's vast and consolidated experience with Pressurized Water Reactors (PWR) — the likely technological basis for the first

generation of SMRs — as an essential case study. Reference articles (Nuclear Technology, 2019; Waste Management, 2018) have already signaled that the modularity and compact design of SMRs have fundamentally altered packaging and transportation strategies, requiring a reassessment of safety standards. This work proposes a practical and adaptive roadmap that guarantees the radiological and physical safety of fuel transport from SMR-PWRs in Brazil and, by extension, in any nation with a history of PWR.

Keywords: SMRs, Nuclear Safety, Transport of Radioactive Material, Irradiated Fuel, PWR.

I. INTRODUÇÃO

A transição energética global aponta para os reatores modulares pequenos (SMRs) como uma solução promissora para a descarbonização e para a expansão nuclear flexível. No entanto, para que esta tecnologia seja bem-sucedida, é crucial resolver seus desafios logísticos e de segurança, particularmente no que se refere ao transporte de combustível novo e irradiado. Este estudo utiliza a consolidada experiência brasileira com reatores de Água Pressurizada (PWR) para abordar uma lacuna regulatória e operacional emergente. A experiência em PWRs, que são a base tecnológica mais provável para a primeira geração de SMRs, serve como um projeto e estudo de caso fundamental. Referências importantes na área, como a *Nuclear Technology* (2019) e *Waste Management* (2018) já destacaram que a modularidade e o *design* dos SMRs modificam as estratégias de embalagem e transporte, exigindo, conseqüentemente, uma reavaliação das normas de segurança existentes [1,2].

A metodologia adotada é ancorada nos princípios do Regulamento para o Transporte Seguro de Material Radioativo (SSR-6) da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) [3]. O SSR-6 é o padrão regulatório mundial, mas atualmente não contempla de forma explícita e na totalidade as alterações permitidas para o transporte de materiais radioativos específicos e os volumes associados aos SMRs. O arcabouço de segurança fundamental da AIEA necessita de adaptações e esclarecimentos para lidar com os novos desafios impostos pelos SMRs. No contexto brasileiro, integrar essas normas na realidade nacional é uma missão primordial da recém-criada Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN), estabelecida pela Lei nº 14.222 de 15 de outubro de 2021 [4].

II. MODELO DE AÇÃO E ABORDAGEM REGULATÓRIA

O trabalho se propõe a fornecer um roteiro prático e adaptativo para garantir a segurança radiológica e física do transporte de combustível de SMR-PWRs no Brasil. O estudo foca em duas áreas críticas: a Segurança Radiológica e Engenharia de *Casks*, e a Segurança Física e Logística de Rota.

A. Segurança Radiológica e Engenharia de Casks

Nesta seção, é analisada a adequação dos barris de transporte tradicionais para as possíveis novas características do combustível SMR, como o *burnup* mais alto e tempos de atualização variados [5,6,7].

A experiência brasileira é aplicada em:

- Projeto de Fonte e Blindagem: Os requisitos de blindagem e monitoramento radiológico, baseados na experiência nacional,

serão adaptados.

- Critérios de Acessibilidade de Embalagens (*Pacotes*): Serão estabelecidos critérios para acomodar a diversidade dimensional e o aumento potencial no número de remessas que os SMRs irão gerar.

A segurança radiológica no transporte de materiais nucleares de alta atividade é primordialmente assegurada pelo projeto robusto das embalagens, conhecidas como casks (Embalagens Tipo B). Estas estruturas são fundamentais para manter o material radioativo contido, blindado e subcrítico sob condições extremas de acidente. Para certificar um projeto Tipo B, as normas internacionais (AIEA SSR-6) e nacionais (CNEN-NN-5.01) exigem uma série de ensaios de acidente hipotético, sendo o mais rigoroso o Teste de Queda de 9 Metros. Este teste simula um impacto severo ao submeter o cask a uma queda livre contra um alvo indeformável (placa de aço maciça), garantindo que a embalagem absorva o máximo de energia e sofra o dano mais severo possível. O requisito de sobrevivência das Embalagens Tipo B se estende a outros ensaios cruciais, como o Teste de Penetração (queda de pino de aço) e o Teste de Incêndio (exposição a 800°C por 30 minutos). A falha em qualquer um desses testes, simulando um acidente real, resultaria em três grandes riscos radiológicos. O primeiro é a Exposição Externa, causada pela perda da blindagem e consequente aumento da dose de radiação. O segundo é a Contaminação do ambiente, veículos e pessoas, devido à perda da contenção, liberando material radioativo para inalação ou ingestão. O terceiro risco, e talvez o mais grave, aplica-se a materiais físséis: o risco de Criticalidade [8]. Um impacto severo pode reorganizar o material dentro do cask, levando a uma aproximação das unidades físséis e ao início de uma reação nuclear em cadeia

autossustentável, com liberação súbita e perigosa de nêutrons e radiação. Em suma, o rigoroso Teste de Queda de 9 Metros é o pilar da engenharia de casks, projetado para garantir que a exposição externa, contaminação e criticalidade sejam minimizados, confirmando a aptidão da embalagem para o transporte seguro de combustíveis nucleares irradiados e rejeitos de alto nível. A robustez da engenharia dos *casks* não é acidental, mas sim o resultado de um rigoroso sistema de normas e regulamentos que estabelece a base para a segurança nuclear. Este sistema opera em uma hierarquia que se inicia no nível global e se manifesta nas legislações nacionais.



Figure 1: Transportation Emergency Preparedness Program Radioactive Material Shipping Packages Department of Energy United States of America.

<https://teppinfo.com/resources/merrtt-module-03.pdf>

No âmbito internacional, a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA/IAEA) é a referência máxima, sendo o documento SSR-6 (Rev. 1): *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material* o documento basilar para o projeto e uso dos *casks*. Este regulamento define as condições de ensaio, como o teste de queda de 9 metros, garantindo a uniformidade e a confiabilidade globais. Adicionalmente, outras normas de segurança da AIEA (séries *Specific Safety Requirements – SSR* e *Safety Guides – SSG*) [9].fornecem o arcabouço para a Segurança Radiológica e o

gerenciamento de rejeitos, que são intrinsecamente ligados à finalidade dos *casks* de transporte.



Figura 2: Os recipientes de transporte de combustível nuclear irradiado foram submetidos a uma série de testes de impacto nos Laboratórios Sandia, nos EUA. Neste teste em escala real, uma locomotiva ferroviária, acelerada a 81,5 milhas por hora por um trenó movido a foguete, colidiu com um veículo transportador carregado com um recipiente de combustível nuclear (objeto vermelho).

<https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull21-6/21602542432.pdf>

No Brasil, a ANSN (Autoridade Nacional de Segurança Nuclear) atua como a autoridade regulatória, transpondo os princípios da AIEA para o contexto nacional. A CNEN-NN-5.01 (*Transporte Seguro de Materiais Radioativos*) é a norma fundamental que estabelece os requisitos técnicos e operacionais para o transporte, enquanto que a CNEN-NN-5.05 (Requisitos de Projeto e de Ensaio para Certificação de Materiais Radioativos, Embalagens e Volumes). Além disso, a CNEN-NN-3.01 (*Requisitos Básicos de Radioproteção e Segurança Radiológica de Fontes de Radiação.*) [10,11,12]. Estabelece os princípios

de proteção — como a otimização (princípio ALARA), a justificação e a limitação de doses —, que devem ser inerentes a todo o projeto e uso das embalagens. O estrito cumprimento dessas regulamentações garante que a segurança do material seja mantida, desde sua origem no ciclo do combustível nuclear até o destino final, em linha com as melhores práticas de gerenciamento de rejeitos radioativos.

B. Segurança Física (*Security*) e Logística de Rota

A transição para o modelo de Reatores Modulares Pequenos (SMR) — Small Modular Reactors —, caracterizado por uma potencial implantação dispersa em diversas localidades licenciadas, impõe desafios significativos à Segurança Física (*Security*) do material nuclear [13]. Diferentemente das grandes usinas concentradas, a natureza distribuída dos SMRs tende a aumentar a frequência e a extensão das rotas de transporte, intensificando a vulnerabilidade a ameaças como o desvio de material. Portanto, a análise e o detalhamento dos protocolos de segurança da rota são mandatórios para a estruturação de uma matriz energética segura baseada nesta nova tecnologia.



Figura 3: adaptado pelo autor com uso de Inteligência artificial

Para mitigar essa vulnerabilidade logística, o Brasil deve adotar um sistema robusto de defesa em profundidade focado na proteção dos carregamentos durante todo o trajeto. As medidas essenciais a serem detalhadas e implementadas incluem o Rastreamento contínuo e em tempo real dos *casks*, como exemplificado na figura 3. A provisão de Escolta especializada e tecnologicamente equipada para dissuasão e resposta rápida, e o uso de Comunicações Seguras e criptografadas entre a transportadora, a central e os órgãos de segurança. Tais protocolos garantem não apenas a localização constante do material, mas também a capacidade de resposta imediata a qualquer incidente. Objetivando estabelecer uma arquitetura de segurança física que previna ativamente o desvio de material nuclear e assegure a pronta resposta a emergências e ataques. Este sistema de proteção só será eficaz se operar em estrita conformidade e colaboração com os órgãos de fiscalização nacionais, especialmente a Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN), que coordena os esforços de segurança e fiscalização. A integração entre logística, tecnologia de rastreamento

e capacidade de resposta tática, sendo fundamental para o sucesso da implantação segura dos SMRs no território nacional.

III. DISCUSSÃO E IMPLICAÇÕES

O futuro da SSR-6 não reside na ruptura, mas sim na sua revisão cíclica e melhoria contínua. Esse processo visa assegurar que as regulamentações de transporte permaneçam tecnicamente sólidas e se adequem às novas realidades. As áreas-chave de avanço estão consolidadas nos documentos de trabalho do Comitê de Normas de Segurança no Transporte (TRANSSC) da AIEA, especialmente o DS543, que detalha a submissão técnica à UNECE onde a relação fundamental entre as agências reside na harmonização regulatória global. A AIEA, por intermédio do Comitê TRANSSC, estabelece a SSR-6 como o padrão de segurança fundamental para o transporte de material radioativo em todos os modais. Subsequentemente, a UNECE desempenha o papel crucial de incorporar e traduzir os requisitos técnicos detalhados na SSR-6 (como os contidos no documento DS543 - Rascunho de Norma de Segurança (Draft Safety Standard) da AIEA) em seus regulamentos de transporte terrestre (ADR, RID e ADN). Essa colaboração assegura a uniformidade e a conformidade legal das regras aplicadas internacionalmente.

Para concretizar essa uniformidade e conformidade legal em escala global, a SSR-6 estabelece um sistema rigoroso de classificação, no qual a segurança do transporte de materiais de alta atividade — frequentemente destinado aos modais Marítimo, Rodoviário e Ferroviário — é assegurada pelas especificações técnicas das Embalagens do Tipo B.

O limite de atividade de uma Embalagem do Tipo B é determinado pela atividade máxima que seu projeto é capaz de transportar, em conformidade com três critérios de segurança críticos. Primeiramente, é essencial a gestão rigorosa da Taxa de Dose Externa: a embalagem deve possuir blindagem adequada para assegurar que os limites regulamentares de dose não sejam excedidos na sua superfície e a 2 metros de distância, mesmo sob condições normais de transporte. Em segundo lugar, a Dissipação de Calor é vital: o calor gerado pela atividade radioativa (particularmente em materiais como o combustível irradiado) deve ser gerenciado de forma eficiente para evitar que as temperaturas comprometam a integridade da contenção ou da blindagem da embalagem. Por fim, a Integridade Pós-Acidente é fundamental: a embalagem deve demonstrar a capacidade de manter a contenção e a blindagem dentro de limites aceitáveis após ser submetida a ensaios de acidente rigorosos, que simulam quedas de 9 metros, punção, exposição a fogo de 800°C por 30 minutos e imersão.

A segurança das Embalagens Tipo A é fundamentada na suposição de um risco máximo de exposição em caso de acidente¹. As regulamentações preveem que, sob certas condições de acidente, a Embalagem Tipo A pode liberar até 1/1000 de seu conteúdo radioativo. Desse material liberado, presume-se que 1/1000 possa ser absorvido por um indivíduo, resultando na suposição geral de que um milionésimo (1/1.000.000) do conteúdo de uma embalagem Tipo A possa ser absorvido. Os limites de conteúdo (A1 e A2) são derivados dessa suposição e da radiotoxicidade do material. Em contraste, a Embalagem Tipo B(U) é projetada para reter blindagem e contenção adequadas sob condições de acidente mais severas. Os limites de liberação de conteúdo são definidos pela restrição de perda:

- Sob condições normais de transporte, a perda de conteúdo radioativo deve ser restrita a não mais que $A_2 \times 10^{-6}$ por hora
- Sob condições de acidente (após os testes mecânicos e térmicos), a perda acumulada de conteúdo radioativo deve ser restrita a não mais que $A_2 \times 10^{-3}$ em um período de uma semana
- Além disso, a embalagem Tipo B(U) deve reter blindagem suficiente pós-acidente para garantir que o nível de radiação a 1 metro de sua superfície não exceda 1 rem/hr

É importante notar que não há limite superior para a quantidade de material radioativo que pode ser transportada em embalagens Tipo B, mas fatores como o calor gerado devem ser controlados para não prejudicar a embalagem. Esses requisitos de desempenho extremo fazem com que a Embalagem do Tipo B seja o padrão de segurança mais comum e amplamente utilizado em modais de superfície, como o transporte Rodoviário, Ferroviário e Marítimo, para materiais de alta atividade. As Embalagens do Tipo B são classificadas em dois subtipos principais, distinção essa baseada nos requisitos de aprovação e validação internacional. O primeiro subtipo é a Embalagem Tipo B(U) (Unilateralmente Aprovada). Seu projeto exige aprovação apenas da Autoridade Competente do país de origem (onde o projeto foi desenvolvido ou será utilizado). Este é o tipo mais comum para o transporte internacional, sendo amplamente aceito desde que os países de destino e de trânsito reconheçam o certificado de aprovação emitido pela Autoridade Competente de origem.

O segundo subtipo é a Embalagem Tipo B(M) (Multilateralmente Aprovada). O seu projeto requer aprovação não apenas da Autoridade Competente do país de origem, mas também de todas as Autoridades Competentes dos países envolvidos no transporte ou na implementação do projeto. Este subtipo é geralmente aplicado a projetos mais complexos que envolvem características operacionais específicas que não se enquadram plenamente nas especificações do Tipo B(U) ou que utilizam certos arranjos especiais ou materiais incomuns. Além desses subtipos, existe uma classificação de embalagem relacionada que compartilha a rigorosidade do Tipo B, mas com requisitos aprimorados: a Embalagem Tipo C. Embora, seja uma classificação separada, ela é essencialmente uma Embalagem Tipo B com requisitos de teste adicionais, sendo exigida exclusivamente para o transporte aéreo de materiais de alta atividade (conforme estabelecido para mitigar os riscos específicos desse modal). As Embalagens do Tipo C são o padrão de segurança mais elevado na regulamentação de transporte de material radioativo, sendo especificamente projetadas e exigidas para o transporte aéreo de materiais de altíssima atividade. Estas embalagens devem passar por testes de resistência mais rigorosos do que as Embalagens Tipo B, incluindo a simulação de condições extremas de acidentes aéreos (como impactos de alta velocidade e incêndio prolongado), garantindo que a contenção e a blindagem não sejam comprometidas durante o voo.

Comparativo Continental na Aplicação de SSR-6 (Tipo B(U)) [14]

Continentes/Região	Atendimento aos Requisitos Tipo B(U)	Questões e Desafios
Europa	Maturidade e Design: Alto grau de harmonização regulatória (via Euratom/AIEA). Maior número de projetos proprietários de embalagens Tipo B para Combustível Nuclear Irrradiado - CNI. Forte ênfase na harmonização <i>safety</i> e <i>security</i> .	Resiliência Pública e Logística: Questões logísticas complexas devido à alta densidade populacional. Debates contínuos sobre a suficiência dos testes em cenários de acidentes severos não contemplados (ex: impacto em alta velocidade ou incêndio de longa duração).
América do Norte (EUA/Canadá)	Regulamentação e Inovação: Regulamentação altamente madura (NRC/DOT nos EUA) e alinhada à SSR-6. Forte foco em modelagem computacional para validação de design, complementando os testes físicos. Grandes volumes de transporte doméstico de materiais (CNI, resíduos).	Envelhecimento da Frota: Necessidade de revalidação e modernização dos projetos de embalagens Tipo B mais antigos para CNI e resíduos de alta atividade. Desafios na harmonização das aprovações para transporte intermodal e transfronteiriço.
Ásia (Foco Leste Asiático)	Crescimento e Capacidade: Rápido crescimento do programa de energia nuclear (China, Coreia, Índia). Investimento em capacidade de teste e certificação domésticos. O atendimento ao SSR-6 é essencial para facilitar o comércio nuclear internacional.	Capacitação e Infraestrutura: Aceleração da necessidade de treinamento de pessoal e desenvolvimento de infraestrutura regulatória para acompanhar o crescimento da frota nuclear e a complexidade dos transportes. Questões sobre a qualidade e consistência na fabricação das embalagens em meio à rápida industrialização.
América Latina (Foco Brasil)	Conformidade Legal: Regulamentação (como a Norma CNEN NN 5.01 no Brasil) está solidamente baseada na SSR-6 , garantindo os requisitos de contenção e blindagem para Tipo B.	Logística e Segurança Física: Desafios logísticos impostos pela grande dimensão territorial e infraestrutura de transporte (rodoviário) regional. Maior foco na segurança física e proteção do transporte.

No cenário internacional, baseado em dados de projeção extraídos do Painel de Controle da NEA, conforme ilustrado na Figura 4, temos capacidade por tipo de combustível e tipo de remessa, pacote tipo B, por ano.

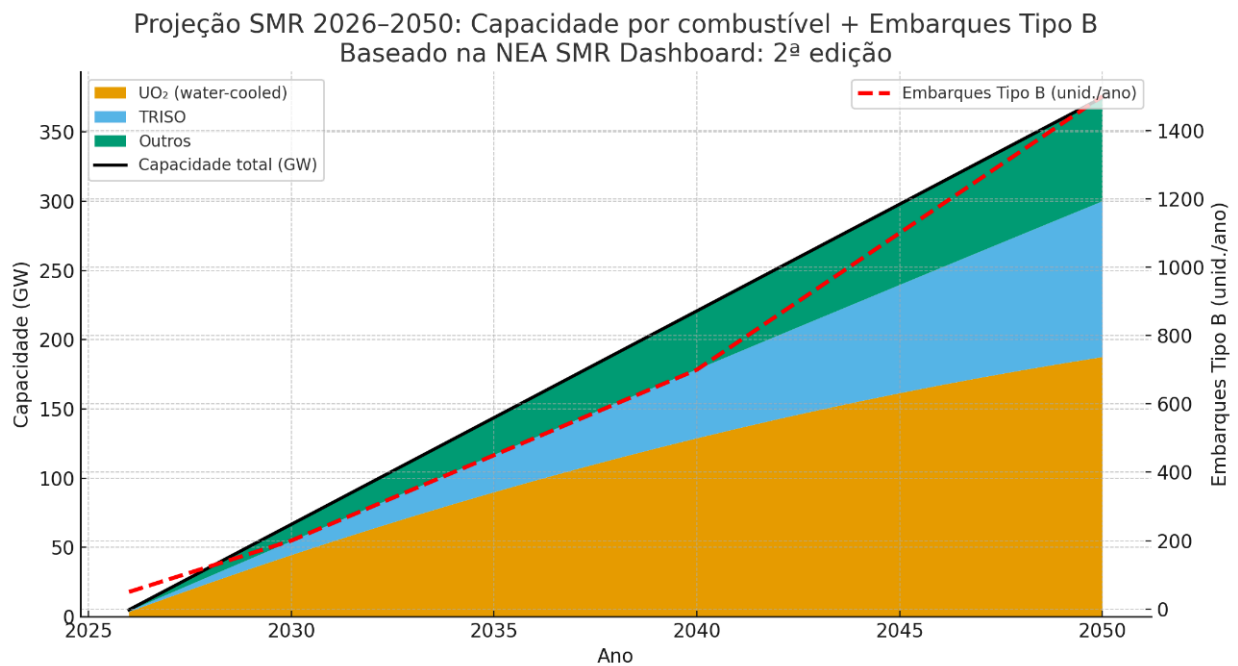


Figura 4: adaptada pelo autor - NEA

A comparação regional apresentada na Figura 5 leva em consideração a capacidade de SMR (reatores modulares pequenos) e o tipo de combustível por região ou continente.

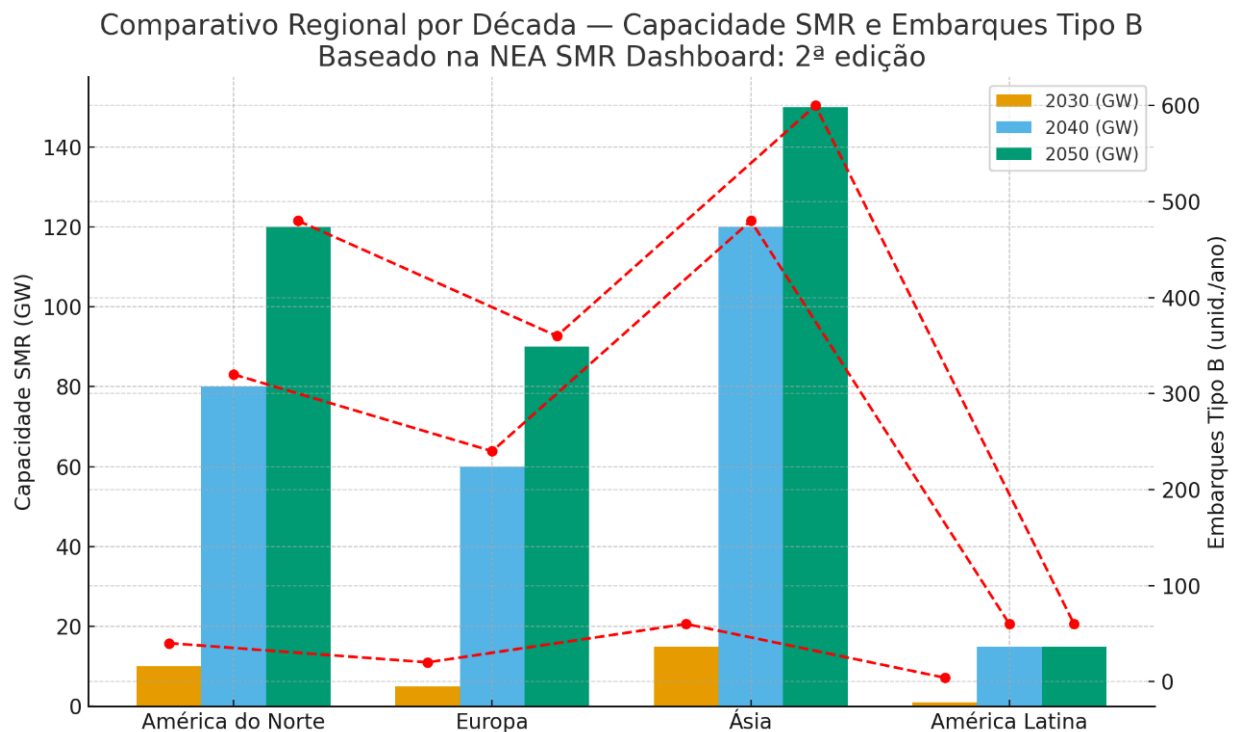


Figura 5: adaptado pelo autor - NEA [15]

O Brasil, por meio da Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN), possui uma contribuição valiosa a oferecer à comunidade internacional, concentrada em três áreas de *expertise* regulatória e

operacional. Primeiramente, destaca-se a Expertise em Segurança Física no Transporte Terrestre Extensivo. Dada a vasta extensão territorial do país e a predominância do transporte rodoviário de fontes de alta atividade, o Brasil desenvolveu um conhecimento aprofundado em Logística de Risco e Segurança no Trânsito. Isso inclui a exigência de Planos de Transporte rigorosos (atualizados em 2021) com medidas para evitar roubo e garantir a rastreabilidade. Além disso, a experiência no Controle de Transporte de Pontos Críticos permite o compartilhamento de protocolos de emergência e fiscalização rigorosa para radioisótopos utilizados na medicina e indústria. Em segundo lugar, o Brasil contribui para o Fortalecimento da Capacidade Regulatória Regional. O país tem um papel de destaque no Mercosul, podendo liderar a cooperação técnica para a implementação e fiscalização consistentes da SSR-6 na América Latina, elevando o padrão de segurança. A experiência brasileira na elaboração de normas e na avaliação de projetos de embalagens é um recurso valioso para o intercâmbio regional

Por fim, o Brasil oferece *expertise* no Gerenciamento da Interface com Outros Modos. Sua experiência em liderar a coordenação regulatória entre diversas agências (CNEN, ANTT, ANAC, etc.) para o transporte intermodal (rodoviário, marítimo e aéreo) de materiais nucleares permite o compartilhamento de modelos de articulação interagências, otimizando a segurança e minimizando atrasos no envio de materiais críticos, como os radiofármacos.

O ciclo de revisão atual, focado na futura SSR-6 (Rev. 2), demonstra um significativo engajamento internacional. Esta revisão visa incorporar a experiência operacional consolidada e as propostas de aperfeiçoamento dos Estados Membros e *stakeholders*, tendo recebido mais de 300 propostas de mudança para análise e

consideração no documento final objetivando interface de segurança radiológica e segurança física ou seja o equilíbrio entre as medidas de safety e security, garantindo que as medidas de segurança física não comprometam a segurança radiológica e vice-versa, já para o transporte marítimos e modalidades específicas aponta para definição de áreas de estiva e limite de índice de transporte e índice de segurança de criticidade para embarcações, discutindo a necessidade de clareza regulatória em ambientes de transportes complexos referenciado no item 2.5 Embora o foco seja técnico, a modernização da SSR-6 é estrategicamente importante para a futura implementação de SMRs (Small Modular Reactors). Uma regulamentação de transporte cientificamente sólida (SSR-6) é essencial para dar credibilidade e um arcabouço normativo confiável ao crescente transporte de combustível nuclear associado a essas novas tecnologias

IV. CONCLUSÃO

A análise detalhada dos requisitos de desempenho das Embalagens do Tipo B e a vigilância contínua do Comitê TRANSSC da AIEA confirmam que a segurança do transporte de material radioativo, em modais rodoviário e marítimo, é tecnicamente robusta e inerentemente conservadora. A segurança reside não na limitação da atividade, mas sim no design comprovado da embalagem, validado para suportar cenários de acidentes severos, garantindo a contenção, a blindagem e a anticriticalidade. No entanto, o futuro impõe desafios globais que exigem a contínua revisão e harmonização da SSR-6. A comunidade internacional, por meio de documentos como o DS543, deve avançar na integração das medidas de segurança radiológica (*safety*) e segurança física (*security*). Além disso, deve endereçar a necessidade de

modernização e revalidação das frotas de embalagens envelhecidas e a gestão logística imposta pela crescente complexidade do transporte. Neste cenário de avanço e desafios, o Brasil emerge como um *player* estratégico. Por deter o ciclo completo do combustível nuclear e ter um caminho claro para a implementação de projetos de Small Modular Reactors (SMRs), o país se posiciona na vanguarda da logística nuclear latino-americana. A natureza distribuída dos SMRs tende a aumentar a frequência das rotas de transporte, tornando o detalhamento dos protocolos de Segurança Física e Logística de Rota mandatórios. O Brasil deve alavancar sua experiência consolidada em reatores PWR (a base tecnológica mais provável para a primeira geração de SMRs) para obter duplo benefício e contribuição: primeiramente, ao reforçar sua Abordagem Regulatória e Modelo de Ação ao incorporar as melhores práticas globais de segurança física e logística intermodal, fundamentando-se em sua *expertise* no Transporte Terrestre Extensivo regido pela CNEN-NN-5.01. E, em segundo lugar, o país pode oferecer uma contribuição de alto impacto na Modelagem do Transporte de Combustível Irradiado Baseada em Dados de PWR. Utilizando a experiência acumulada com o transporte do combustível de reatores PWR, o Brasil pode fornecer dados empíricos, análises de cenários de risco e *insights* logísticos cruciais para a validação de novos designs de embalagens. Essa contribuição é essencial para a futura cadeia logística dos SMRs, consolidando o Brasil como um parceiro fundamental na governança global da segurança do transporte radioativo.

Esta pesquisa é uma contribuição crítica e oportuna para a infraestrutura nuclear global, indo além da análise teórica. Ao adaptar a experiência de um país nuclear aos desafios emergentes dos SMRs, e ao focar em soluções regulatórias para a ANSN, o

trabalho oferece um modelo replicável para a segurança e a governança de SMRs. Esta contribuição se revela fundamental para o intercâmbio de conhecimento e para a formação de um consenso regulatório que sustenta a implantação segura e responsável da próxima geração de energia nuclear.

AGRADECIMENTOS

Expresso minha sincera gratidão à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro, fundamental para o desenvolvimento da minha pesquisa de Doutorado. Agradeço também à Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) pela colaboração na análise dos requisitos regulatórios nacionais, baseados em suas normas técnicas (como a CNEN-NN-5.01), e por fornecer *insights* valiosos sobre a aplicação da SSR-6 no contexto do transporte terrestre extensivo. Por fim, estendo meu reconhecimento aos grupos de trabalho do Comitê TRANSSC da AIEA, cujos documentos e discussões balizaram a análise técnica dos requisitos de desempenho das Embalagens do Tipo B.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA. *Nuclear Technology Review 2019*. Viena: International Atomic Energy Agency, 2019. 48 p. Disponível em: <https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc63-inf2.pdf>. Acesso em: 01 set. 2025.
2. ZHAO, Xiaobing et al. A critical review of waste management in nuclear fuel reprocessing. *Waste Management*, Amsterdam, v. 76, n. 1, p. 1-13, jun. 2018.

3. AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÓMICA. *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material: Specific Safety Requirements No. SSR-6 (Rev. 1)*. Edição de 2018. Vienna: IAEA, 2018. (IAEA Safety Standards Series No. SSR-6 (Rev. 1)). Disponível em: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1798_web.pdf. Acesso em: 01 set. 2025.
4. BRASIL. Lei nº 14.222, de 15 de outubro de 2021. Cria a Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN); altera as Leis nºs 4.118, de 27 de agosto de 1962, 6.189, de 16 de dezembro de 1974, 6.453, de 17 de outubro de 1977, 9.765, de 17 de dezembro de 1998, 8.691, de 28 de julho de 1993, e 10.308, de 20 de novembro de 2001; e revoga a Lei nº 13.976, de 7 de janeiro de 2020. Diário Oficial da União, Brasília, DF, ed. 195, seção 1, p. 1, 18 out. 2021. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/l14222.htm. Acesso em: 29 ago. 2025.
5. OECD/NEA (Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico/Agência de Energia Nuclear). *High-Assay Low-Enriched Uranium: Drivers, Implications and Security of Supply*. Paris: OECD Publishing, 2024. Disponível em: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_96126/high-assay-low-enriched-uranium-drivers-implications-and-security-of-supply?details=true. Acesso em: 02 set. 2025.
6. AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÓMICA. *Considerations for the Transport of Spent Nuclear Fuel from Small Modular Reactors (SMRs)*. Vienna: IAEA, 2019. (IAEA-TECDOC-1869). Disponível em: <https://www->

pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1869web.pdf. Acesso em: 15 set. 2025.

7. OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY (ORNL) et al. Transportation Logistics and Security of SMRs and Their Fuel Cycles. In: UNITED STATES. Department of Energy. *Nuclear Energy Futures: SMR Development and Deployment Report*. Washington, D.C.: U.S. DOE, 2023. Cap. 4. Disponível em: <https://www.energy.gov/ne/advanced-small-modular-reactors-smrs>. Acesso em: 15 set. 2025.
8. LOWES, P. L. et al. Criticality Safety Basis for the IAEA Transport Regulations. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE PACKAGING AND TRANSPORT OF RADIOACTIVE MATERIAL, 17., 2013, San Francisco, CA, EUA. **Anais...** San Francisco, CA: PATRAM, 2013. Paper 388. Disponível https://resources.inmm.org/system/files/patram_proceedings/2013/388.pdf. Acesso em: 28 out. 2025.
9. AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÔMICA (IAEA). Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material. Viena: IAEA, 2021. (IAEA Safety Standards Series No. SSG-26, Rev. 1). Disponível em: <https://www.iaea.org/publications/14685/advisory-material-for-the-iaea-regulations-for-the-safe-transport-of-radioactive-material-2018-edition>. Acesso em: 28 out. 2025.
10. **CNEN**. *Norma CNEN NN 5.01: Regulamento para o Transporte Seguro de Materiais Radioativos*. Resolução CNEN N° 271/21, de 5 de março de 2021. Publicada no Diário Oficial da União em 11

de março de 2021. Rio de Janeiro: Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2021.

11. **CNEN.** *Norma CNEN NN 5.05: Requisitos de Projeto e de Ensaios para Certificação de Materiais Radioativos, Embalagens e Volumes.* Resolução CNEN N° 272/21, de 5 de março de 2021. Publicada no Diário Oficial da União em 9 de março de 2021. Rio de Janeiro: Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2021.
12. **CNEN.** *Norma CNEN NN 3.01: Requisitos Básicos de Radioproteção e Segurança Radiológica de Fontes de Radiação.* Resolução CNEN N° 323/24, de 28 de março de 2024. Publicada no Diário Oficial da União em 18 de abril de 2024. Rio de Janeiro: Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2024.
13. AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA ATÓMICA (IAEA). *Nuclear Security Recommendations on Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities (INFCIRC/225/Revision 5).* Vienna: International Atomic Energy Agency, 2011. (IAEA Nuclear Security Series No. 17). Disponível em: https://portal.tpu.ru/SHARED/r/ROMANLAAS/students/Tab2/inf_circ225_rev5.pdf. Acesso em: 15 set. 2025.
14. UNITED STATES. Nuclear Regulatory Commission. Packaging and Transportation of Radioactive Material. Washington, D.C.: U.S. Government Publishing Office, [2024]. (Code of Federal Regulations, 10 CFR Part 71).
15. LOWES, P. L. et al. Criticality Safety Basis for the IAEA Transport Regulations. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE PACKAGING AND TRANSPORT OF RADIOACTIVE MATERIAL,

17., 2013, San Francisco, CA, EUA. **Anais...** San Francisco, CA: PATRAM, 2013. Paper 388. Disponível https://resources.inmm.org/system/files/patram_proceedings/2013/388.pdf. Acesso em: 28 out. 2025.

16. **AGÊNCIA DE ENERGIA NUCLEAR (NEA)**. Painel de Reatores Modulares Pequenos da NEA: Segunda Edição. Paris: Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), 2023. 146 p. Disponível em: <https://doi.org/10.1787/0f3a3b83-en>. Acesso em: 28 out. 2025.
-

¹ Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, DIMIC Duque de Caxias, RJ, 25250-020, Brasil.

² Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, DIMIC Duque de Caxias, RJ, 25250-020, Brasil.

³ Instituto de Radioproteção e Dosimetria, DIMET, LNMRI Rio de Janeiro, RJ, 22780-160, Brasil.