



University of
Texas Libraries



e-revist@s



Centro Universitário Santo Agostinho

revista fsa

www4.unifsanet.com.br/revista

Rev. FSA, Teresina, v. 22, n. 6, art. 6, p. 108-134, jun. 2025

ISSN Impresso: 1806-6356 ISSN Eletrônico: 2317-2983

<http://dx.doi.org/10.12819/2025.22.6.6>

DOAJ DIRECTORY OF
OPEN ACCESS
JOURNALS

WZB
Wissenschaftszentrum Berlin
für Sozialforschung



Uma Breve Revisão Sobre as Tecnologias de Segurança de Reatores Nucleares

A Brief Review of Nuclear Reactor Safety Technologies

Marcos Costa de Magalhães Júnior

Graduação em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Rio de Janeiro
marcosmagalhaesjr.20231@poli.ufrj.br

João Pedro Vilarino de Assis Barreto

Graduação em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Rio de Janeiro
vilarino.20221@poli.ufrj.br

Alexandre Victor de Lima Salem

Graduação em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Rio de Janeiro
alexvictor@poli.ufrj.br

Moacir Porto Ferreira

Doutor em Administração pela Universidade do Grande Rio
Professor da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro
moacir.ferreira@poli.ufrj.br

Endereço: Marcos Costa de Magalhães Júnior

UFRJ, R. Antônio Barros de Castro, 119 - Cidade
Universitária, Rio de Janeiro - RJ, 21941-853, Brasil.

Endereço: João Pedro Vilarino de Assis Barreto

UFRJ, R. Antônio Barros de Castro, 119 - Cidade
Universitária, Rio de Janeiro - RJ, 21941-853, Brasil.

Endereço: Alexandre Victor de Lima Salem

UFRJ, R. Antônio Barros de Castro, 119 - Cidade
Universitária, Rio de Janeiro - RJ, 21941-853, Brasil.

Endereço: Moacir Porto Ferreira

Porto Ferreira Consultoria, Avenida Braz de Pina – 997,
sala 42, Vila da Penha, 21210673 - Rio de Janeiro, RJ –
Brasil.

**Editor-Chefe: Dr. Tonny Kerley de Alencar
Rodrigues**

**Artigo recebido em 09/12/2024. Última versão
recebida em 17/01/2025. Aprovado em 18/01/2025.**

**Avaliado pelo sistema Triple Review: a) Desk Review
pelo Editor-Chefe; e b) Double Blind Review
(avaliação cega por dois avaliadores da área).**

Revisão: Gramatical, Normativa e de Formatação



RESUMO

A Energia Nuclear, reconhecida por seu papel crucial na matriz energética global, evoluiu significativamente desde sua origem nos anos 1930. Este artigo explora os avanços tecnológicos e as inovações que moldaram a engenharia nuclear, com destaque para as gerações de reatores III+ e IV, caracterizadas por melhorias em segurança e sustentabilidade. Além disso, aborda os desafios enfrentados, incluindo acidentes históricos e o estigma associado, bem como as estratégias tecnológicas e educacionais empregadas para superar essas barreiras. Por meio de uma análise abrangente, são discutidos os avanços termo-hidráulicos e as aplicações futuras, incluindo a potencial contribuição da energia nuclear para a descarbonização e sustentabilidade energética.

Palavras-chave: Energia Nuclear. Tipos de Reatores Nucleares. Segurança. Inovações. Aplicações.

ABSTRACT

Nuclear energy, recognized for its critical role in the global energy matrix, has significantly evolved since its inception in the 1930s. This article explores the technological advancements and innovations shaping nuclear engineering, focusing on Generation III+ and IV reactors, characterized by enhanced safety and sustainability. Additionally, it addresses challenges such as historical accidents and associated stigma, as well as the technological and educational strategies employed to overcome these barriers. Through comprehensive analysis, the paper discusses thermohydraulic advancements and future applications, including nuclear energy's potential contribution to decarbonization and sustainable energy solutions.

Keywords: Nuclear Energy. Types of Nuclear Reactors. Safety. Innovation. Applications.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Energia Nuclear

A energia nuclear representa uma das principais fontes de geração de eletricidade em todo o mundo, sendo amplamente utilizada por diversos países. Embora sua importância seja visível, a energia nuclear enfrenta desafios significativos, especialmente no que diz respeito à segurança, ao temor social e ao seu desenvolvimento ao longo do tempo. A presente revisão abordará esses problemas com base em artigos selecionados, que buscam tratar do tema de forma a evidenciar as dificuldades enfrentadas no desenvolvimento dessa matriz energética, tanto no âmbito político quanto científico.

1.2 O Início da Engenharia Nuclear

A origem da energia nuclear remonta à década de 1930, quando o físico Enrico Fermi, ao realizar uma série de experimentos em Roma, demonstrou que, ao irradiar núcleos atômicos pesados com nêutrons, esses núcleos capturavam os nêutrons e se tornavam instáveis, levando à fissão nuclear. Esse processo, que resultava na divisão do núcleo e na liberação de grandes quantidades de energia, foi formalmente descoberto em 1934, dando início à era nuclear (FERMI, 1965).

1.3 Desenvolvimento dos Primeiros Reatores Nucleares

Nos primórdios de 1942, um grupo de cientistas liderado por Fermi iniciou trabalhos na Universidade de Chicago para desenvolver teorias sobre a fissão nuclear. Como resultado de tais estudos, foi construída, em novembro de 1942, a primeira usina nuclear do mundo, o reator Chicago Pile-1. De acordo com Ian-Hore Lacy, no livro “Nuclear Energy in the 21st Century”, uma grande diversidade de reatores nucleares experimentais foi construída e operada desde a metade do século XX, utilizando diferentes tipos de combustíveis, moderadores e refrigerantes. Inicialmente, os reatores moderados a grafite e resfriados a gás foram amplamente utilizados, mas logo a atenção se voltou para os projetos moderados por água leve e com urânio enriquecido, sendo o reator de água pressurizada (PWR) o mais comum para a produção de energia elétrica.

1.4 Primeiros Reatores Operacionais e Expansão da Energia Nuclear

Em 1952, o primeiro reator não experimental foi comissionado, sendo utilizado pela Marinha dos Estados Unidos para impulsionar o primeiro submarino nuclear, o Nautilus. Em 1953, o reator entrou em operação, marcando um marco importante na utilização da energia nuclear para fins militares. Entre 1953 e 1960, o presidente Dwight D. Eisenhower proferiu seu famoso discurso "Átomos para a Paz" na Assembleia Geral das Nações Unidas, incentivando a cooperação internacional para o desenvolvimento pacífico da tecnologia nuclear. Nesse período, diversos reatores nucleares foram comissionados para a produção de energia elétrica, como o BORAX III, o Sodium Reactor Experiment e o Dresden-1, e o Brasil obteve seu primeiro reator de pesquisa por meio do programa "Átomos para a Paz".

1.5 Desafios e Obstáculos ao Crescimento da Energia Nuclear

Embora a fissão nuclear tenha sido conhecida por mais de 70 anos, muitos países ainda não iniciaram ou até abandonaram seus planos de desenvolvimento da energia nuclear. De acordo com o estudo de Philseo Kim (2024) e colaboradores, os principais fatores que dificultam o crescimento da energia nuclear são os acidentes ocorridos na indústria, como os desastres de Three Mile Island e Chernobyl, além de mudanças políticas e de liderança nos países. Os autores também destacam que tipos de regimes políticos, como democracias e tiranias, bem como a baixa demanda por energia, são fatores que influenciam a decisão de países em adotar ou não a energia nuclear. No entanto, esses fatores não estão diretamente relacionados a falhas nas usinas nucleares em si, mas sim ao contexto histórico e político de cada país.

1.6 Aspectos Políticos e Regulatórios na Implementação de Usinas Nucleares

A implementação de usinas nucleares em diferentes países envolve complexas regulamentações, que variam de acordo com as leis e políticas internas. No contexto brasileiro, a Lei McMahon, de 1946, nos Estados Unidos, foi uma das primeiras legislações a restringir o acesso de outros países à tecnologia nuclear, especialmente para evitar que nações rivais, como a União Soviética, tivessem acesso a tecnologias avançadas. Além disso, as regulamentações que regem o funcionamento das usinas nucleares incluem a proibição da instalação de reatores com objetivos bélicos e a preocupação com a emissão de gases que

contribuem para o efeito estufa, como destacado no texto "Uma Breve História da Política Nuclear Brasileira", de Renato Kuramoto e colaboradores.

1.7 Eventos Relevantes no Setor Nuclear (1960-2000)

Entre 1960 e 2000, o setor nuclear experimentou uma série de eventos significativos, tanto benéficos quanto prejudiciais. Destacam-se os acidentes de Three Mile Island (1979), nos Estados Unidos, e o desastre de Chernobyl (1986), na Ucrânia, que geraram um estigma duradouro sobre a energia nuclear e impactaram negativamente o crescimento do setor. Por outro lado, um avanço importante foi a assinatura do Tratado de Não-Proliferação de Armas Nucleares (NPT) em 1968, que contou com a adesão dos Estados Unidos, Reino Unido, União Soviética e 45 outras nações, com o objetivo de limitar a proliferação de armas nucleares. Além disso, em 1982, iniciou-se a operação da primeira usina nuclear brasileira, a Angra 1, marcando um importante passo no desenvolvimento da energia nuclear no país.

1.8 A cronologia de desenvolvimento nuclear dos últimos 20 anos

1.8.1 2004-2008: Expansão e Inovação

Entre 2004 e 2008, a China anunciou planos para a construção de 30 novas usinas nucleares, destacando-se como líder global nesse setor, com a capacidade instalada atingindo 6 GW até 2008 (XU *et al.*, 2010). O início da construção da usina de Tianwan, em parceria com a Rússia, ocorreu em 2005, seguido pela expansão da usina Qinshan em 2007 (LI *et al.*, 2011). Nesse período, as pesquisas sobre reatores de quarta geração foram iniciadas, com avanços significativos em reatores rápidos na França e em reatores de alta temperatura na Alemanha (KIM *et al.*, 2015). A colaboração internacional em reatores de água supercrítica teve início em 2007, com progressos notáveis em pequenos reatores modulares até 2008 (SMITH, 2016).

No âmbito da não proliferação, novos acordos foram assinados na ONU em 2004, e discussões sobre desarmamento no Tratado de Não Proliferação (TNP) ocorreram em 2005 (BROWN, 2010). As preocupações ambientais também ganharam destaque, com estudos sobre os impactos da energia nuclear e debates sobre gestão de resíduos (GARCIA, 2013).

No Brasil, as discussões sobre novas usinas nucleares e a expansão do Programa Nuclear Brasileiro começaram em 2005, com foco na segurança e sustentabilidade (SILVA *et al.*, 2012).

1.8.2 2009-2013: Impactos do Acidente de Fukushima e Retomada da Energia Nuclear

O acidente de Fukushima em 2011 provocou uma revisão das políticas nucleares em muitos países, levando a Alemanha a decidir pelo fechamento de suas usinas nucleares (MÜLLER, 2012). Em contrapartida, a América do Norte anunciou novos projetos nucleares, como a usina de Vogtle, na Geórgia (HARRIS, 2013). O período também foi marcado por um ressurgimento no desenvolvimento de reatores de quarta geração e novos acordos de segurança nuclear, além do crescimento do movimento anti-nuclear, especialmente na Alemanha e na Áustria (WATERS, 2014).

No Brasil, a construção de Angra 3 avançou, e o governo revisou seu Programa Nuclear, buscando parcerias internacionais (COSTA, 2015).

1.8.3 2014-2023: Reformas e Inovações Tecnológicas

Após o acidente de Fukushima, houve um aumento nas medidas de segurança nuclear, com a AIEA promovendo novas diretrizes em 2015 (JONES, 2016). Protocolos de segurança se tornaram mais rigorosos globalmente até 2019 (THOMPSON, 2019). O desenvolvimento de tecnologias inovadoras, como reatores modulares pequenos e pesquisa em fusão nuclear, avançou significativamente, com colaborações em reatores de alta temperatura emergindo em 2021 (EVANS, 2020).

A descarbonização também ganhou destaque, com relatórios da ONU ressaltando a importância da energia nuclear na matriz energética (UN, 2021); No Brasil, as discussões sobre Angra 3 continuaram, e o governo buscou expandir seu programa nuclear, firmando novas parcerias para tecnologia nuclear (RODRIGUES, 2022).

Dessa forma o período de 2004 a 2023 foi caracterizado por avanços significativos na tecnologia nuclear, adaptação a novos desafios de segurança e um crescente reconhecimento da energia nuclear como uma solução para questões climáticas e energéticas, tanto no Brasil quanto globalmente.

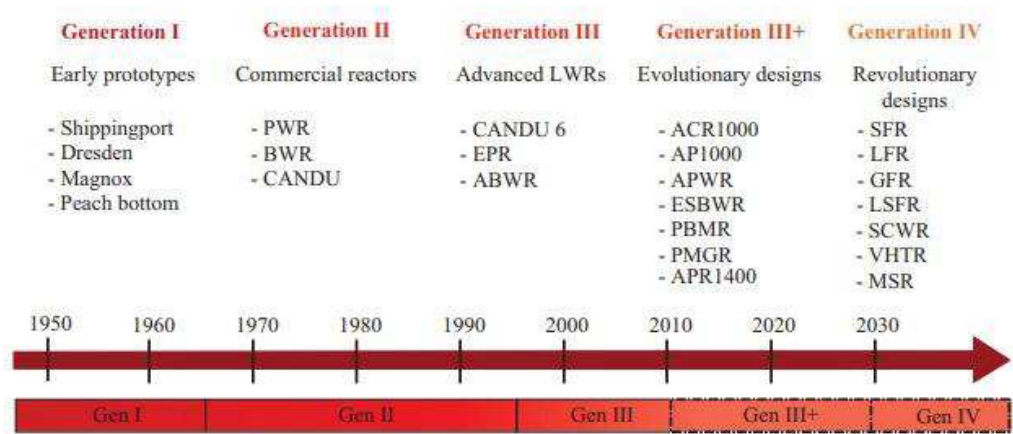
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Definição de Reatores Nucleares

Reatores nucleares são dispositivos capazes de iniciar e controlar uma série de fissões nucleares auto-sustentáveis. Esses reatores desempenham um papel fundamental em diversas áreas, sendo utilizados tanto em ferramentas de pesquisa, como sistemas para a produção de isótopos radioativos, quanto como fontes de energia para usinas nucleares (WADE, SPINRAD, 2024).

Ao longo dos anos, diferentes modelos de reatores nucleares foram desenvolvidos e aprimorados, com melhorias significativas resultantes do avanço de tecnologias em várias áreas, como a engenharia nuclear, a engenharia de materiais, a engenharia mecânica, entre outras.

A seguir, apresenta-se uma tabela com alguns modelos e gerações de reatores de potência, destacando as principais características e desenvolvimentos ao longo do tempo:



(Tabela retirada de *Nuclear Systems Volume I: Thermal Hydraulic Fundamentals, Third Edition* - Neil E. Todreas e Mujid S. Kazimi)

Com foco nas últimas duas décadas (2000-2020), será destacado os reatores da Geração III+ e suas contribuições e inovações tecnológicas. Dessa forma, será construído um comparativo entre os modelos mais usados atualmente (geração II e III) e os mais novos (III+ e IV).

2.2 Gerações II e III e suas contribuições

2.2.1 Geração II

A Geração II de reatores nucleares inclui modelos como o Pressurized Water Reactor (PWR), Boiling Water Reactor (BWR) e Canadian Deuterium Uranium (CANDU). De acordo com a World Nuclear Association (WNA), uma associação fundada em 1975 no Reino Unido com o objetivo de promover a energia nuclear e apoiar as empresas da indústria nuclear global, o reator mais comum encontrado ao redor do mundo é o modelo PWR, com cerca de 300 unidades operando para a produção de energia e várias centenas para propulsão marítima. O PWR pertence à classe dos Light Water Reactors (LWRs), ou Reatores de Água Leve, assim como o modelo BWR.

Os reatores de água leve (LWRs) são reatores de potência que utilizam água comum como moderador e refrigerante. No PWR, a água, sob alta pressão e temperatura, retira o calor do núcleo e o transporta para um gerador de vapor. Nesse gerador, o calor do circuito primário é transferido para um circuito secundário de menor pressão, que também contém água. A água no circuito secundário entra no gerador de vapor a uma pressão e temperatura ligeiramente abaixo do necessário para iniciar a ebulição. Ao absorver calor do circuito primário, ela se torna saturada e eventualmente ligeiramente superaquecida. O vapor gerado é, então, utilizado como fluido de trabalho em um ciclo de turbina a vapor.

No BWR, o ciclo de potência é direto: a água que passa pelo núcleo é permitida a ferver a uma pressão intermediária. O vapor saturado gerado na região do núcleo é transportado por separadores e secadores localizados dentro do vaso do reator, que promovem um estado de superaquecimento. O vapor d'água superaquecido é então usado como fluido de trabalho para acionar uma turbina a vapor.

O modelo CANDU, pertencente à classe dos Pressurized Heavy Water Reactors (PHWRs), opera de maneira semelhante ao PWR, mas utiliza água pesada (deutério) como moderador. Reatores moderados e refrigerados com água pesada podem ser abastecidos com urânio natural, oferecendo uma boa economia de nêutrons. Essa característica, especialmente o uso de urânio natural, é vantajosa em termos financeiros, pois não há a necessidade de enriquecer o urânio, o que reduz os custos de obtenção do combustível nuclear.

Veja a seguinte tabela:

Basic Features of Major Power Reactor Types

Reactor Type	Neutron Spectrum	Moderator	Coolant	Chemical Form	Fuel
					Approximate Fissile Content (All ²³⁵ U Except the Sodium-Cooled Reactors)
Water-cooled	Thermal				
PWR		H ₂ O	H ₂ O	UO ₂	3%–5% Enrichment
BWR		H ₂ O	H ₂ O	UO ₂	3%–5% Enrichment
PHWR (CANDU)		D ₂ O	D ₂ O	UO ₂	Natural

(Tabela retirada de *Nuclear Systems Volume I: Thermal Hydraulic Fundamentals, Third Edition* - Neil E. Todreas e Mujid S. Kazimi)

Segundo Wade e Spinrad (2024), durante a década de 1970, os reatores de água leve (geração II) representaram a mais nova e acessível fonte de eletricidade na maioria das partes do mundo, sendo ainda econômicos em muitos países, como Japão, Coreia do Sul, Taiwan, França e China (que, na década de 1990, iniciou um ambicioso programa de construção de usinas nucleares, quase todas utilizando tecnologia de água leve).

Ainda de acordo com Wade e Spinrad (2024), cada projeto de reator de água leve (LWR) possui suas próprias vantagens e desvantagens. Como resultado, existe um mercado econômico competitivo entre os conceitos de BWR e PWR desde a década de 1960. Por exemplo, embora haja menos componentes mecânicos no ciclo de vapor de um projeto de BWR, são necessários componentes adicionais para suportar o sistema de resfriamento de emergência do núcleo do reator. Além disso, o sistema interno do vaso do BWR é mais complexo, pois inclui bombas de recirculação internas e equipamentos complexos de separação e secagem de vapor, que não estão presentes no design do PWR. Por outro lado, embora os componentes internos do PWR sejam mais simples, uma usina de energia BWR é menor, pois não possui geradores de vapor.

2.2.2 Geração III

Os reatores da Geração III são, em sua maioria, compostos por Advanced LWRs (Reatores de Água Leve Avançados), com exceção do CANDU 6.

ABWR

O Reator Nuclear Avançado Refrigerado a Água Fervente (ABWR) é uma melhoria do antigo modelo BWR. Foi desenvolvido pela General Electric Company, em colaboração com fabricantes de reatores BWR de outros países, e resultou em várias melhorias, como



“aumento da potência térmica fornecida, introdução de bombas de refrigeração internas, reforço da blindagem de concreto e instalação de sistemas de segurança adicionais” (USP).

EPR

O European Pressurized Water Reactor (EPR) é um reator do tipo PWR. O desenvolvimento do EPR envolveu uma cooperação franco-alemã, com fornecedores como as empresas Framatome e Siemens, e operadores como Electricité de France e as principais concessionárias alemãs. O objetivo do EPR foi elevar o nível de segurança em comparação com as plantas existentes, com base em considerações determinísticas e probabilísticas, mitigando acidentes severos hipotéticos e restringindo suas consequências apenas à planta, além de gerar competitividade nos custos de geração de energia (RÜDIGER LEVERENZ; LUDWIG GERHARD; ANDREAS GÖBEL, 2004).

O EPR implementa medidas de prevenção de acidentes por meio de várias estratégias. Primeiramente, a simplificação dos sistemas de segurança resulta em um aumento da confiabilidade, utilizando um conceito com 100% de redundância. Além disso, elimina-se falhas comuns por meio da separação física e da diversificação das funções de backup para garantir a segurança. Outra medida importante é a extensão dos períodos de carência para ações dos operadores, projetando componentes, como pressurizadores e geradores de vapor, com volumes de água maiores, o que ajuda a suavizar os transientes.

CANDU 6

O design da Usina Nuclear CANDU 6, com classe de 700 MW, é uma aplicação do sistema de reator CANDU, utilizado tanto no Canadá quanto em diversos projetos de exportação. Trata-se de um APHWR (Reator Avançado de Água Pressurizada), e, segundo Kenneth R. Hedges, Peter J. Allen e Jerry M. Hopwood, as melhorias implementadas incluem: o aprimoramento da margem térmica do combustível por meio do uso de combustível CANFLEX e a melhoria do monitoramento do fluxo e da temperatura do núcleo; otimização do projeto do cofre de blindagem do reator (*shielding vault*) e do sistema para aumentar a capacidade inerente de dissipação de calor de emergência em casos de acidentes severos de dano ao núcleo; além do aprimoramento no monitoramento dos sinais do sistema de segurança, com displays digitais atualizados e aumento dos testes computadorizados para reduzir a carga operacional e melhorar a confiabilidade do sistema.

Principais Características do Ciclo Termodinâmico dos Reatores supracitados:

Characteristics	BWR	PWR	PHWR
		Reference Design	
Manufacturer	General Electric	Westinghouse	Atomic Energy of Canada, Ltd.
System (reactor station)	BWR/5 (NMP2)	(Seabrook)	CANDU 6 / Enhanced CANDU-6 (EC 6)
Steam cycle			
No. of coolant systems	1	2	2 / 2
Primary coolant	H ₂ O	H ₂ O	D ₂ O / D ₂ O
Secondary coolant	Not applicable	H ₂ O	H ₂ O / H ₂ O
		Energy Conversion	
Thermal power, MW _t	3323	3411	2180 / 2064
Electric power, MW _e	1062	1148	638 / 668
Efficiency (%)	32.0	33.7	29.3 / 32.4
		Heat Transport System	
No. of primary loops/pumps	2/2	4/4	2/2 / 2/4
No. of IHXs	0	0	0 / 0
No. of steam generators	Not applicable	4	4 / 4
Characteristics	BWR	PWR	PHWR
Steam generator type	Not applicable	U tube	U tube / U tube
		Thermal Hydraulics	
Primary coolant			CANDU 6 / Enhanced CANDU-6 (EC 6)
Pressure (MPa)	7.14	15.51	10.0 / 10.0 Outlet 11.75 / 11.7 Inlet
Inlet temp. (°C)	278.3	293.1	267 / 266
Ave. outlet temp. (°C)	286.1	326.8	310 / 310
Core flow rate (Mg/s)	13.671	17.476	7.6 / 7.7
Volume or mass	—	336 m ³	120 m ³ / 196 Mg
Secondary coolant			
Pressure (MPa)	Not applicable	6.89	4.7 / 4.7
Inlet temp. (°C)	Not applicable	227	187 / 187
Outlet temp. (°C)	Not applicable	285	260 / 260

(Tabelas retiradas de *Nuclear Systems Volume I: Thermal Hydraulic Fundamentals, Third Edition* - Neil E. Todreas e Mujid S. Kazimi)

2.3 Geração III+ e IV

Os reatores nucleares avançados, incluindo aqueles da Geração III e superiores, são caracterizados por uma série de melhorias em segurança, sustentabilidade e otimização dos processos termo-hidráulicos. Com base no livro *“Nuclear Systems 1: Thermal Hydraulic Fundamentals”*, é possível discutir a influência crítica que tais processos físicos e mecânicos exercem sobre a segurança e a eficiência dos reatores, com ênfase particular nos mais recentes modelos.

No que diz respeito às Gerações III+, em comparação com as gerações anteriores, foram implementadas diversas melhorias mecânicas e de design, resultando em reatores mais seguros e eficientes. Um exemplo significativo é o AP1000, que utiliza sistemas passivos de segurança baseados nos princípios termo-hidráulicos, empregando a gravidade e a circulação natural de água para resfriamento, dispensando a necessidade de bombas ativas. Esse conceito é fundamental para a operação de segurança do reator, uma vez que reduz a dependência de sistemas ativos que podem falhar em situações de emergência.

Outro exemplo relevante de reator da Geração III+ é o VVER-1200, um reator de água pressurizada russo, conforme descrito no livro *“The VVER Today”*. Este reator utiliza geradores de vapor avançados e métodos de resfriamento, concebidos com o conceito de “leak-before-break” em mente. Esse conceito enfatiza a vigilância rigorosa em relação a vazamentos e à resistência dos materiais empregados nos equipamentos de resfriamento do sistema. As melhorias implementadas permitem um controle mais eficaz da temperatura durante a operação normal e em situações de emergência. Para isso, os métodos de dissipação de calor, tanto passivos quanto ativos, devem operar de forma eficiente para prevenir cenários que possam resultar em acidentes graves.

A Geração IV de reatores nucleares representa a próxima fase de desenvolvimento da tecnologia nuclear. No entanto, como observado no livro *“Nuclear Systems 1: Thermal Hydraulic Fundamentals”*, ainda existem poucos dados concretos sobre esses reatores, uma vez que apenas um reator dessa geração, o HTR-PM, está em operação no mundo, localizado na China.

Entretanto, diversas propostas de reatores da Geração IV estão sendo estudadas, sendo o Sodium-Cooled Fast Reactor (SFR) uma das mais promissoras. O SFR utiliza sódio líquido como fluido resfriador, o que permite alcançar temperaturas mais altas de forma mais eficiente no núcleo do reator. De acordo com a World Nuclear Association, os SFRs operam com um “espectro de nêutrons rápidos”, cujos nêutrons possuem energias médias de 1 Mega

Volt. Esse espectro ajuda a reduzir a meia-vida dos resíduos radioativos por meio da queima de actínídeos, o que representa um avanço significativo na gestão de resíduos nucleares.

Outro exemplo significativo de reator da Geração IV é o Molten Salt Reactor (MSR), que utiliza sal derretido como fluido resfriador. Além disso, há propostas para o uso de sal fundido também como combustível. O estado líquido do núcleo aprimora as trocas termodinâmicas e oferece vantagens significativas em termos de segurança. Como destacado pela World Nuclear Association, o sal fundido pode ser utilizado como um sistema de resfriamento passivo em situações de emergência, o que contribui para aumentar a segurança do reator e reduzir os riscos em cenários de falha.

Em conclusão, outro exemplo relevante de reator da Geração IV é o Very High-Temperature Reactor (VHTR), que se destaca por operar a temperaturas superiores a 1000 °C, tornando-se o reator mais quente entre as opções da nova geração, conforme indicado no Brazilian Journal of Development. O VHTR utiliza gás hélio como fluido resfriador, substituindo a água convencionalmente usada em reatores de gerações anteriores. Essa escolha reduz significativamente os riscos de reações químicas em casos de acidente, além de proporcionar maior segurança na operação do reator.

Adicionalmente, o VHTR apresenta um potencial interessante além da geração de energia elétrica. De acordo com o mesmo estudo, suas altas temperaturas tornam o reator adequado para aplicações hipotéticas na produção de hidrogênio, um combustível que pode desempenhar um papel crucial na promoção da sustentabilidade das energias renováveis. Esse aspecto multifuncional do VHTR oferece uma perspectiva inovadora para o futuro da energia nuclear e suas contribuições para uma matriz energética mais limpa.

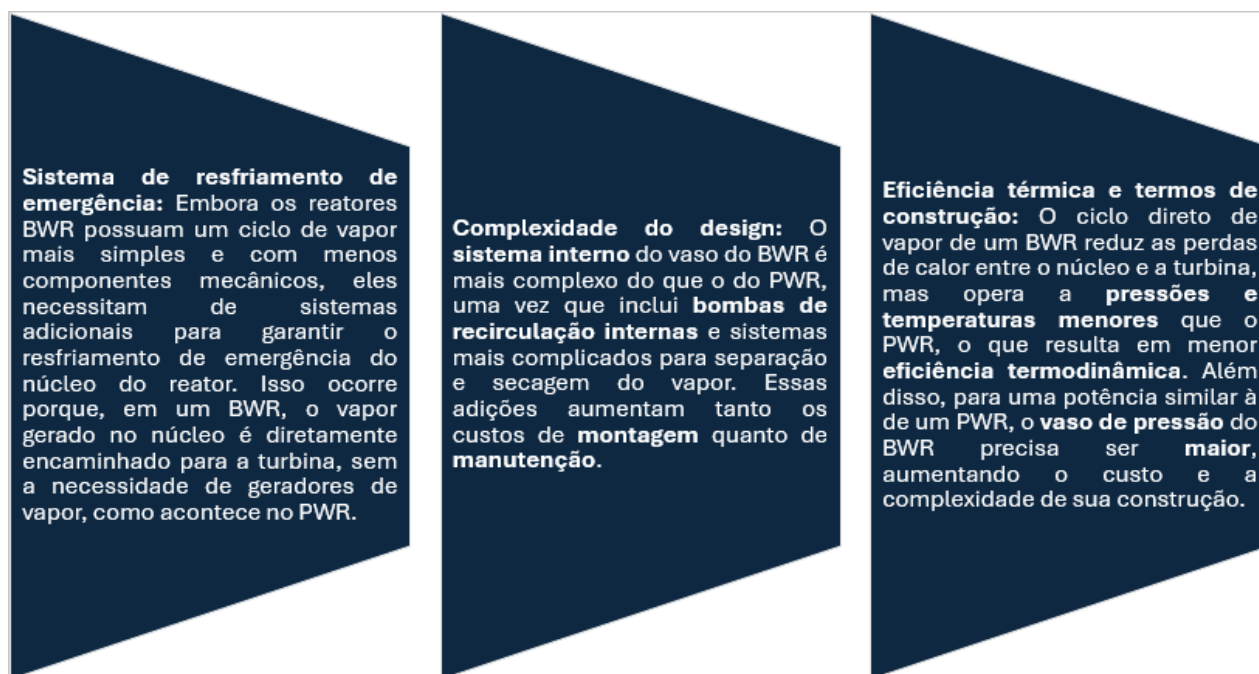
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Dificuldades enfrentadas pelas Gerações de Reatores Anteriores (Gen II e III) e Estigma Associado à Possível Contaminação do Meio Ambiente (Segurança)

Os reatores nucleares, como qualquer projeto de engenharia, enfrentaram uma série de dificuldades técnicas que precisavam ser resolvidas para garantir uma operação segura e eficiente. Muitas dessas dificuldades permaneceram ao longo das gerações de reatores e só foram superadas ou minimizadas nas gerações mais modernas (Gen. III+ e IV).

Reatores de Água Leve (LWR): Entre os principais tipos de reatores das gerações anteriores, destacam-se os Reatores de Água Pressurizada (PWR) e os Reatores de Água

Fervente (BWR). Esses modelos, apesar de terem sido fundamentais para a expansão da energia nuclear nas décadas passadas, apresentavam desafios técnicos em várias áreas:



Essas e outras dificuldades técnicas foram fatores que motivaram o desenvolvimento das gerações seguintes de reatores, que incorporaram soluções para melhorar a segurança, a eficiência térmica e a redução de custos operacionais.

3.2 Estigma Associado à Energia Nuclear

3.2.1 Origem do Estigma

O medo em relação à energia nuclear tem raízes históricas profundas e, em grande parte, é alimentado por eventos traumáticos que marcaram o uso da tecnologia no século XX. Esse medo foi, em grande parte, impulsionado pela percepção de que a energia nuclear representa um risco imenso e incontrolável, tanto para as pessoas quanto para o meio ambiente.

O histórico de acidentes nucleares, especialmente durante a Guerra Fria e a era pós-Guerra, contribuiu substancialmente para o estigma relacionado à energia nuclear. Os eventos de Hiroshima e Nagasaki (1945), que mostraram ao mundo o devastador poder das armas nucleares, criaram uma ligação imediata entre radiação e destruição em massa, com efeitos psicológicos duradouros em toda a sociedade.

Nos anos seguintes, durante as décadas de 1950 e 1960, a energia nuclear foi vista como uma solução potencial para a geração de energia, mas o medo público ressurgiu com o agravamento da Guerra Fria e especialmente com a crise dos mísseis de Cuba (1962), que levou a uma maior conscientização sobre os riscos nucleares. O acidente de Three Mile Island (EUA, 1979) e o desastre de Chernobyl (URSS, 1986) marcaram a opinião pública de forma indelével, intensificando o estigma em relação ao uso pacífico da energia nuclear. Além disso, o acidente de Fukushima (2011) ainda reverbera, intensificando o medo da contaminação ambiental e radiação.

3.2.2 Impacto Psicológico dos Acidentes

O acidente de Chernobyl, em particular, foi um evento marcante que deixou uma marca profunda na opinião pública mundial. O impacto da radiação e as consequências psicológicas duradouras, como medo, ansiedade, desespero e trauma, são sentidas até hoje pelas populações afetadas. De acordo com a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), as consequências de Chernobyl não se limitaram apenas à radiação em si, mas também ao medo excessivo que se espalhou pelas populações, exacerbado pela falta de conhecimento e pela má comunicação sobre os riscos reais.

A percepção pública da energia nuclear é frequentemente alimentada pela falta de conhecimento e desinformação, o que resulta em uma desconfiança generalizada sobre a segurança dos reatores nucleares. Muitas pessoas percebem a energia nuclear como uma tecnologia de alto risco e difícil controle, especialmente após o histórico de acidentes.

3.2.3 Resposta da Comunidade Científica e Educacional

Para lidar com o estigma e a desconfiança pública, investimentos significativos em segurança e transparência têm sido feitos. A Associação Brasileira para o Desenvolvimento de Atividades Nucleares (ABDN), por exemplo, tem trabalhado no aperfeiçoamento da infraestrutura das usinas nucleares brasileiras, promovendo treinamento especializado e implementando protocolos rigorosos de segurança. A ideia é não apenas reduzir os riscos de acidentes, mas também aumentar a confiança pública.

Além disso, a IAEA tem promovido campanhas educacionais para aumentar a transparência do setor nuclear. Essas campanhas têm como objetivo esclarecer a população

sobre as medidas de segurança e as tecnologias utilizadas para garantir a operação segura dos reatores nucleares, dissipando os mitos e receios infundados sobre a radiação e seus efeitos.

A comunicação aberta e o acesso a informações claras e confiáveis são fundamentais para combater a desinformação e reduzir o estigma associado à energia nuclear. Quando o público tem acesso a informações precisas sobre os riscos reais e as soluções adotadas para mitigá-los, a confiança nas tecnologias nucleares tende a aumentar.

3.3 Tecnologias Desenvolvidas para Resolução de Problemas e Garantia de Segurança nas Novas Gerações de Reatores (Gen III, III+)

As novas gerações de reatores nucleares (Gen III e III+) incorporam tecnologias avançadas que visam resolver os problemas técnicos das gerações anteriores e garantir um nível de segurança mais elevado. Entre as principais inovações estão os sistemas passivos de segurança, que não dependem de energia elétrica ou sistemas mecânicos ativos para garantir o resfriamento do reator. Isso reduz o risco de falhas humanas ou mecânicas, já que os reatores são projetados para operar de maneira autossustentável em situações de emergência.

Outro avanço importante são os sistemas de resfriamento passivo, como no modelo AP1000, que utiliza gravidade e circulação natural de água para transferir o calor do reator sem a necessidade de bombas de resfriamento ativas. Esse design inovador melhora a segurança e a confiabilidade do reator, tornando-o mais resiliente a falhas externas.

3.4 Aplicação das Novas Tecnologias na Indústria e Seus Benefícios para a Garantia de Segurança e Redução do Estigma Nuclear

As tecnologias mais recentes não só melhoram a segurança dos reatores nucleares, mas também podem ser aplicadas em outras indústrias e áreas da sociedade. Por exemplo, os avanços no monitoramento remoto e inteligência artificial aplicados em usinas nucleares podem ser adaptados para outros setores industriais, melhorando a eficiência e a segurança em geral.

Além disso, a utilização de tecnologias de resfriamento passivo pode ser aplicada em sistemas industriais de alta temperatura, ajudando a reduzir o risco de falhas térmicas e melhorando a sustentabilidade de processos industriais.

Com o contínuo aperfeiçoamento das tecnologias nucleares e a transparência na comunicação sobre segurança, é possível reduzir gradualmente o estigma associado à energia

nuclear e mostrar que, com a aplicação de tecnologias avançadas, ela pode ser uma fonte de energia segura e eficiente para o futuro.

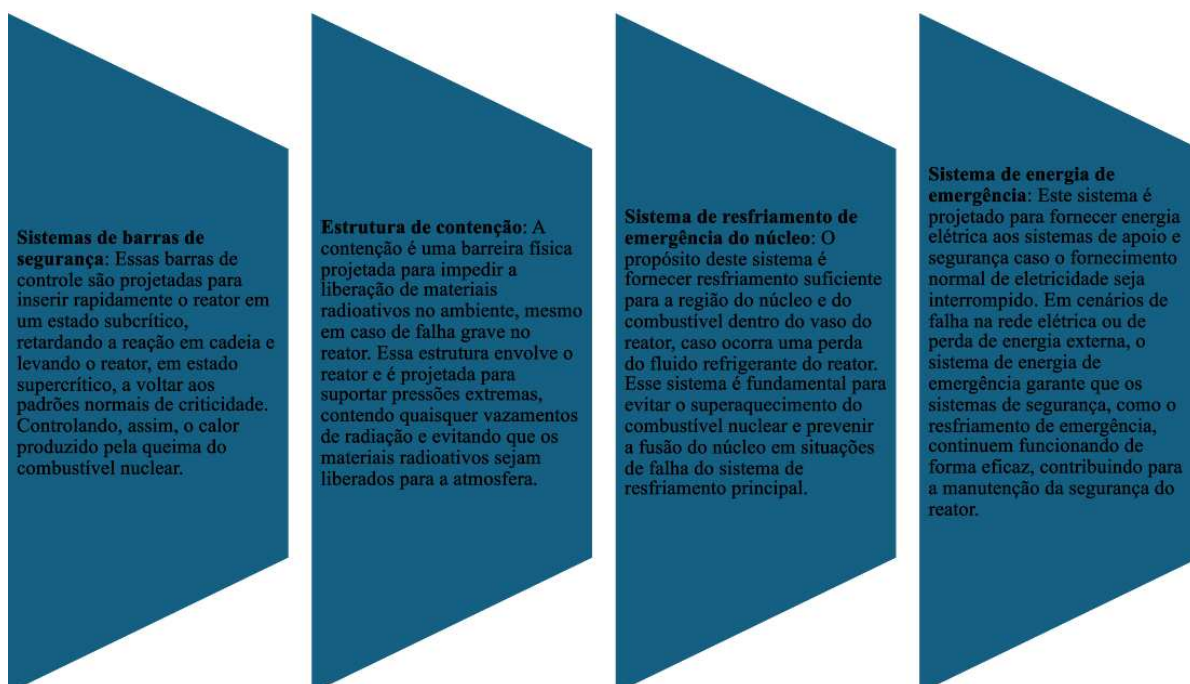
3.5 O Estudo de Segurança de Reatores (inovações a aplicações)

4.1 Introdução à Segurança dos Reatores Nucleares

O setor da energia nuclear é um dos mais regulamentados entre os setores industriais, devido à importância da operação segura das usinas nucleares (NPPs) ao longo de todo o seu ciclo de vida. Conforme destacado por GUIMARÃES, Leonam dos Santos (2016), essa regulamentação visa garantir que todos os processos, desde a construção até a desativação de uma usina, atendam aos mais rigorosos padrões de segurança. O objetivo é minimizar os riscos de acidentes e proteger tanto a população quanto o meio ambiente. Para garantir a operação segura, as comunidades de pesquisa nuclear, os operadores e os órgãos de licenciamento estão comprometidos com o estudo contínuo da segurança dos projetos atuais e futuros das usinas nucleares (NPPs).

3.6 Medidas de Mitigação e Sistemas de Segurança

Como consequência dos estudos contínuos sobre segurança, foram formuladas medidas de mitigação, também chamadas de sistemas de segurança. Segundo Zeng *et al.* (2016), esses sistemas e estruturas têm como objetivo impedir que os acidentes em reatores nucleares se agravem, evitando consequências catastróficas no caso de sua ocorrência. As principais medidas de segurança incluem:



3.7 Reatores Avançados (Gerações III e III+)

De acordo com Todreas e Kazimi (2012), os reatores avançados (Gerações III e III+) representam uma evolução significativa em relação aos modelos anteriores, com melhorias notáveis em termos de segurança e eficiência operacional. A principal característica desses reatores é a incorporação de tecnologias mais modernas e robustas, com o intuito de reduzir os riscos de acidentes, aumentar a eficiência na produção de energia e melhorar a economia de operação. Estes reatores podem ser classificados em duas categorias principais:

Reatores Avançados (Gerações III e III+)**4.3.1-Designs com Sistemas de Segurança Ativamente Acionados**

Esses reatores utilizam sistemas de segurança que dependem de fontes externas de energia, como eletricidade, para garantir a operação dos mecanismos de segurança. São melhorias evolutivas em relação aos reatores existentes, aprimorando aspectos como confiabilidade e eficiência dos sistemas operacionais e de segurança. Exemplos incluem o European Pressurized Reactor (EPR), o Advanced Pressurized Water Reactor (APWR) e o Advanced Boiling Water Reactor (ABWR).

4.3.2-Designs com Sistemas de Segurança Passivos

Os reatores com sistemas de segurança passivos incorporam características que dependem de forças naturais, como gravidade, condução térmica e válvulas ativadas por descarga explosiva. A utilização desses sistemas passivos reduz a necessidade de intervenção ativa em emergências, proporcionando maior segurança e robustez, pois não depende de fontes externas de energia ou de intervenções manuais. Exemplos incluem o **Advanced Passive 1000 (AP1000)**, o **Advanced Canadian Deuterium Uranium Reactor (ACR-1000)** e o **Economic Simplified Boiling Water Reactor (ESBWR)**.

3.8 Reatores de Geração IV e Inovações no Design

Embora a Geração IV de reatores ainda não tenha sido efetivamente implementada, há melhorias significativas sendo discutidas para o Reator Rápido Resfriado a Gás (GFR). Segundo Mikityuk *et al.* (2023), uma das questões em aberto relacionadas à remoção de calor residual em condições de acidente está sendo resolvida com o desenvolvimento de soluções inovadoras. O objetivo é eliminar praticamente os acidentes severos, e para isso, foi formulado um design inovador para o núcleo do reator. Esse design incorpora o uso de métodos diversificados para o desligamento passivo do reator, juntamente com sistemas passivos para remoção de calor de decaimento e reestruturação dos sistemas de instrumentação.

Essas abordagens visam garantir que, mesmo em casos de falha dos sistemas ativos, o reator continue operando de forma segura, sem risco de superaquecimento ou liberação de radiação para o ambiente.

4 METODOLOGIA

O presente estudo foi desenvolvido por meio de uma pesquisa bibliográfica, que consistiu em uma revisão da literatura especializada relacionada ao tema das tecnologias de segurança em reatores nucleares. A revisão bibliográfica envolveu a consulta a diversas fontes, incluindo livros, artigos de periódicos, publicações científicas, sites especializados e outras fontes relevantes.

A revisão bibliográfica, conforme descrito por Sousa et al. (referência), consiste no levantamento e análise crítica de obras publicadas relacionadas à teoria que orienta o desenvolvimento de um trabalho científico. Este processo exige dedicação do pesquisador, com o objetivo de reunir e examinar textos relevantes que fundamentam a pesquisa. Nesse sentido, a revisão contribui para o embasamento teórico do estudo, promovendo uma análise aprofundada das questões relacionadas à segurança dos reatores nucleares.

O objetivo geral da revisão bibliográfica foi analisar e expor as novas tecnologias de segurança aplicadas aos reatores nucleares. Para tanto, os objetivos específicos foram definidos como segue:

1. Revisão e Problemática das Tecnologias de Segurança Nuclear dos Reatores de Geração II e III: Esta etapa consistiu na análise das tecnologias de segurança empregadas nos reatores nucleares das gerações II e III, destacando os principais desafios e avanços dessas tecnologias.
2. Apresentação das Novas Tecnologias de Segurança para Reatores de Geração III+ e IV: O foco dessa etapa foi examinar as inovações tecnológicas desenvolvidas nos últimos 20 anos para os reatores das gerações III+ e IV, explorando suas vantagens e os benefícios que essas novas tecnologias oferecem para a segurança da operação desses reatores.

A metodologia utilizada, por meio da revisão sistemática da literatura, permitiu um levantamento abrangente das principais tecnologias de segurança nuclear, contribuindo para uma análise crítica e atualizada sobre os avanços no campo da energia nuclear e suas implicações para a segurança operacional das usinas.

Segundo Botucatu (2015), a “revisão sistemática” é um tipo de investigação científica. Essas revisões são consideradas estudos observacionais retrospectivos ou estudos experimentais de recuperação e análise crítica da literatura.

Também, segundo um trabalho publicado pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), intitulado Revisão bibliográfica sistemática (2020), a revisão sistemática é uma ferramenta usada para resumir, avaliar e comunicar os resultados e as implicações de uma grande quantidade de pesquisas e informações.

A coleta de dados para o presente estudo foi realizada por meio da pesquisa bibliográfica, com base em uma ampla gama de artigos científicos, livros e publicações especializadas, que tratam dos diversos aspectos da segurança e evolução da energia nuclear. A análise dos dados coletados seguiu uma abordagem qualitativa, com a interpretação crítica dos textos, buscando identificar e organizar os principais tópicos e avanços na área.

4.1 Mecanismos Básicos e Crescimento da Indústria Nuclear

Os dados coletados sobre os mecanismos de funcionamento da produção de energia nuclear e a criação de combustíveis nucleares foram analisados a partir do artigo de Chunkai, Zheng, Furong e Xu. Além disso, a evolução da indústria nuclear, especialmente após os incidentes de Fukushima, foi detalhada por Zeng Ming e Liu Yingxin, que apresentam previsões para o futuro da área. Hosam Elhegazy e Mariam Kamal discutem os principais desafios enfrentados pela indústria, ao passo que Ian Hore-Lacy, o Departamento de Energia dos EUA e Joaquim F. C. abordam a história da energia nuclear, suas aplicações e preocupações com a segurança ambiental e a saúde pública. Outro aspecto explorado foram as razões políticas e militares que afetam o desenvolvimento das indústrias nucleares em novos países, conforme discutido por Philseo Kim, Hanna Yasmine *et al.*, além da física por trás dos reatores nucleares, como apresentada por John Tabak.

4.2 Funcionamento dos Reatores e Inovações Tecnológicas

A análise dos dados relacionados ao funcionamento termo-hidráulico dos núcleos de reatores foi realizada com base nos trabalhos de Neil Todreas e Mujid Kazimi, bem como no artigo de Wade Marcum e Bernard Spinrad, que discutem a otimização do processo de transferência de fluidos e calor no núcleo do reator. A evolução das gerações de reatores, com ênfase nas gerações III+ e IV, foi discutida pela World Nuclear Association, que também apresentou os impactos globais da energia nuclear. O detalhamento do design e da montagem de reatores foi analisado com base em textos da USP. Outras inovações, como o reator CANDU 6TM de Geração 3, e o European Pressurized Water Reactor, foram exploradas em

artigos de S. Azeez, P. Dick, J. Hopwood, Rüdiger Levernz, Ludwig Gerhard e Andreas Göbel, fornecendo uma visão detalhada sobre a evolução desses sistemas. A análise da demanda global por energia nuclear foi enriquecida pelos estudos de Liu Zhan, Yang Bo, Tian Lin e Zhang Fan, bem como por Mark Ho, Edward Obbard et al. A Rosatom apresentou dados sobre a criação e evolução do reator VVER, enquanto a World Nuclear Association forneceu informações sobre os Molten Salt Reactors e os Fast Neutron Reactors, destacando suas características de eficiência e funcionamento.

4.3 Desafios e Impactos na Indústria Nuclear

A coleta de dados também incluiu a análise de publicações que abordam o medo nuclear e as percepções da população em relação à energia nuclear. Leonam S. Guimarães discute a formação do medo nuclear, suas causas históricas e as teorias sobre como lidar com desastres nucleares. Além disso, Monideo Dey explora a evolução das normas de segurança estabelecidas pela International Organization of Standardization para prevenir incêndios nas plantas nucleares. O problema do descarte de combustível nuclear, abordado por Leonam Guimarães, foi analisado à luz dos desafios técnicos e ambientais que envolvem a presença de isótopos radioativos. A Associação Brasileira para Desenvolvimento de Atividades Nucleares (ABDN) discute o impacto dos custos focados em segurança energética no Brasil, além dos investimentos feitos nas usinas de Angra para melhorar sua infraestrutura. O artigo da International Atomic Energy Agency (IAEA) explora os impactos do acidente de Chernobyl, suas repercussões e o impacto na saúde pública.

4.4 Avanços na Mitigação de Acidentes e Tecnologias Emergentes

A coleta de dados sobre os avanços na mitigação de acidentes nucleares foi aprofundada por meio da análise de estudos de Marat Margulis e Arshad Ali, que discutem os Zero Power Reactors e a mitigação de acidentes envolvendo a liberação de isótopos na atmosfera. Krzysztof Palmi, Wojciech Kubinski *et al.* investigam a utilização de Redes Neurais Artificiais para prever o comportamento de componentes de reatores e prevenir falhas. Além disso, a aplicação de Inteligência Artificial para otimizar os recursos e atender à demanda energética foi abordada por Martin Hjelmeland, Jonas Kristiansen et al. A análise também incluiu os estudos de Wade Marcum e Bernard Spinrad, que discutem a segurança dos reatores, exemplificando falhas passadas e as linhas de ação corretas para prevenir

acidentes. Finalmente, Konstantin Mikityuk, Miguel Ferreira *et al.* abordaram os benefícios energéticos e de segurança dos reatores de Geração 4, fornecendo um panorama das inovações mais recentes nesse campo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os avanços tecnológicos na engenharia nuclear nas últimas décadas consolidaram a energia nuclear como uma solução essencial para enfrentar desafios energéticos e climáticos globais. As inovações nas gerações III+ e IV de reatores nucleares mostram um compromisso claro com a segurança, a eficiência e a sustentabilidade. Tecnologias como os sistemas passivos de resfriamento e o uso de fluidos como sódio e sal fundido demonstram a busca contínua por designs mais seguros e resilientes. A integração de novas abordagens termo-hidráulicas e mecânicas e mecânicas destaca a relevância da engenharia nuclear como um campo em constante evolução para atender às demandas do século XXI.

Apesar dos avanços, o estigma associado à energia nuclear persiste como uma barreira significativa. Eventos como os acidentes de Chernobyl e Fukushima impactaram a percepção pública, associando a tecnologia nuclear a riscos incontroláveis. No entanto, as iniciativas educacionais e de transparência promovidas por organizações como a IAEA e associações nacionais têm mostrado eficácia em reverter essa narrativa. A comunicação clara sobre os benefícios da energia nuclear e o aprimoramento das tecnologias de segurança têm sido cruciais para dissipar o medo e aumentar a aceitação pública.

Para elaborar uma conclusão eficaz em artigos científicos, é importante resumir os principais achados do trabalho, relacioná-los aos objetivos inicialmente propostos e destacar as contribuições para o campo de estudo, além de apontar possíveis limitações e sugestões para pesquisas futuras. Segundo Creswell, em seu livro “Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches”, uma conclusão bem estruturada reforça a relevância do estudo e oferece um fechamento lógico, vinculando os resultados às implicações práticas e teóricas discutidas ao longo do texto.

REFERÊNCIAS

ALI, A. M; KAKOSIMOS, K. E. A receptor-centric decision support system for the mitigation of nuclear power atmospheric release incidents. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 238, 2023.

ALVES DE ANDRADE, D. *et al.* Very high temperature reactor (VHTR) - A proposal to generation IV reactors. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 8, n. 3, pP. 17576-17588, mar. 2022. DOI: 10.34117/bjdv8n3-139.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA O DESENVOLVIMENTO DE ATIVIDADES NUCLEARES. O custo da segurança energética.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA O DESENVOLVIMENTO DE ATIVIDADES NUCLEARES (ABDNAN). Investimentos de R\$ 300 milhões garantem ainda mais segurança às usinas de Angra.

AZEEZ, S.; DICK, P.; HOPWOOD, J. **The Enhanced CANDU 6™ Reactor** - Generation III CANDU Medium Size Global Reactor. 2024.

BROWN, T. International Non-Proliferation Agreements: Progress and Challenges. **Journal of Nuclear Policy**, 12(3), pp. 45-60, 2010.

CARVALHO, J. F. **O espaço da energia nuclear no Brasil**. 23 abr. 2012. IEE/USP.

CHUNKAI, Z.; XU, Furong. Nuclear Science in the 20th Century: Nuclear Energy and Nuclear Weapons. [s.n.], [s.d.].

COSTA, A. O Futuro do Programa Nuclear Brasileiro. **Revista Brasileira de Energia**, 20(2), pp. 78-85, 2015.

DEY, Monideep. Assuring fire safety in nuclear plants with international standards. **Nuclear Engineering and Design**, v. 428, 2024.

ELETRONUCLEAR; ELETROBRAS. **Nuclear power in Brazil and Latin America**.

ELHEGAZY, H; KAMAL, M. **Implementing nuclear power plants (NPPs): state of the art, challenges, and opportunities**. 2018.

EVANS, R. Innovations in Small Modular Reactors. **Energy Journal**, 34(1), pp. 99-112, 2020.

FERMI, E. Biographical. In: NOBEL LECTURES, Physics 1922-1941. **Amsterdam: Elsevier Publishing Company**, 1965.

FUHRMANN, M. Splitting atoms: Why do countries build nuclear power plants? Texas A&M University, Department of Political Science, College Station, TX 77843-4348, 2106 Allen Building, 4348 **TAMU**, United States.

GARCIA, M. Environmental Impacts of Nuclear Energy: **A Review**. Environmental Science & Policy, 18, pp. 14-22, 2013.

GUIMARÃES, L. S. **O retorno ao mito da caverna nuclear**. 2015.

GUIMARÃES, L. S. **Estratégias de aceitação pública da geração elétrica nuclear**. set. 2016.

GUIMARÃES, L. S. **Futuro tecnológico da geração elétrica nuclear.**

GUIMARÃES, L. S. **O medo nuclear.** Fundação Getulio Vargas, 2016.

GUIMARÃES, L. Gerenciamento do combustível nuclear usado. **ABDAN.**

HARRIS, L. Nuclear Renaissance in North America: New Projects and Policies. **Nuclear Energy Review**, 22(4), pp. 56-68, 2013.

HEDGES, K. R.; ALLEN, P. J.; HOPWOOD, J. M. CANDU 6 - The Highly Successful Medium Sized Reactor. **AECL** (Atomic Energy of Canada Limited), 2024.

HJELMELAND, M *et al.* The role of nuclear energy and baseload demand in capacity expansion planning for low-carbon power systems. **Applied Energy**, v. 377, Part A, 2024.

HO, M; OBBARD, E; BURR, P. A.; YEOH, Guan. A review on the development of nuclear power reactors. **Energy Procedia**, v. 160, pp. 459-466, 2019.

HORE-LACY, I. Nuclear Energy in the 21st Century. **World Nuclear University Press**, 2008.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **Frequently asked Chernobyl questions.** 2024.

JONES, P. The Role of the IAEA in Global Nuclear Security. **International Security Studies**, 15(1), pp. 23-34, 2016.

KIM, P.; Y, H.; YIM, M. S.; CHIRAYATH, S. S. Challenges in nuclear energy adoption: Why nuclear energy newcomer countries put nuclear power programs on hold? **Nuclear Engineering and Technology**, 56(4), pp. 1234-1243, 2024.

KIM, S. *et al.* Advances in Fourth Generation Nuclear Reactor Technologies. **Nuclear Technology**, 189(2), pp. 230-245. 2015.

LEVERENZ, R.; GERHARD, L.; GÖBEL, A. The European Pressurized Water Reactor: A Safe and Competitive Solution for Future Energy Needs. **Framatome ANP GmbH**. 2024.

LI, X. *et al.* **Nuclear Power Development in China:** Progress and Challenges. **Energy Policy**, 39(10), pp. 6608-6616, 2011.

LIU, Z *et al.* Development and outlook of advanced nuclear energy technology. **Energy Strategy Reviews**, v. 34, 2021.

MARGULIS, M. Zero power reactors in support of current and future nuclear power systems. **Nuclear Engineering and Design**, v. 425, 2024.

MIKITYUK, K *et al.* Review of Euratom projects on design, safety assessment, R&D and licensing for ESNII/Gen-IV reactor systems. **EPJ - Nuclear Sciences & Technologies**, v. 9, 2023.

MÜLLER, J. **Germany's Nuclear Exit: Policy and Perspectives**. *Energy Policy*, 49, pp. 301-309, 2012.

MURAKAMI, T. A historical review and analysis on the selection of nuclear reactor types and implications to development programs for advanced reactors. A Japanese study. **Energy Reports**, v. 7, 2021.

PALMI, K; KUBIŃSKI, W; DARNOWSKI, P. Prediction of the evolution of the nuclear reactor core parameters using artificial neural network. **Annals of Nuclear Energy**, v. 211, 2024.

RODRIGUES, J. The Expansion of Brazil's Nuclear Program: Recent Developments. **Brazilian Journal of Energy**, 25(3), pp. 90-101, 2022.

ROSATOM. **The VVER today**.

SILVA, R. et al. Nuclear Energy and Sustainability in Brazil: Current Challenges. **Journal of Sustainable Energy**, 18(2), pp. 45-60, 2012.

SMITH, D. Collaborative Efforts in Nuclear Research: The Role of International Partnerships. **Nuclear Science and Engineering**, 182(1), pp. 25-38, 2016.

SPINRAD, Bernard I.; MARCUM, Wade. The Editors of Encyclopaedia Britannica. Nuclear reactor. **Encyclopaedia Britannica**, 2024.

TABAK, J. **Nuclear Energy**. 2009.

THOMPSON, G. **Global Nuclear Security Protocols: A New Era**. *Nuclear Security Journal*, 5(1), pp. 12-28, 2019.

TODREAS, N. E.; KAZIMI, M. S. **Nuclear Systems**. Volume I: Thermal Hydraulic Fundamentals. Third Edition.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **The history of nuclear energy**.

UN. The Role of Nuclear Energy in Achieving Climate Goals. **United Nations Environment Programme**. 2021.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Reatores nucleares de potência**. 2024.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP). **Tipos de revisão de literatura**. Botucatu, 2015.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO (UFRRJ). **Revisão bibliográfica sistemática**. 2020.

WATERS, K. **The Rise of the Anti-Nuclear Movement: Trends and Implications**. *Environmental Politics*, 23(4), pp. 598-615, 2014.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. **Nuclear power reactors.**

XU, J. *et al.* **China's Nuclear Energy Development:** Current Status and Future Prospects. *Nuclear Energy Journal*, 28(2), pp. 78-90, 2010.

ZENG, M *et al.* Nuclear energy in the Post-Fukushima Era: Research on the developments of the Chinese and worldwide nuclear power industries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, pp. 147-156, 2016.

Como Referenciar este Artigo, conforme ABNT:

MAGALHÃES JÚNIOR, M. C; BARRETO, J. P. V. A; SALEM, A. V. L; FERREIRA, M. P. Uma Breve Revisão Sobre as Tecnologias de Segurança de Reatores Nucleares. **Rev. FSA**, Teresina, v. 22, n. 6, art. 6, p. 108-134, jun. 2025.

Contribuição dos Autores	M. C. Magalhães Júnior	J. P. V. A. Barreto	A. V. L. Salem	M. P. Ferreira
1) concepção e planejamento.	X	X	X	X
2) análise e interpretação dos dados.	X	X	X	X
3) elaboração do rascunho ou na revisão crítica do conteúdo.	X	X	X	X
4) participação na aprovação da versão final do manuscrito.	X	X	X	X