

**MARINHA DO BRASIL
DIRETORIA DE ENSINO DA MARINHA
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE ALEXANDRINO**

**CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM
TECNOLOGIA NUCLEAR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**NOVAS TECNOLOGIAS DE COMBUSTÍVEIS NUCLEARES PARA REATORES DA
GERAÇÃO IV: Os desafios do futuro da Energia Nuclear**



PRIMEIRO-TENENTE MARCUS VINICIUS VIANA MEDEIROS

Rio de Janeiro
2023

PRIMEIRO-TENENTE MARCUS VINICIUS VIANA MEDEIROS

NOVAS TECNOLOGIAS DE COMBUSTÍVEIS NUCLEARES PARA REATORES DA
GERAÇÃO IV: Os desafios do futuro da Energia Nuclear

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Tecnologia Nuclear.

Orientador:
Prof. Fábio de Camargo, PhD

CIAA
Rio de Janeiro
2023

PRIMEIRO-TENENTE MARCUS VINICIUS VIANA MEDEIROS

NOVAS TECNOLOGIAS DE COMBUSTÍVEIS NUCLEARES PARA REATORES DA
GERAÇÃO IV: Os desafios do futuro da Energia Nuclear

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Tecnologia Nuclear.

Aprovada em _____

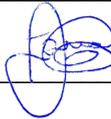
Banca Examinadora:

Prof.Fábio de Camargo, PhD – CINA



CT Leonardo Oldani Felix, M.Sc. – CIAA

CT (EN) Danilo Pinheiro Faria, M.Sc. – DDNM



CIAA
Rio de Janeiro
2023

AGRADECIMENTOS

A realização de um trabalho de conclusão de curso demanda dedicação e muito estudo, sendo então necessário para lograr êxito nessa singradura, além do esforço pessoal, o apoio de diversas pessoas as quais irão prestar o devido suporte, seja na parte acadêmica, seja na parte psicológica e motivacional.

Desta forma, agradeço primeiramente ao meu orientador, Doutor Fábio de Camargo, pelo auxílio na parte acadêmica e orientação sobre material e linha de estudo seguida durante toda a confecção do trabalho, ajudando sobre maneira no bom andamento do referido estudo.

Agradeço também aos meus pais, por me apoiarem diuturnamente em todas as etapas da carreira, sendo essa mais uma das inúmeras fases em que precisei realizar o meu máximo, buscando sempre extrair o melhor de mim, visando uma carreira de sucesso através da base familiar.

Por fim e não menos importante, agradeço aos companheiros de turma do Curso de Aperfeiçoamento em Tecnologia Nuclear, principalmente aos 1T Silva Lopes, 1T Gustavo Novaes e 1T Branco, pela paciência e ajuda em todos os momentos de dificuldades.

Resumo

O desenvolvimento de novas tecnologias de combustíveis para reatores nucleares de quarta geração tem sido uma área de pesquisa em constante evolução. Essas tecnologias visam melhorar a eficiência e a segurança dos reatores nucleares, além de reduzir a quantidade de resíduos radioativos gerados. Dentre as tecnologias em desenvolvimento, destacam-se os reatores de sal fundido, os reatores de núcleo de esferas e os reatores de geração IV. Já entre os tipos de combustíveis avançados para os reatores da quarta geração se destacam os à base de óxido misto, à base de nitreto metálico, à base de carbeto metálico e à base de líquido iônico, os quais serão posteriormente detalhados em seus respectivos capítulos. Esses novos combustíveis se destacam pela capacidade de melhorar o desempenho térmico dos reatores, permitindo um aproveitamento mais eficiente, além de uma menor tendência à formação de produtos de fissão instáveis, reduzindo assim a possibilidade de acidentes nucleares. Outra característica advém da menor produção de subprodutos radioativos, reduzindo assim a quantidade de resíduos radioativos gerados durante processo de geração de energia. Alguns desses combustíveis possuem propriedades que permitem a transmutação dos resíduos radioativos existentes em elementos menos perigosos. Nesse contexto de novas tecnologias na área nuclear, surgem diversas oportunidades para o Brasil, devido a sua grande capacidade de prospecção do urânio, contando com investimento e iniciativa do MME (Ministério de Minas e Energia), além do domínio do ciclo do combustível, inserindo o nosso país num contexto global de protagonismo na área nuclear. No entanto, o desenvolvimento das novas tecnologias de combustíveis para reatores nucleares de quarta geração enfrenta desafios técnicos e científicos importantes. Um desses desafios está relacionado à necessidade de se encontrar materiais capazes de suportar as altas temperaturas e pressões presentes nos reatores nucleares. Também é necessário desenvolver métodos eficientes para a produção em larga escala desses combustíveis, de forma a viabilizar sua utilização em escala comercial, portanto é de suma importância a continuidade nas pesquisas e estudos na área nuclear, contando com investimentos de todos os setores da sociedade para o desenvolvimento sustentável do Brasil na área nuclear.

Palavras-chave: Combustíveis; resíduos radioativos; reatores de sal fundido; reatores de geração IV.

Abstract

The development of new fuel technologies for fourth-generation nuclear reactors has been a constantly evolving area of research. These technologies aim to improve the efficiency and safety of nuclear reactors, as well as reducing the amount of radioactive waste generated. Among the technologies under development, molten salt reactors, ball core reactors and generation IV reactors stand out. Among the types of advanced fuels for fourth generation reactors, those based on mixed oxide, based on metal nitride, based on metal carbide and based on ionic liquid stand out, which will be further detailed in their respective chapters. These new fuels stand out for their ability to improve the thermal performance of reactors, allowing more efficient use, as well as a lower tendency for the formation of unstable fission products, thus reducing the possibility of nuclear accidents. Another characteristic comes from the lower production of radioactive by-products, thus reducing the amount of radioactive waste generated during the energy generation process. Some of these fuels have properties that allow the transmutation of existing radioactive waste into less dangerous elements. In this context of new technologies in the nuclear area, several opportunities arise for Brazil, due to its great capacity for uranium prospecting, counting on investment and initiative from the MME (Ministry of Energy), in addition to mastering the fuel cycle, placing our country in a global context of protagonism in the nuclear area. However, the development of new fuel technologies for fourth generation nuclear reactors faces important technical and scientific challenges. One of these challenges is related to the need to find materials capable of withstanding the high temperatures and pressures present in nuclear reactors. It is also necessary to develop efficient methods for the large-scale production of these fuels, in order to enable their use on a commercial scale, therefore it is extremely important to continue research and studies in the nuclear area, counting on investments from all sectors of society to Brazil's sustainable development in the nuclear area.

Key words: Fuels; radioactive waste; molten salt reactors; generation IV reactors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Características dos Reatores Conceito da Geração IV.....	14
---	----

LISTA DE SIGLAS

AIEA	Agência Internacional de Energia Atômica
IL	Líquido Iônico
INB	Indústrias Nucleares do Brasil
MB	Marinha do Brasil
MC	Carbeto Metálico
MME	Ministério de Minas e Energia
MN	Nitreto Metálico
MOX	Óxido Misto
PRIS	Sistema de Informação de Reatores de Potência (<i>Power Reactor Information System</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

PuC	Carbeto de Plutônio
UC	Carbeto de Urânio
UO ₂	Dióxido de Urânio
U-235	Isótopo de Urânio com 235 de massa

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. REATORES NUCLEARES DE QUARTA GERAÇÃO	11
2.1 Definição e características dos reatores nucleares de quarta geração	12
2.2 Vantagens e desafios dos reatores nucleares de quarta geração.....	14
2.3 Comparação com as gerações anteriores de reatores nucleares	16
3. COMBUSTÍVEIS NUCLEARES TRADICIONAIS	17
3.1 Tipos de combustíveis nucleares utilizados em reatores convencionais	17
3.2 Limitações e problemas associados aos combustíveis nucleares tradicionais	18
4. NOVAS TECNOLOGIAS DE COMBUSTÍVEIS PARA REATORES NUCLEARES DA QUARTA GERAÇÃO	18
4.1 Conceito de novas tecnologias de combustíveis para reatores nucleares da quarta geração	19
4.2 Benefícios das novas tecnologias de combustíveis para a indústria nuclear.....	20
4.3 Desenvolvimento e pesquisa em novas tecnologias de combustíveis para reatores nucleares da quarta geração.....	21
5. TIPOS DE COMBUSTÍVEIS AVANÇADOS PARA REATORES NUCLEARES DA QUARTA GERAÇÃO	22
5.1 Combustível à base de óxido misto (MOX)	24
5.2 Combustível à base de nitreto metálico (MN).....	25
5.3 Combustível à base de carbeto metálico (MC)	26
5.4 Combustível à base de líquido iônico (IL).....	27
6. CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DOS NOVOS COMBUSTÍVEIS NUCLEARES	29
6.1 Estabilidade térmica e química dos novos combustíveis nucleares	30
6.2 Eficiência energética dos novos combustíveis nucleares.....	31
6.3 Segurança e estabilidade dos novos combustíveis nucleares	32
7. OPORTUNIDADES PARA O BRASIL	33

8. CONCLUSÃO	35
8.1 Sugestões para futuros trabalhos.....	36
REFERÊNCIAS.....	37

1 INTRODUÇÃO

A energia nuclear desempenha um papel crucial na matriz energética global, fornecendo uma fonte de energia limpa e eficiente[2]. Neste contexto, é fundamental explorar o panorama atual da energia nuclear, destacando exemplos notáveis, como a França e a Alemanha, para ilustrar a importância dessa fonte energética na redução das emissões de dióxido de carbono por unidade de energia produzida[2]. Além disso, vale a pena observar o caso dos Emirados Árabes Unidos, que, em um curto período, implementaram com sucesso a energia nuclear em sua matriz energética, reduzindo sua dependência de fontes térmicas[3].

Para obter uma visão abrangente da energia nuclear em operação, observou-se o sistema de informação PRIS (*Power Reactor Information System*) [1] da AIEA (Agência Internacional de Energia Atômica). Este banco de dados fornece informações valiosas sobre reatores nucleares em todo o mundo, incluindo detalhes sobre sua capacidade, tecnologia e histórico operacional. A análise desses dados é essencial para compreender o cenário global da energia nuclear.

Antes de adentrar na discussão sobre os reatores de quarta geração, é fundamental estabelecer os objetivos deste trabalho. O foco principal é explorar a busca por tecnologias de combustíveis inovadoras para reatores nucleares de quarta geração. Essas tecnologias são vitais para avançar a geração de energia nuclear, superando as limitações associadas aos combustíveis atuais [2].

A necessidade de desenvolver novas tecnologias de combustíveis para reatores nucleares de quarta geração é incontestável. Os combustíveis tradicionais, baseados em urânio enriquecido ou plutônio, apresentam desafios consideráveis, como por exemplo, são recursos escassos, caros, geram resíduos radioativos com meia-vida elevada, portanto necessitam ser gerenciados por longos períodos, e operam com baixa eficiência energética [3].

Para atender a essa demanda, um combustível ideal para reatores nucleares de quarta geração deve oferecer maior eficiência energética, minimizar a produção de resíduos radioativos de alta meia-vida e garantir maior segurança operacional. Isso exige o desenvolvimento de materiais de alta densidade energética, capazes de extrair todo o potencial do material fissil. Além disso, é crucial reduzir a quantidade e o perigo dos resíduos radioativos resultantes do processo de fissão nuclear [4].

Atualmente, existem duas principais tecnologias de combustíveis em desenvolvimento para reatores nucleares de quarta geração: os combustíveis à base de sais fundidos e os combustíveis cerâmicos. Os combustíveis à base de sais fundidos dissolvem o material fissil em um sal líquido, proporcionando eficiência aprimorada e menor geração de resíduos radioativos. Já os combustíveis cerâmicos consistem em partículas de óxidos metálicos encapsuladas em uma matriz cerâmica, garantindo estabilidade térmica e química [5].

No entanto, o progresso nessas tecnologias enfrenta desafios significativos, incluindo o aprimoramento da resistência dos materiais, a garantia de estabilidade ao longo do ciclo de vida do reator e o desenvolvimento de métodos de fabricação em larga escala. Além disso, testes experimentais e simulações computacionais são essenciais para avaliar o comportamento desses combustíveis em condições extremas [6].

2 REATORES NUCLEARES DE QUARTA GERAÇÃO

Os reatores nucleares de quarta geração são caracterizados pela utilização de combustíveis avançados e pela capacidade de reciclagem de resíduos nucleares. Essas características conferem a esses reatores uma série de benefícios em relação às tecnologias anteriores. Em primeiro lugar, a utilização de combustíveis avançados permite a redução do volume e da toxicidade dos resíduos radioativos gerados durante o processo de fissão nuclear. Isso ocorre porque esses combustíveis são projetados para maximizar a eficiência da fissão e minimizar a produção de subprodutos radioativos indesejáveis [7].

Além disso, os reatores nucleares de quarta geração oferecem diferentes opções de combustíveis, como o uso de urânio enriquecido, urânio empobrecido ou até mesmo elementos transurânicos. Essa diversidade possibilita uma maior flexibilidade na escolha do combustível mais adequado para cada aplicação específica. Por exemplo, o uso de urânio enriquecido pode ser mais vantajoso em termos econômicos, enquanto o uso de elementos transurânicos pode contribuir para a redução do estoque global desses materiais [8].

No entanto, o desenvolvimento e implementação das novas tecnologias de combustíveis para reatores nucleares da quarta geração enfrentam desafios técnicos e econômicos significativos. Do ponto de vista técnico, é necessário garantir a segurança operacional desses reatores, bem como a eficiência na produção e utilização dos combustíveis avançados. Além disso,

é preciso considerar os aspectos econômicos envolvidos no ciclo de vida desses reatores, desde a extração e processamento do combustível até o gerenciamento dos resíduos radioativos [9].

Apesar dos desafios, as novas tecnologias de combustíveis para reatores nucleares da quarta geração apresentam vantagens competitivas para a indústria nuclear. A maior eficiência energética desses reatores resulta em uma maior produção de energia elétrica a partir de uma quantidade menor de combustível. Além disso, a redução dos custos operacionais é alcançada por meio da utilização mais eficiente dos recursos nucleares e da diminuição dos custos associados ao gerenciamento dos resíduos radioativos [10].

No que diz respeito aos impactos ambientais, as novas tecnologias de combustíveis para reatores nucleares da quarta geração contribuem para a diminuição das emissões de gases do efeito estufa em comparação com outras fontes de energia. Isso ocorre porque a fissão nuclear não emite dióxido de carbono ou outros gases poluentes diretamente na atmosfera. A redução do volume e da toxicidade dos resíduos radioativos também contribui para a mitigação dos impactos ambientais associados à energia nuclear [11].

2.1 Definição e características dos reatores nucleares de quarta geração

A pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias de combustíveis para reatores nucleares de quarta geração é de extrema importância para o avanço da energia nuclear. Essas tecnologias têm o potencial de melhorar significativamente a eficiência energética dos reatores, aumentando sua capacidade de geração de eletricidade. Além disso, a utilização de materiais avançados nos reatores nucleares de quarta geração pode proporcionar maior segurança operacional e redução do volume de resíduos radioativos produzidos [12].

Os reatores nucleares de quarta geração são caracterizados pelo uso de materiais avançados, como ligas metálicas refratárias e cerâmicas, que possuem alta resistência à corrosão e a altas temperaturas. Esses materiais permitem que os reatores operem em condições extremas, aumentando sua eficiência energética. Além disso, os reatores nucleares de quarta geração podem utilizar diferentes tipos de combustíveis, como combustíveis líquidos ou sólidos, o que proporciona maior flexibilidade na escolha do combustível mais adequado para cada aplicação [13].

No entanto, a implementação das novas tecnologias de combustíveis para reatores nucleares da quarta geração enfrenta alguns desafios significativos. Um dos principais desafios é o desenvolvimento e fabricação em larga escala dos materiais avançados necessários para a

construção dos reatores. Além disso, é necessário garantir a segurança operacional desses reatores, uma vez que eles operam em condições extremas. Outro desafio é lidar com questões regulatórias e de aceitação pública, uma vez que a energia nuclear ainda é vista com desconfiança por parte da sociedade [4].

As vantagens dos reatores nucleares de quarta geração em relação às gerações anteriores são significativas. Além do aumento da eficiência energética, esses reatores têm o potencial de reduzir o volume e a toxicidade de resíduos radioativos produzidos. Isso ocorre porque eles podem utilizar combustíveis mais eficientes que aproveitam melhor o potencial energético do urânio ou do plutônio e até mesmo combustíveis queimados (já utilizados) em reatores tradicionais. Outro ponto a ser mencionado é que os reatores nucleares de quarta geração possuem sistemas de segurança avançados, que minimizam os riscos de acidentes nucleares, chegando a funcionar de maneira completamente passiva sem a necessidade de intervenção humana e/ou em ausência de energia elétrica [7].

Existem diferentes opções de combustíveis para os reatores nucleares de quarta geração. Uma das opções é o uso de combustíveis líquidos, como o combustível à base de sais fundidos. Este tipo de combustível possui alta estabilidade térmica e boa capacidade de transferência de calor, o que contribui para a eficiência energética dos reatores. Outra opção é o uso de combustíveis sólidos, como pastilhas cerâmicas ou metálicas. Esses combustíveis possuem alta densidade energética e são mais estáveis em condições extremas [2].

Os reatores nucleares de quarta geração apresentam impactos ambientais associados, principalmente relacionados à produção e gerenciamento dos resíduos radioativos. No entanto, as novas tecnologias de combustíveis podem contribuir para a redução desses impactos. Por exemplo, o uso de combustíveis mais eficientes pode diminuir a quantidade de resíduos produzidos e o desenvolvimento de técnicas avançadas de gerenciamento e armazenamento dos resíduos radioativos pode minimizar os riscos ambientais associados a esses materiais [10].

Figura 1 - Características dos Reatores Conceito da Geração IV.

Tipo do Reator Geração IV	Espectro Nêutron	Temp. saída refrigerante [°C]	Combustível	Ciclo do Combustível	Tamanho de Referência [MW]
Reator de Ultra Alta Temperatura <i>VHTR – Very High Temperature Reactor</i>	térmico	1000	UO2 bloco/pebble	aberto	250-600(th)
Reator a Água Supercrítico <i>SCWR – Supercritical Water Reactor</i>	térmico rápido	550	UO2	aberto fechado	3575 (th) 1700 (e)
Reator Rápido Refrigerado a Gás <i>GFR – Gas Cooled Fast Reactor</i>	rápido	850	U-238	fechado	288(e)
Reator Refrigerado a Metal Pesado <i>HMCR – Heavy Metal Cooled Reactor</i>	rápido	550-850	U-238	fechado	5-150(e) 300-400(e) 1200(e)
Reator Refrigerado a Sódio <i>SCR – Sodium Cooled Reactor</i>	rápido	550	U-238, MOX	fechado	150-500(e) 500-1500(e)
Reator de Sal Líquido <i>MSR – Molten Salt Reactor</i>	epitérmico	700-800	UF no sal	fechado	2250(th) 1000(e)

Fonte - Referência [14].

2.2 Vantagens e desafios dos reatores nucleares de quarta geração

Os reatores nucleares de quarta geração apresentam diversas vantagens em relação às gerações anteriores. Uma das principais vantagens é a maior eficiência na utilização do combustível nuclear, tendo em certos casos aproveitamento de até 70% nos reatores rápidos contra 2% em reatores térmicos. Esses reatores são capazes de extrair uma quantidade significativamente maior de energia a partir do mesmo volume de combustível, o que resultam em um aproveitamento mais eficiente dos recursos naturais. Estes reatores avançados também têm a capacidade de reduzir a quantidade de resíduos radioativos produzidos. Isso ocorre porque esses reatores são projetados para utilizar o combustível nuclear de forma mais completa ou poderem operar com combustível queimado dos reatores tradicionais, diminuindo assim a quantidade de material não utilizado que se torna resíduo [12].

No entanto, a implementação dos reatores nucleares de quarta geração enfrenta desafios tecnológicos significativos. Um desses desafios é o desenvolvimento de materiais capazes de suportar altas temperaturas e radiação intensa, pois esses reatores nucleares operam em condições extremas, com temperaturas elevadas de até 1000 °C na saída do refrigerante em alguns casos, alé,

de ambientes mais corrosivos e, dependendo da tecnologia, em espectros de nêutrons rápidos com potencial de maior dose aos materiais. Portanto, é necessário desenvolver materiais que possam resistir a essas condições adversas sem comprometer a segurança e a eficiência do reator [15].

Uma das possibilidades exploradas nos reatores nucleares de quarta geração é a utilização de diferentes tipos de combustíveis nucleares. Por exemplo, o uso de urânio natural empobrecido ou tório tem sido considerado como alternativa aos tradicionais combustíveis à base de urânio enriquecido. Esses elementos são mais abundantes na natureza e podem ser utilizados como substitutos viáveis, reduzindo a dependência de recursos limitados e contribuindo para a sustentabilidade do setor nuclear [16].

Outra vantagem dos reatores nucleares de quarta geração é a capacidade de aproveitar o calor residual para a produção de energia elétrica. Esses reatores são projetados para utilizar o calor gerado durante o processo de fissão nuclear, que normalmente seria dissipado, e convertê-lo em eletricidade. Isso aumenta ainda mais a eficiência energética desses sistemas, tornando-os mais atrativos do ponto de vista econômico e ambiental [17].

A segurança é uma preocupação fundamental na operação de qualquer instalação nuclear. Os reatores nucleares de quarta geração são projetados com sistemas avançados de segurança passiva, que reduzem os riscos associados à operação dessas instalações. Esses sistemas são capazes de responder automaticamente a eventos anormais ou acidentais, sem a necessidade de intervenção humana ou uso ativo de energia externa. Isso aumenta significativamente a confiabilidade e segurança dos reatores nucleares [18].

A pesquisa e desenvolvimento contínuos são essenciais para aprimorar as tecnologias dos reatores nucleares de quarta geração e superar os desafios técnicos e econômicos envolvidos. A melhoria das características dos materiais utilizados nos reatores, bem como o desenvolvimento de novos métodos de fabricação e controle da fissão nuclear, são áreas que requerem investimentos em pesquisa e colaboração entre instituições acadêmicas, governamentais e industriais. Somente por meio desses esforços conjuntos será possível alcançar avanços significativos na tecnologia dos reatores nucleares de quarta geração [19].

2.3 Comparação com as gerações anteriores de reatores nucleares

Os reatores nucleares das gerações anteriores, como os de primeira, segunda e terceira geração, possuem características distintas que influenciam seu desempenho e segurança. Os reatores de primeira geração são conhecidos por utilizar água leve como refrigerante e moderador, além de urânio enriquecido como combustível. Esses reatores são considerados de baixa eficiência na utilização do combustível nuclear, uma vez que apenas uma pequena fração da energia contida no urânio é convertida em eletricidade. Já os reatores de segunda e terceira geração apresentam melhorias em relação aos de primeira geração, como o uso de água pressurizada como refrigerante e moderador, o que permite operar em temperaturas mais elevadas e aumentar a eficiência na conversão de energia [1].

Apesar dos avanços nas gerações anteriores, os reatores nucleares enfrentam limitações e desafios significativos. Um dos principais problemas é a produção de resíduos radioativos com longa meia-vida, que requerem cuidados especiais para seu armazenamento seguro por períodos superiores a milhares de anos. Além disso, o risco de acidentes nucleares também é uma preocupação constante, especialmente após eventos como os acidentes em *Chernobyl*, na Ucrânia e *Fukushima*, no Japão. Esses acidentes demonstraram a necessidade de aprimorar ainda mais a segurança dos reatores nucleares [8].

As novas tecnologias de combustíveis para reatores nucleares da quarta geração representam uma evolução significativa em relação às gerações anteriores. Dentre essas tecnologias, destacam-se os reatores de nêutrons rápidos, que utilizam um refrigerante líquido e não necessitam de moderador, o que permite uma maior eficiência na utilização do combustível nuclear. Por outro lado, os reatores de sal fundido são outra opção promissora, pois utilizam um sal como refrigerante e combustível, o que possibilita operar em temperaturas muito mais elevadas e aumentar ainda mais a eficiência [4].

Os avanços na segurança dos reatores nucleares da quarta geração são outro aspecto importante a ser considerado. Esses reatores contam com sistemas passivos de resfriamento, que não dependem da intervenção humana ou do fornecimento externo de energia para manter o sistema seguro em caso de falhas. Além disso, os projetos dos reatores da quarta geração também buscam minimizar o risco de fusão do núcleo, através do uso de materiais resistentes a acidente e sistemas avançados de controle [9].

3 COMBUSTÍVEIS NUCLEARES TRADICIONAIS

Os combustíveis nucleares tradicionais utilizados em reatores nucleares de gerações anteriores incluem o urânio enriquecido e o plutônio. O urânio enriquecido é amplamente utilizado como combustível em reatores nucleares, pois possui a capacidade de sustentar uma reação em cadeia controlada. O urânio natural é composto principalmente pelo isótopo Urânio-238 (99,3 %), que não é fissionável, e apenas 0,7% de U-235 (fissil), contendo traços de Urânio-234. Entretanto, por meio do processo de enriquecimento pode-se aumentar a quantidade Urânio-235 até valores bem elevados, podendo chegar a 90% para reatores navais ou no caso dos reatores nucleares comerciais atuais o enriquecimento limita-se até 5%. Já o plutônio é produzido pela reação nuclear com o urânio empregado nos reatores nucleares e também pode ser utilizado como combustível, desde que o combustível nuclear passe pelo reprocessamento e ocorra a sua separação química, posteriormente ocorra o processamento e fabricação de elementos combustíveis, apenas com Plutônio ou misturados com Urânio, este último chamado de MOX [16].

No entanto, os combustíveis nucleares tradicionais enfrentam algumas limitações e desafios. Um dos principais problemas é a produção de resíduos radioativos de meia-vida longa. A fissão nuclear produz elementos radioativos que podem permanecer ativos por milhares de anos, exigindo um cuidadoso gerenciamento e armazenamento seguro desses resíduos. Além disso, há preocupações com a possibilidade de proliferação nuclear, uma vez que o urânio enriquecido e o plutônio podem ser utilizados para a fabricação de armas nucleares [13].

3.1 Tipos de combustíveis nucleares utilizados em reatores convencionais

Os reatores nucleares convencionais utilizam diferentes tipos de combustíveis nucleares, sendo os mais comuns o urânio enriquecido e o plutônio. O urânio enriquecido é utilizado na forma UO_2 e possui uma concentração maior do isótopo U-235, que é fissil e capaz de sustentar a reação em cadeia. Já o plutônio é produzido a partir do bombardeamento do isótopo U-238 com nêutrons em um reator nuclear e pode ser utilizado como combustível misturado ao urânio enriquecido [20].

3.2 Limitações e problemas associados aos combustíveis nucleares tradicionais

Os combustíveis nucleares tradicionais apresentam diversas limitações que impactam sua viabilidade e eficiência. Uma das principais limitações é a dependência do urânio enriquecido como fonte de energia. O urânio natural possui uma concentração de isótopo físsil (U-235) inferior a 1%, o que requer um processo de enriquecimento para aumentar essa concentração. Esse processo é complexo, caro e demanda infraestrutura especializada, o que limita a disponibilidade desse recurso em muitos países [21].

Além disso, os combustíveis nucleares tradicionais geram resíduos radioativos de meia-vida longa, o que representa um desafio significativo para seu gerenciamento seguro e adequado. Esses resíduos permanecem ativos por milhares de anos e exigem medidas rigorosas de armazenamento e descarte. A falta de soluções definitivas para o tratamento desses resíduos implica em riscos ambientais e de saúde pública [22].

Os problemas associados aos combustíveis nucleares tradicionais também são relevantes para sua avaliação crítica. Um dos principais problemas é o risco de acidentes nucleares, como os ocorridos em *Chernobyl* e *Fukushima*, que evidenciam a vulnerabilidade dessas instalações e os impactos devastadores que podem resultar desses eventos. Além disso, a proliferação de armas nucleares é uma preocupação constante, uma vez que o acesso ao urânio enriquecido pode ser utilizado para fins militares [23].

4 NOVAS TECNOLOGIAS DE COMBUSTÍVEIS PARA REATORES NUCLEARES DA QUARTA GERAÇÃO

Os reatores nucleares de quarta geração são caracterizados por uma série de avanços tecnológicos em relação às gerações anteriores. Uma das principais características desses reatores é a capacidade de utilizar combustíveis nucleares mais eficientes e seguros. Esses reatores possuem maior flexibilidade operacional, permitindo a utilização de diferentes tipos de combustíveis e a adaptação às demandas específicas de cada país [5].

A busca por novas tecnologias de combustíveis para os reatores nucleares da quarta geração é de extrema importância para o desenvolvimento da energia nuclear como fonte energética sustentável. A utilização de combustíveis mais eficientes e seguros contribui para a redução dos riscos associados à produção de energia nuclear, como o vazamento radioativo e a proliferação nuclear. Pode-se citar também que essas novas tecnologias podem aumentar a

eficiência energética dos reatores, tornando-os mais competitivos em relação a outras fontes de energia [14].

Existem diferentes tipos de combustíveis nucleares que podem ser utilizados nos reatores da quarta geração, cada um com suas vantagens e desvantagens. Os combustíveis de óxido de urânio enriquecido são os mais comumente utilizados, devido à sua estabilidade e disponibilidade. No entanto, esses combustíveis apresentam baixa eficiência energética e geram uma quantidade significativa de rejeito nuclear. Por outro lado, os combustíveis de tório têm despertado interesse devido à sua abundância e menor geração de rejeito nuclear. No entanto, ainda há desafios técnicos a serem superados para a utilização em larga escala desses combustíveis [24].

Diversas tecnologias emergentes estão sendo desenvolvidas para melhorar a eficiência e segurança dos reatores nucleares da quarta geração. Uma dessas tecnologias é o reator de sal fundido, que utiliza um sal líquido como refrigerante e combustível. Essa tecnologia oferece maior segurança operacional e menor risco de acidentes nucleares. Outra tecnologia promissora é o reator rápido refrigerado a chumbo, que utiliza chumbo líquido como refrigerante. Essa tecnologia permite maior eficiência energética e menor geração de lixo nuclear [13].

A pesquisa e desenvolvimento de combustíveis nucleares avançados tem progredido significativamente nos últimos anos. O uso de materiais cerâmicos e metálicos tem sido explorado como alternativas aos combustíveis tradicionais. Os materiais cerâmicos apresentam maior resistência à alta temperatura e corrosão, enquanto os materiais metálicos oferecem maior condutividade térmica e mecânica. Esses avanços na pesquisa contribuem para o desenvolvimento de combustíveis mais eficientes e seguros para os reatores nucleares da quarta geração [17].

4.1 Conceito de novas tecnologias de combustíveis para reatores nucleares da quarta geração

A utilização de novas tecnologias de combustíveis é fundamental para o desenvolvimento dos reatores nucleares de quarta geração. Essas tecnologias permitem aumentar a segurança e a eficiência dos reatores, além de possibilitar a redução da dependência do urânio enriquecido como fonte de combustível. A diversificação das opções de combustíveis também contribui para a sustentabilidade do setor nuclear, ao permitir o aproveitamento de materiais radioativos que seriam descartados como resíduos [2].

No entanto, a pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias de combustíveis para reatores nucleares da quarta geração enfrentam diversos desafios. Um dos principais desafios é garantir a segurança no manuseio e armazenamento desses materiais radioativos, especialmente no caso do plutônio, que possui alto potencial para uso em armas nucleares. Além disso, há dificuldades técnicas relacionadas à fabricação e processamento dos diferentes tipos de combustíveis [8].

As diferentes opções de combustíveis para os reatores nucleares da quarta geração apresentam vantagens e desvantagens específicas. O uso de urânio enriquecido até aproximadamente 20%, por exemplo, permite uma maior eficiência na geração de energia, mas também aumenta os riscos de proliferação nuclear. Já o urânio empobrecido e o tório são opções mais abundantes e menos propensas à proliferação, porém apresentam desafios tecnológicos para sua utilização em reatores nucleares. O plutônio, por sua vez, é um combustível que pode ser obtido a partir do reprocessamento de resíduos nucleares, mas também levanta questões de segurança e proliferação [6].

Recentemente, têm sido realizados avanços significativos na área de novas tecnologias de combustíveis para reatores nucleares da quarta geração. Esses avanços incluem o desenvolvimento de materiais mais resistentes à radiação, técnicas avançadas de fabricação e processamento dos combustíveis e aprimoramentos nos sistemas de segurança dos reatores. Essas inovações contribuem para tornar os reatores nucleares mais eficientes, seguros e sustentáveis [25].

4.2 Benefícios das novas tecnologias de combustíveis para a indústria nuclear

As novas tecnologias de combustíveis para a indústria nuclear trazem consigo uma série de vantagens que podem ser exploradas em diferentes aspectos. Uma das principais vantagens é a possibilidade de aumentar a eficiência dos reatores nucleares. Isso ocorre devido à capacidade dessas tecnologias de aproveitar melhor o potencial energético do combustível, resultando em um maior rendimento na produção de eletricidade. Além disso, essas tecnologias também permitem reduzir o volume de resíduos radioativos produzidos, o que contribui para minimizar os impactos ambientais e os custos associados ao gerenciamento desses materiais [19].

Outro aspecto importante das novas tecnologias de combustíveis é sua relevância na busca por fontes de energia mais limpas e sustentáveis. Com a crescente preocupação com as mudanças climáticas e a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, essas

tecnologias se apresentam como uma alternativa viável para suprir a demanda energética sem comprometer o meio ambiente. Ao utilizar combustíveis nucleares, é possível evitar a queima de combustíveis fósseis, principal fonte emissora desses gases nocivos [26].

Além dos benefícios ambientais, as novas tecnologias de combustíveis também trazem avanços significativos na área da segurança nuclear. Essas tecnologias são projetadas para diminuir o risco de acidentes nucleares, através do uso de materiais mais estáveis e sistemas mais robustos. Elas também contribuem para uma melhoria na gestão dos resíduos radioativos, permitindo seu armazenamento e gerenciamento de forma mais segura e eficiente [27].

Outra vantagem das novas tecnologias de combustíveis é a possibilidade de diversificação da matriz energética. Com a utilização dessas tecnologias, é possível reduzir a dependência dos combustíveis fósseis, o que traz uma maior independência energética para os países. Além disso, essa diversificação também contribui para a estabilidade do suprimento energético, uma vez que as fontes nucleares são menos suscetíveis às flutuações de preços e disponibilidade dos combustíveis fósseis [28].

4.3 Desenvolvimento e pesquisa em novas tecnologias de combustíveis para reatores nucleares da quarta geração

Atualmente, os principais tipos de combustíveis nucleares utilizados são o urânio enriquecido e o plutônio. No entanto, esses materiais podem ser aprimorados para atender às demandas dos reatores de quarta geração. Uma das formas de melhorar esses combustíveis é através do desenvolvimento de novos revestimentos, que aumentem a resistência à corrosão e melhorem a estabilidade térmica. Além disso, é possível explorar o uso do tório como combustível, uma vez que esse material apresenta vantagens em relação ao urânio e ao plutônio, como uma maior abundância na natureza e menor geração de resíduos radioativos [26].

Existem diversas pesquisas em andamento para o desenvolvimento de novos materiais e processos que possam melhorar a eficiência e segurança dos combustíveis nucleares utilizados nos reatores da quarta geração. Uma das áreas de pesquisa é o desenvolvimento de materiais mais resistentes à corrosão, que possam prolongar a vida útil dos combustíveis nucleares. Além disso, estão sendo estudados processos de reciclagem de combustíveis usados, visando reduzir a produção de resíduos radioativos e aproveitar ao máximo o potencial energético desses materiais [21].

O desenvolvimento de novas tecnologias de combustíveis para reatores nucleares da quarta geração enfrenta desafios técnicos e científicos significativos. Um dos principais desafios é garantir a resistência à corrosão dos materiais utilizados nos combustíveis nucleares, uma vez que esses materiais estão sujeitos a ambientes agressivos. Além disso, é necessário garantir a estabilidade térmica dos combustíveis, evitando deformações ou falhas durante o processo de fissão nuclear. Outro desafio importante é minimizar a produção de resíduos radioativos, buscando alternativas para o gerenciamento seguro desses materiais [29].

As tecnologias de combustíveis nucleares da quarta geração possuem diversas aplicações futuras. Uma delas é a produção de hidrogênio, que pode ser obtido através do processo de eletrólise da água utilizando energia nuclear. Essa aplicação é especialmente relevante para a transição energética, uma vez que o hidrogênio pode ser utilizado como fonte de energia limpa em diversos setores, como transporte e indústria. Além disso, o calor residual gerado pelos reatores nucleares de quarta geração pode ser aproveitado para fins industriais, aumentando ainda mais a eficiência desses sistemas. Outra possível aplicação é a propulsão espacial, uma vez que a alta densidade energética dos combustíveis nucleares permite um maior impulso aos veículos espaciais [28].

A cooperação internacional desempenha um papel fundamental na pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias de combustíveis para reatores nucleares da quarta geração. Por meio da colaboração entre países e instituições, é possível compartilhar conhecimentos e recursos, acelerando o avanço científico nessa área. Além disso, a cooperação internacional permite uma maior diversidade de perspectivas e abordagens, contribuindo para soluções mais robustas e eficientes. Os benefícios compartilhados dessa colaboração incluem o acesso a infraestruturas de pesquisa avançadas e a redução dos custos associados ao desenvolvimento de novas tecnologias [25].

5 TIPOS DE COMBUSTÍVEIS AVANÇADOS PARA REATORES NUCLEARES DA QUARTA GERAÇÃO

A utilização de combustíveis avançados para reatores nucleares da quarta geração enfrenta diversos desafios. Um dos principais desafios é a necessidade de desenvolver materiais que possam suportar as altas temperaturas e pressões presentes nos reatores nucleares avançados. Além disso, é necessário garantir a segurança e a estabilidade desses materiais ao longo do ciclo

de vida do reator. Outro desafio é o desenvolvimento de métodos eficientes para a produção em larga escala desses combustíveis, considerando os aspectos econômicos e ambientais [30].

Os diferentes tipos de combustíveis avançados disponíveis para reatores nucleares da quarta geração apresentam vantagens e desvantagens distintas. Por exemplo, os combustíveis à base de óxido de urânio enriquecido oferecem uma alta densidade energética e são amplamente utilizados na indústria nuclear. No entanto, eles também apresentam limitações em termos de eficiência e segurança. Já os combustíveis à base de nitreto de urânio têm uma maior capacidade térmica e podem operar em temperaturas mais elevadas, mas ainda estão em fase experimental [31].

As características e propriedades dos combustíveis avançados mais promissores para reatores nucleares da quarta geração variam dependendo do tipo de material utilizado. Por exemplo, os combustíveis à base de carbeto de urânio apresentam uma alta condutividade térmica e uma excelente resistência à corrosão, tornando-os adequados para aplicações em reatores nucleares avançados. Já os combustíveis à base de metal líquido, como o lítio, oferecem uma maior eficiência de combustível e uma melhor capacidade de resfriamento [32].

As tecnologias de fabricação e processamento dos combustíveis avançados utilizados em reatores nucleares da quarta geração são essenciais para garantir a qualidade e a segurança desses materiais. A fabricação desses combustíveis envolve etapas como a produção do material base, a formulação da composição química adequada e a preparação das pastilhas ou elementos combustíveis. Além disso, é necessário considerar os aspectos relacionados à manipulação e ao armazenamento desses materiais, bem como aos procedimentos de controle de qualidade [27].

O uso de combustíveis avançados em reatores nucleares da quarta geração pode ter impactos ambientais significativos. Por um lado, esses combustíveis podem contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa, uma vez que a energia nuclear é considerada uma fonte de energia limpa. Por outro lado, o ciclo de vida dos combustíveis nucleares envolve a produção e o gerenciamento de resíduos radioativos, que apresentam desafios em termos de segurança e disposição adequada [13].

Os aspectos econômicos relacionados à utilização de combustíveis avançados em reatores nucleares da quarta geração também devem ser considerados. Embora os custos iniciais possam ser mais elevados em comparação com os combustíveis convencionais, os benefícios potenciais, como uma maior eficiência energética e uma menor dependência dos recursos naturais,

podem compensar esses custos adicionais. Além disso, é importante avaliar os custos associados à produção em larga escala e ao gerenciamento dos resíduos radioativos [9].

5.1 Combustível à base de óxido misto (MOX)

O combustível à base de MOX é composto por uma mistura de óxidos de urânio e plutônio, sendo estes os elementos principais presentes nesse tipo de combustível. A proporção entre urânio e plutônio pode variar, mas geralmente é em torno de 95% de urânio e 5% de plutônio. Essa composição é fundamental para garantir o desempenho adequado do reator nuclear, pois o urânio é responsável pela fissão nuclear, enquanto o plutônio atua como um reforço na reação em cadeia [17].

O uso de combustível à base de MOX em reatores nucleares da quarta geração apresenta diversas vantagens. Uma das principais é a maior eficiência na utilização dos recursos nucleares, já que o plutônio presente no MOX é produzido a partir do reprocessamento do combustível queimado utilizado nos reatores convencionais. Outro ponto importante, o MOX permite a redução da quantidade de resíduos radioativos gerados, pois possibilita a reciclagem do plutônio e sua reintrodução no ciclo do combustível nuclear [30].

No entanto, o uso deste combustível também apresenta desafios e limitações. Um dos principais desafios está relacionado ao tratamento especial necessário para o descarte dos resíduos radioativos gerados pelo MOX. Isso ocorre porque o plutônio possui uma meia-vida longa e alta toxicidade, exigindo cuidados especiais para seu armazenamento seguro. Outro aspecto que merece ser citado, a produção e processamento do MOX requerem tecnologias complexas e sofisticadas, o que pode representar um desafio para países com menor desenvolvimento tecnológico [21].

As características físicas e químicas do combustível à base de óxido misto (MOX) são determinantes para seu desempenho em reatores nucleares. O MOX possui uma maior densidade de energia em comparação com o combustível convencional de urânio enriquecido, o que resulta em uma maior eficiência energética. Além disso, a presença de plutônio no MOX aumenta a reatividade do combustível, permitindo uma melhor regulação da potência do reator. No entanto, essas características também podem apresentar desafios operacionais, como a necessidade de controle preciso da reatividade para evitar instabilidades no reator [11].

A produção e processamento do combustível à base de óxido misto (MOX) envolvem tecnologias específicas. A fabricação do MOX é realizada por meio da mistura mecânica dos

óxidos de urânio e plutônio, seguida pela compactação e sinterização do material. Já o enriquecimento dos materiais nucleares é realizado por meio de técnicas como a difusão gasosa ou a ultracentrifugação. Essas tecnologias requerem instalações especializadas e rigorosos controles de segurança para garantir a qualidade e integridade do combustível produzido [33].

O uso prático do combustível à base de óxido misto (MOX) em reatores nucleares da quarta geração tem diversas aplicações. Uma das principais é a possibilidade de redução da quantidade de resíduos radioativos gerados, uma vez que o MOX permite a reciclagem do plutônio e sua reintrodução no ciclo do combustível nuclear. Além disso, o MOX pode ser utilizado em reatores de diferentes tipos, como os reatores rápidos de nêutrons, contribuindo para a diversificação da matriz energética nuclear [24].

5.2 Combustível à base de nitreto metálico (MN)

O combustível à base de MN é composto principalmente por nitreto de urânio e nitreto de plutônio, que são materiais altamente refratários e termicamente estáveis. Além disso, outros elementos podem ser adicionados para melhorar as propriedades do combustível, como o carbono para aumentar a condutividade térmica e a resistência mecânica. As propriedades físicas do MN incluem alta densidade, baixa expansão térmica e boa condutividade térmica. Quimicamente, o MN é altamente resistente à corrosão e oxidação em temperaturas elevadas [1].

O uso de combustível à base de nitreto metálico em reatores nucleares da quarta geração apresenta várias vantagens significativas. Em primeiro lugar, o MN possui uma maior eficiência energética em comparação com outros combustíveis nucleares convencionais, devido à sua alta densidade e capacidade de retenção de energia. Além disso, o MN tem uma menor produção de resíduos radioativos, pois permite uma maior utilização do urânio e plutônio presentes no combustível. Isso resulta em uma redução significativa na quantidade de resíduos radioativos gerados durante o processo de fissão nuclear [6].

No entanto, o desenvolvimento e a implementação do combustível à base de nitreto metálico enfrentam desafios e limitações. Um dos principais desafios é a necessidade de avanços tecnológicos na fabricação e manipulação desse tipo de combustível. O processo de fabricação do MN requer condições extremas, como altas temperaturas e pressões, além de um ambiente altamente controlado para evitar a contaminação do combustível. Além disso, a manipulação do MN também requer cuidados especiais devido à sua alta radioatividade [3].

Atualmente, estão sendo realizadas pesquisas para aprimorar o desempenho e a segurança do combustível à base de nitreto metálico. Estudos estão sendo conduzidos para avaliar a resistência à radiação do MN e seu comportamento em diferentes condições de operação, como altas temperaturas e altas taxas de queima. Essas pesquisas visam garantir que o MN possa suportar as condições extremas encontradas nos reatores nucleares da quarta geração, sem comprometer sua integridade estrutural e segurança [18].

O combustível à base de nitreto metálico também possui possíveis aplicações futuras em reatores nucleares avançados e sistemas de propulsão espacial. Devido às suas propriedades físicas e químicas únicas, o MN pode ser utilizado em reatores nucleares de alta temperatura, que têm maior eficiência energética e menor risco de acidentes nucleares. Além disso, o MN também pode ser usado como combustível em sistemas de propulsão espacial, pois possui uma alta densidade energética e é capaz de fornecer energia por longos períodos [33].

Em relação aos impactos ambientais associados ao uso do combustível à base de nitreto metálico, estudos comparativos com outras tecnologias de combustíveis nucleares existentes são necessários. Embora o MN apresente uma menor produção de resíduos radioativos durante o processo de fissão nuclear, é importante avaliar os impactos ambientais de todo o ciclo de vida do combustível, incluindo a extração e processamento dos materiais necessários para sua fabricação [13].

5.3 Combustível à base de carbeto metálico (MC)

O combustível à base de carbeto metálico (MC) apresenta características que o tornam uma opção promissora para reatores nucleares da quarta geração. Sua alta densidade e resistência à radiação são atributos desejáveis, pois permitem uma maior concentração de material físsil no núcleo do reator, resultando em uma maior eficiência energética. Além disso, a resistência à radiação do MC contribui para a redução dos danos causados pela exposição aos produtos de fissão nuclear, prolongando a vida útil do combustível [17].

Os principais componentes do combustível à base de carbeto metálico são o carboneto de urânio e o carboneto de plutônio. O UC é um composto químico que possui propriedades físicas e químicas favoráveis para sua utilização como combustível nuclear. Ele apresenta alta densidade, elevado ponto de fusão e boa condutividade térmica. Já o PuC possui características interessantes

para aplicação em reatores nucleares avançados, como sua capacidade de sustentar reações em cadeia [8].

O uso do combustível à base de carbeto metálico oferece diversas vantagens em relação a outros tipos de combustíveis nucleares. Sua maior eficiência energética se deve à alta densidade dos materiais utilizados, permitindo uma maior concentração de material físsil no núcleo do reator. Além disso, o MC apresenta menor produção de resíduos radioativos em comparação com outros combustíveis nucleares, contribuindo para a redução dos impactos ambientais associados à geração de energia nuclear [28].

No entanto, o desenvolvimento e utilização do combustível à base de carbeto metálico enfrentam desafios tecnológicos e científicos. Um dos principais desafios é encontrar materiais resistentes ao calor e à corrosão para revestir os elementos combustíveis. O MC opera em condições extremas de temperatura e pressão, o que exige materiais capazes de suportar essas condições sem comprometer a integridade do combustível. Além disso, a corrosão causada pelos produtos de fissão nuclear também é uma preocupação, pois pode levar à liberação de material radioativo [21].

Pesquisas estão em andamento para aprimorar o desempenho do combustível à base de carbeto metálico. Uma das abordagens é a adição de elementos de liga, como o molibdênio e o nióbio, para melhorar sua estabilidade térmica e reduzir a formação de gases nobres durante a operação do reator. Essas adições podem aumentar a resistência do MC às altas temperaturas e prolongar sua vida útil [22].

5.4 Combustível à base de líquido iônico (IL)

O combustível à base de líquido iônico (IL) é uma alternativa promissora para reatores nucleares da quarta geração devido às suas características únicas. Composto por íons líquidos, o IL é um material que apresenta alta estabilidade térmica e química, além de baixa pressão de vapor. Essas propriedades tornam o IL altamente resistente a condições extremas de temperatura e pressão, o que é essencial para o funcionamento seguro e eficiente dos reatores nucleares [16].

Em comparação com os combustíveis convencionais, o uso do combustível à base de líquido iônico oferece diversas vantagens. A maior estabilidade térmica e química do IL permite que ele seja utilizado em temperaturas mais elevadas sem sofrer degradação ou perda de eficiência. Além disso, sua baixa pressão de vapor reduz os riscos associados a vazamentos e explosões. Outra

vantagem significativa é a capacidade do IL em reter produtos de fissão, minimizando assim os riscos de contaminação radioativa [2].

Um dos principais desafios é encontrar materiais compatíveis com o IL, uma vez que nem todos os materiais são capazes de resistir às condições extremas impostas pelo reator nuclear. Além disso, o processo de fabricação do combustível à base de líquido iônico é complexo e requer técnicas avançadas [15].

Para superar esses desafios, pesquisas estão em andamento para melhorar as propriedades do combustível à base de líquido iônico. Uma área de pesquisa promissora é a busca por novos líquidos iônicos mais eficientes e estáveis. Além disso, o desenvolvimento de técnicas avançadas de fabricação pode permitir a produção em larga escala do combustível à base de líquido iônico. Outra linha de pesquisa importante é a investigação dos efeitos da radiação no comportamento do combustível, visando garantir sua segurança e eficiência durante o funcionamento do reator nuclear [23].

Além dos reatores nucleares, o combustível à base de líquido iônico também apresenta aplicações potenciais em outras áreas. Por exemplo, ele pode ser utilizado em sistemas de armazenamento e transporte seguro de energia nuclear, contribuindo para a diversificação das fontes energéticas. Além disso, o IL pode ser empregado em células a combustível, que são dispositivos que convertem energia química diretamente em eletricidade. A indústria química também pode se beneficiar do uso do combustível à base de líquido iônico, uma vez que ele pode ser utilizado como solvente ou catalisador em diversas reações químicas [18].

Em termos ambientais, o uso do combustível à base de líquido iônico apresenta vantagens significativas em relação aos combustíveis fósseis. Ao reduzir as emissões de gases de efeito estufa, o IL contribui para a mitigação das mudanças climáticas. Adicionalmente a minimização dos resíduos radioativos é uma característica importante do combustível à base de líquido iônico, uma vez que ele retém os produtos de fissão dentro do reator nuclear, evitando sua dispersão no meio ambiente [10].

6 CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DOS NOVOS COMBUSTÍVEIS NUCLEARES

Os novos combustíveis nucleares apresentam características que podem aumentar a eficiência e segurança dos reatores nucleares da quarta geração. Uma dessas características é a capacidade de melhorar o desempenho térmico dos reatores, permitindo um aproveitamento mais eficiente do calor gerado durante o processo de fissão nuclear. Estes combustíveis possuem propriedades que reduzem a probabilidade de acidentes nucleares, como uma menor tendência à formação de produtos de fissão instáveis [11].

Outra propriedade dos novos combustíveis nucleares é a capacidade de reduzir a quantidade de resíduos radioativos gerados durante o processo de geração de energia. Isso ocorre porque esses combustíveis são projetados para ter uma maior eficiência na utilização do material físsil, resultando em uma menor produção de subprodutos radioativos. Alguns desses combustíveis possuem propriedades que permitem a transmutação dos resíduos radioativos existentes em elementos menos perigosos [21].

Diferentes tipos de combustíveis nucleares estão sendo desenvolvidos para os reatores nucleares da quarta geração. Um exemplo é o combustível à base de tório, que possui vantagens como uma maior abundância na natureza e uma menor probabilidade de proliferação nuclear. Outro tipo é o combustível à base de urânio enriquecido, que apresenta vantagens como uma maior densidade energética e uma maior estabilidade térmica [8].

No entanto, o desenvolvimento e implementação dos novos combustíveis nucleares enfrentam desafios e obstáculos. Um desses desafios é a necessidade de investimentos em pesquisa e desenvolvimento para aprimorar as tecnologias existentes e desenvolver novas soluções. Bem como, questões relacionadas à segurança e ao gerenciamento dos resíduos radioativos também representam obstáculos importantes [27].

O uso dos novos combustíveis nucleares também tem implicações econômicas e políticas importantes. O custo de produção desses combustíveis pode ser um desafio inicial, mas espera-se que com o avanço das tecnologias e a escala de produção, os custos sejam reduzidos. Além disso, a dependência de recursos naturais para a produção desses combustíveis pode afetar a geopolítica da energia nuclear [24].

6.1 Estabilidade térmica e química dos novos combustíveis nucleares

A estabilidade térmica e química dos novos combustíveis nucleares desempenha um papel fundamental no funcionamento seguro e eficiente dos reatores nucleares de quarta geração. A capacidade de resistir a altas temperaturas e baixa volatilidade é uma característica desejável para esses combustíveis, pois garante que eles possam operar em condições extremas sem sofrer danos estruturais. Do ponto de vista da estabilidade térmica, ela contribui para a eficiência do reator, permitindo um melhor controle da temperatura e minimizando perdas de energia [21].

No entanto, a busca por combustíveis nucleares mais estáveis termicamente enfrenta diversos desafios. Um dos principais é encontrar materiais que possam suportar altas temperaturas sem sofrer deformações ou falhas estruturais. Isso requer o desenvolvimento de ligas metálicas ou cerâmicas com propriedades termomecânicas adequadas, capazes de resistir às tensões térmicas e mecânicas impostas pelo ambiente do reator nuclear [7].

Além da estabilidade térmica, a estabilidade química dos novos combustíveis nucleares também é crucial. A resistência à corrosão e à interação com outros materiais presentes no reator são aspectos importantes a serem considerados. A corrosão pode levar ao enfraquecimento do material do combustível, comprometendo sua integridade estrutural e liberando produtos químicos indesejáveis no sistema do reator. Portanto, é necessário desenvolver materiais que sejam resistentes à corrosão em ambientes agressivos [9].

Para melhorar a estabilidade térmica e química dos combustíveis nucleares, várias estratégias têm sido utilizadas. Uma delas é o uso de revestimentos protetores, que podem ser aplicados na superfície do combustível para aumentar sua resistência à corrosão e à interação com outros materiais. Além disso, aditivos podem ser adicionados aos combustíveis para reduzir sua volatilidade e melhorar sua estabilidade térmica [23].

Recentemente, houveram avanços significativos na pesquisa de novos materiais para combustíveis nucleares que apresentam maior estabilidade térmica e química. Por exemplo, ligas metálicas de alta temperatura, como as ligas de molibdênio e tungstênio, têm mostrado promessa como materiais para combustíveis nucleares devido às suas excelentes propriedades termomecânicas e resistência à corrosão [12].

No entanto, apesar dos avanços recentes, ainda existem desafios tecnológicos e econômicos a serem superados no desenvolvimento de combustíveis nucleares ainda mais estáveis termicamente e quimicamente. A seleção de materiais adequados, a otimização dos processos de

fabricação e a garantia da segurança operacional são alguns dos desafios enfrentados pelos pesquisadores nessa área. Outro ponto que merece destaque é, os custos associados ao desenvolvimento e implementação desses novos combustíveis também devem ser considerados [20].

6.2 Eficiência energética dos novos combustíveis nucleares

A eficiência energética é um fator crucial na utilização dos novos combustíveis nucleares. A busca por uma maior eficiência visa maximizar a quantidade de energia gerada a partir do processo de fissão nuclear. Isso é importante não apenas para aumentar a produção de energia elétrica, mas também para otimizar o uso dos recursos naturais e reduzir os impactos ambientais associados à geração de energia. A eficiência energética dos novos combustíveis nucleares está diretamente relacionada à sua capacidade de aproveitar ao máximo o potencial energético contido nos materiais nucleares [4].

Os avanços tecnológicos têm sido fundamentais para o desenvolvimento dos novos combustíveis nucleares. Diversas inovações têm possibilitado melhorias significativas na eficiência energética desses combustíveis. Um exemplo é o uso de revestimentos cerâmicos nas pastilhas de combustível, que aumentam a resistência ao calor e à corrosão, permitindo um funcionamento mais seguro e eficiente dos reatores nucleares. A utilização de novos materiais e técnicas de fabricação tem contribuído para o aumento da densidade energética dos combustíveis nucleares, possibilitando uma maior produção de energia [20].

A maior eficiência energética desses combustíveis permite uma maior geração de energia elétrica a partir de uma quantidade menor de material nuclear. Isso resulta em uma redução dos custos de produção e do volume de resíduos radioativos gerados. Além disso, os novos combustíveis nucleares apresentam um ciclo de vida mais longo, o que reduz a necessidade de reabastecimento frequente dos reatores e aumenta a disponibilidade de energia [7].

No entanto, os novos combustíveis nucleares também apresentam desvantagens em relação aos combustíveis tradicionais. Um dos principais desafios é a segurança no manuseio e armazenamento desses materiais altamente radioativos. Além disso, o desenvolvimento e implementação das tecnologias necessárias para utilizar esses combustíveis requerem investimentos significativos em pesquisa e infraestrutura. Outra desvantagem é a dependência

desses materiais raros e não renováveis, como o urânio enriquecido e o plutônio-239, o que pode levar a problemas geopolíticos e escassez futura [16].

Os impactos ambientais associados ao uso dos novos combustíveis nucleares são complexos e variados. Por um lado, esses combustíveis têm potencial para reduzir as emissões de gases do efeito estufa quando comparados aos combustíveis fósseis. No entanto, a produção, extração e processamento desses materiais nucleares podem gerar impactos ambientais significativos, como a contaminação do solo e da água. O armazenamento seguro dos resíduos radioativos é um desafio que precisa ser enfrentado para minimizar os riscos ambientais associados à utilização dos novos combustíveis nucleares [11].

Um dos principais desafios é a aceitação pública dessas tecnologias, devido aos riscos associados à energia nuclear. Somado a isto temos a regulamentação e o licenciamento de reatores nucleares com esses combustíveis requerem um rigoroso controle de segurança e uma infraestrutura adequada. Outro obstáculo é a necessidade de investimentos em pesquisa e desenvolvimento para aprimorar as tecnologias existentes e superar os desafios técnicos [3].

6.3 Segurança e estabilidade dos novos combustíveis nucleares

Os principais desafios relacionados à segurança e estabilidade dos novos combustíveis nucleares para reatores da quarta geração são importantes para garantir a operação segura desses sistemas. Um dos desafios é a necessidade de desenvolver materiais que possuam alta resistência à radiação, uma vez que os reatores da quarta geração operam em condições mais extremas do que os reatores convencionais. Também é necessário garantir a estabilidade do combustível durante todo o ciclo de vida do reator, evitando a formação de produtos de fissão instáveis ou indesejados [21].

As características dos novos combustíveis nucleares contribuem significativamente para a melhoria da segurança e estabilidade dos reatores. Por exemplo, o uso de combustíveis com maior densidade energética permite reduzir o tamanho do núcleo do reator, diminuindo assim os riscos associados à liberação de material radioativo em caso de acidentes. Além disso, alguns dos novos combustíveis nucleares possuem maior resistência térmica, o que contribui para evitar falhas estruturais e aumentar a confiabilidade operacional dos reatores [20].

Diversas tecnologias têm sido utilizadas na produção dos novos combustíveis nucleares, impactando diretamente na segurança e estabilidade dos reatores. Uma das tecnologias

mais promissoras é a utilização de revestimentos cerâmicos nos elementos combustíveis, que aumentam a resistência à corrosão e à oxidação. Além disso, técnicas avançadas de fabricação permitem obter um controle mais preciso das características físicas e químicas do combustível, contribuindo para a estabilidade do sistema [29].

Avanços científicos e tecnológicos têm sido realizados para garantir a segurança e estabilidade dos novos combustíveis nucleares. Por exemplo, estudos sobre o comportamento dos materiais em condições de radiação intensa têm permitido o desenvolvimento de ligas metálicas mais resistentes. As simulações computacionais avançadas também têm sido utilizadas para prever o desempenho do combustível em diferentes condições operacionais, auxiliando no projeto de reatores mais seguros [23].

Testes e simulações são fundamentais para avaliar a segurança e estabilidade dos novos combustíveis nucleares antes de sua implementação em reatores. Testes experimentais são realizados em laboratórios especializados, onde é possível reproduzir as condições extremas encontradas nos reatores. Já as simulações computacionais são utilizadas para analisar o comportamento do combustível em diferentes cenários de acidentes, permitindo identificar possíveis falhas e propor melhorias no projeto [14].

Medidas de controle e monitoramento são adotadas para garantir a segurança e estabilidade dos reatores que utilizam os novos combustíveis nucleares. Um exemplo é a utilização de sistemas de detecção de falhas, que permitem identificar rapidamente qualquer anomalia no funcionamento do reator. Já os sistemas de monitoramento contínuo permitem acompanhar as condições operacionais do combustível, garantindo sua integridade ao longo do tempo [27].

7 OPORTUNIDADES PARA O BRASIL

Antes de chegar à conclusão, é fundamental destacar as oportunidades que se apresentam para o Brasil na produção de combustíveis de quarta geração, com um foco especial no urânio, onde o país possui um potencial significativo e tecnologia avançada [28].

O MME tem empreendido um esforço notável na prospecção de urânio, preparando o terreno para futuras explorações. Essa iniciativa é crucial, pois o Brasil possui reservas consideráveis de urânio não exploradas, o que coloca o país em uma posição estratégica na produção de combustíveis nucleares avançados [24].

O Brasil detém expertise no enriquecimento de urânio, sendo capaz de produzir combustíveis nucleares de alta qualidade. Com o aumento da produção de ultracentrífugas pela MB (Marinha do Brasil), a INB (Indústrias Nucleares do Brasil) poderá não apenas fornecer combustível para abastecer 100% de suas usinas nucleares, como Angra 1, 2 e a futura 3, mas também explorar o mercado internacional. A crescente demanda por projetos de reatores avançados em desenvolvimento ao redor do mundo representa uma oportunidade única para o Brasil se posicionar como um fornecedor confiável de combustíveis nucleares mundial [29].

Neste contexto, é essencial explorar todas as capacidades e a vocação do Brasil em produzir combustível nuclear, não apenas para atender às necessidades domésticas, mas também para estabelecer uma presença sólida no mercado internacional.

Investir nas tecnologias de combustíveis nucleares de quarta geração é crucial para o futuro sustentável da energia nuclear. O Brasil possui recursos, conhecimento e tecnologia para desempenhar um papel de destaque nesse cenário, aproveitando as oportunidades que se apresentam na produção de urânio e no enriquecimento desse material. Ao fazê-lo, o país pode se tornar um ator significativo no fornecimento de combustíveis nucleares avançados, contribuindo para o avanço da energia nuclear e para a redução das emissões de carbono em todo o mundo.

O desenvolvimento e a produção de combustíveis nucleares de quarta geração não só impulsionam a indústria nuclear brasileira, mas também fortalecem a base tecnológica do país. Esse avanço é essencial para atender às metas de desenvolvimento sustentável, uma vez que a energia nuclear, quando gerada de forma segura e eficiente, desempenha um papel fundamental na diversificação da matriz energética, reduzindo a dependência de fontes mais poluentes [31].

O Brasil tem a oportunidade de estabelecer parcerias estratégicas com nações que estão investindo no desenvolvimento de reatores nucleares de quarta geração. Essas colaborações podem não apenas acelerar o progresso tecnológico, mas também abrir portas para a exportação de combustíveis nucleares avançados, contribuindo para a balança comercial do país e promovendo a cooperação internacional na área nuclear [28].

Ao investir na produção de combustíveis nucleares de quarta geração, o Brasil também reforça seu compromisso com a segurança nuclear e a gestão responsável dos resíduos radioativos. Novas tecnologias de combustíveis oferecem a oportunidade de reduzir os resíduos de longa vida útil, minimizando os impactos ambientais e promovendo uma abordagem mais sustentável para a energia nuclear [16].

Em resumo, o Brasil está diante de uma janela de oportunidade única para se tornar um líder na produção de combustíveis nucleares de quarta geração. Com seus recursos naturais, conhecimento técnico e tecnologia de enriquecimento, o país pode desempenhar um papel crucial no avanço da energia nuclear globalmente. Ao explorar suas capacidades e colaborar internacionalmente, o Brasil não apenas contribuirá para um futuro energético mais limpo e seguro, mas também fortalecerá sua posição no cenário nuclear mundial, gerando benefícios econômicos e tecnológicos a longo prazo [26]. É crucial que o país aproveite essa oportunidade para promover o desenvolvimento sustentável e a segurança energética em um mundo cada vez mais consciente da importância das fontes de energia limpa e eficiente.

8 CONCLUSÃO

A partir da análise das principais características dos reatores nucleares de quarta geração, é possível identificar suas diferenças em relação às gerações anteriores. Os reatores de quarta geração são projetados para serem mais seguros, eficientes e sustentáveis. Eles utilizam tecnologias avançadas que permitem um melhor aproveitamento do combustível nuclear, reduzindo a quantidade de resíduos radioativos gerados. Além disso, esses reatores possuem sistemas de segurança passivos, que não dependem da intervenção humana para garantir a estabilidade do processo de fissão nuclear.

As novas tecnologias de combustíveis para reatores nucleares de quarta geração apresentam diversas vantagens em relação aos combustíveis utilizados nas gerações anteriores. Uma das principais vantagens é a maior eficiência energética proporcionada por essas tecnologias. Isso ocorre porque os novos combustíveis permitem uma maior liberação de energia durante o processo de fissão nuclear. Adicionalmente, esses combustíveis também contribuem para a redução dos resíduos radioativos gerados, o que representa um avanço significativo em termos de segurança e sustentabilidade.

No entanto, o desenvolvimento das novas tecnologias de combustíveis para reatores nucleares de quarta geração enfrenta desafios técnicos e científicos importantes. Um desses desafios está relacionado à necessidade de se encontrar materiais capazes de suportar as altas temperaturas e pressões presentes nos reatores nucleares. Também é necessário desenvolver métodos eficientes para a produção em larga escala desses combustíveis, de forma a viabilizar sua utilização em escala comercial.

Existem diferentes tipos de combustíveis que podem ser utilizados nos reatores nucleares de quarta geração. Um exemplo é o combustível líquido, que consiste em uma solução contendo urânio ou plutônio dissolvido em um solvente. Esse tipo de combustível apresenta vantagens como a maior flexibilidade no controle da reação nuclear e a possibilidade de reciclagem do combustível utilizado. Outro tipo de combustível é o cerâmico, que consiste em partículas sólidas contendo urânio ou plutônio. Esse tipo de combustível possui uma maior resistência térmica e química, o que contribui para a segurança e eficiência do reator nuclear.

As novas tecnologias de combustíveis para reatores nucleares de quarta geração possuem diversas aplicações potenciais. Uma delas é a produção de energia elétrica, que pode ser realizada de forma mais eficiente e sustentável por meio dessas tecnologias. Essas tecnologias também podem ser utilizadas na dessalinização da água, contribuindo para suprir a crescente demanda por água potável em diversas regiões do mundo.

No que diz respeito aos impactos ambientais, as novas tecnologias de combustíveis para reatores nucleares de quarta geração podem contribuir significativamente para a redução das emissões de gases do efeito estufa. Isso ocorre porque essas tecnologias permitem uma maior eficiência energética, o que reduz a necessidade de utilização de fontes energéticas baseadas em combustíveis fósseis. A redução dos resíduos radioativos gerados por essas tecnologias também representa um benefício ambiental importante.

8.1 Sugestões para futuros trabalhos

É essencial a continuidade nas pesquisas sobre as novas tecnologias de combustíveis da quarta geração, trazendo maior capacidade de produção para o país, focando em produzir menos rejeitos e tornando sua matriz energética mais diversificada e menos poluente, contribuindo assim com o desenvolvimento do Brasil em diversos aspectos.

Outra sugestão de trabalho seria com possíveis novos materiais mais resistentes à corrosão e aptos a operarem em condições mais extremas de temperatura e pressão, viabilizando a operação com os novos combustíveis nos reatores da quarta geração, com realização de testes e experimentos adequados e confiáveis.

Por último, sempre envidar esforços em trabalhos os quais visem a possibilidade de fontes de energia mais limpa e sustentável, como a de Hidrogênio através da energia nuclear, buscando alternativas para um futuro menos poluente.

REFERÊNCIAS

- [1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Disponível em: <<https://pris.iaea.org/pris/home.aspx>>. Acesso em: 06 set. 2023.
- [2] TELLI, E. D. **Avaliação de um injetor automotivo para geração de gotas no estudo do processo de resfriamento do núcleo de reatores nucleares a água pressurizada.** Disponível em: <<https://repositorio.ucs.br/xmlui/handle/11338/6464>>. Acesso em: 06 set. 2023.
- [3] BATISTA, A. S. **Esforços tecnológicos para controle da contaminação ambiental por radionuclídeos após acidente nuclear.** Disponível em: <https://schenautomacao.com.br/cbge2022/envio/files/trabalho1_128.pdf>. Acesso em: 10 set. 2023.
- [4] KAMIOJI, M. I. **O medo da energia nuclear-Energia nuclear, segurança e medo: o discurso do Jornal Folha de São Paulo na história das usinas nucleares (1979-2013).** Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8138/tde-27122021-182325/publico/2021_MarlyIyoKamioji_VCorr.pdf>. Acesso em: 10 set. 2023.
- [5] KNEIPP, F. C. **Estudo de viabilidade do programa nacional de energia nuclear em relação às termelétricas fósseis dentro do sistema termelétrico brasileiro.** Repositório UFMG, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/39372>>. Acesso em: 07 set. 2023.
- [6] ALCÂNTARA, V. E.; MESQUITA, A. Z. Técnicas de Análise e Gerenciamento de Riscos para Melhorias no Controle, Segurança e Licenciamento de Centrais Nucleares e Instalações Radioativas. *Brazilian Applied Science Review*, [S.l.], v. 4, n. 8, p. 24162-19342, 2021. Disponível em: <<https://www.brazilianjournals.com/index.php/BASR/article/download/24162/19342>>. Acesso em: 11 set. 2023.
- [7] WITCHROWSKI, C. D. **Reatores a tório: análise evolutiva e possibilidade de conversão para reatores PWR.** 2017. Disponível em: <<https://bdex.eb.mil.br/jspui/bitstream/123456789/9090/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20-%20Caio%20da%20Costa%20Wichrowski.pdf>>. Acesso em: 11 set. 2023.
- [8] KONIGAME, V. C.; CONTI, T. N. Estudo do reator nuclear de 4ª geração "Very High Temperature Reactor" - VHTR. *Revista Engenharia e Tecnologia Aplicada*, [S.l.], v. 4, n. 1, p. 1-10, 2020. Disponível em: <<http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/31143>>. Acesso em: 12 set. 2023.

- [9] ALVES FILHO, H.; SILVA, F. C. Seção Especial sobre Energia Nuclear-Apresentação. **VETOR-Revista de Ciências Exatas e ...**, [S.l.], 2021. Disponível em: <<https://periodicos.furg.br/vetor/article/download/13704/9114>>. Acesso em: 20 set. 2023.
- [10] KOMATSU, R. C. **Produção de hidrogênio via nuclear com reatores de alta temperatura**. 2018. Disponível em: <<https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/17872>>. Acesso em: 20 set. 2023.
- [11] MESQUITA, A. Z.; PEIXOTO, S. M.; MENEZES, M. Â. B. C. **Simulação neutrônica do reator nuclear de pesquisa TRIGA, do CDTN, utilizando os códigos Monte Carlo Serpent e MCNPX. Tecnologia**, [S.l.], v. 20, n. 1, p. 1-10, 2017. Disponível em: <<https://periodicos.unifor.br/tec/article/view/6277>>. Acesso em: 10 ago. 2023.
- [12] GOLDEMBERG, J. Atualidade e perspectivas no uso de biomassa para geração de energia. **Revista Virtual de Química**, 2016. Disponível em: <<http://static.sites.s bq.org.br/rvq.s bq.org.br/pdf/v9n1a04.pdf>>. Acesso em: 12 set. 2023.
- [13] PONTES, FJPR. **Autossuficiência na produção de combustível nuclear: desenvolvimento tecnológico e soberania**. 2020. Disponível em: <<https://repositorio.esg.br/handle/123456789/1158>>. Acesso em: 13 set. 2023.
- [14] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Disponível em: <<https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/generation-iv-nuclear-reactors.aspx>>. Acesso em: 15 ago. 2023.
- [15] FERREIRA, F. M. Submarino nuclear. **O Periscópio**, 2018. Disponível em: <<http://www.portaldeperiodicos.marinha.mil.br/index.php/periscopio/article/download/1926/1903>>. Acesso em: 22 set. 2023.
- [16] SILVA, P. C. **Mudanças climáticas e guerra na Ucrânia: uma possível retomada da energia nuclear**. 2022. Disponível em: <<http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/5035>>. Acesso em: 16 set. 2023.
- [17] FONSECA, C. J. **Usinas Nucleares: Análise exploratória, concepção, aplicação e análise quantitativa de dados de uma pesquisa de conhecimento à respeito das tecnologias nucleares na comunidade discente da Faculdade UnB-FGA Gama**. 2017. Disponível em: <<https://fga.unb.br/tcc/energia/tcc-2017.1-engenharia-de-energia/cloves-junior-da-fonseca/v1-tcc-1-cl-ves-jr.-da-fonseca.pdf>>. Acesso em: 28 set. 2023.
- [18] MURAYAMA, CCS; SCHMID, FP. **Perspectivas para a energia nuclear no Brasil**. 2021. Disponível em: <<https://dspace.mackenzie.br/handle/10899/29191>>. Acesso em: 20 set. 2023.

- [19] GAP GUIMARÃES, N. N. de ALMEIDA. Mapa tecnológico para inserção de reatores de tório na agenda política do Brasil. **Revista Brasileira de Energia**, [S.l.], 2022. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Gustavo-Guimaraes-12/publication/359652789_Mapa_tecnologico_para_insercao_de_reatores_de_torio_na_agenda_politica_do_Brasil/links/6282a3c77a08f263d5504fc5/Mapa-tecnologico-para-insercao-de-reatores-de-torio-na-agenda-politica-do-Brasil.pdf>. Acesso em: 10 out. 2023
- [20] CORRÊA, F. G. *Brazilian nuclear industries: their technologies and their perspectives for the 21st century*. **Revista Intellector-ISSN 1807 ...**, 2019. Disponível em: <<http://revistaintellektor.cenegri.org.br/index.php/intellektor/article/view/308>>. Acesso em: 23 set. 2023.
- [21] VAZ, F. A. **A inclusão das Novas Tecnologias de Geração de Energia Nuclear nas Políticas Energéticas Europeias**. 2022. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/144631/2/588368.pdf>>. Acesso em: 25 set. 2023.
- [22] COSTA, M. L. M. **Produção científica de teses e dissertações na área de reatores nucleares no Brasil**. 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/30702>>. Acesso em: 26 set. 2023.
- [23] MACEDO, A. A. P. **Proposta de um reator rápido refrigerado a gás utilizando transurânicos**. 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUBD-ADSM6L>>. Acesso em: 4 out. 2023.
- [24] MATA, JFC. **O Papel das Metodologias de Análise Probabilística de Segurança no Processo de Licenciamento de Reatores Nucleares**. 2016. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/54693490/Dissertacao_Jonatas_-_final.pdf>. Acesso em: 5 out. 2023.
- [25] SCARI, M. E. **Estudo termofluidodinâmico de reatores nucleares avançados de alta temperatura utilizando o RELAP5-3D**. 2017. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUBD-AW2MH4>>. Acesso em: 6 out. 2023.
- [26] MOREIRA, UG; DOMINGUEZ, DS; MAZAIRA, LYR. Fluidodinâmica Computacional na Simulação Realística de Reatores Nucleares de Leito de Bolas Operando a Potência Reduzida em Condições de Perda de **Revista ...**, [S.l.], 2018. Disponível em: <<http://www.ojs.unirg.edu.br/index.php/1/article/view/2491>>. Acesso em: 6 out. 2023.
- [27] MESQUITA, A. Z.; MOREIRA, R. M. Disciplina: História da Ciência–Tecnologia Nuclear, contribuição para a formação dos estudantes de pós-graduação em Engenharia. 2017. Disponível em: <<http://www.repositorio.cdn.br:8080/handle/123456789/1297>>. Acesso em: 7 out. 2023.
- [28] AZEVEDO, FJM. **Radiofármacos, radioisótopos que salvam vidas: proposta para alcançar a independência tecnológica nacional na produção de radiofármacos**. 2018.

Disponível em: <<https://repositorio.esg.br/handle/123456789/880>>. Acesso em: 7 out. 2023.

- [29] SANTIAGO, M. S.; RIBEIRO, L. B. de; MATURANA, M. C. **Barreiras para a implantação de Reatores Modulares de Pequeno Porte no Brasil**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Alan-Avelar/publication/364326165_BARREIRAS_PARA_A_IMPLANTACAO_DE_REATORES_MODULARES_DE_PEQUENO_PORTE_NO_BRASIL/links/6348bc8576e39959d6bfd3b5/BARREIRAS-PARA-A-IMPLANTACAO-DE-REATORES-MODULARES-DE-PEQUENO-PORTE-NO-BRASIL.pdf>. Acesso em: 10 out. 2023.
- [30] GÁMEZ RODRÍGUEZ, A. **Uma metodologia termo-fluido-dinâmica computacional para avaliação de reatores que operam a altíssimas temperaturas com leitos de combustíveis esféricos**. 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/36154>>. Acesso em: 11 out. 2023.
- [31] PIRES, A. Entrevistas com especialistas: as diferentes visões a respeito da energia nuclear no Brasil. **Boletim de Conjuntura**, 2019. Disponível em: <<https://bibliotecadigital.fgv.br/ojs/index.php/bc/article/download/87288/82101>>. Acesso em: 12 out. 2023.
- [32] GUIMARÃES, G.A.P.; ALMEIDA, N.N. A importância do Fórum Internacional da Quarta Geração - GIF IV para a construção de Reatores de Tório no Brasil. **7º Encontro Nacional da Associação Brasileira de Relações Internacionais**. Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Gustavo-Guimaraes-12/publication/360816137_A_IMPORTANCIA_DO_FORUM_INTERNACIONAL_DA_QUARTA_GERACAO_-_GIF_IV_PARA_A_CONSTRUCAO_DE_REATORES_DE_TORIO_NO_BRASIL/links/628cd70535f9c61b7f8fef63/A-IMPORTANCIA-DO-FORUM-INTERNACIONAL-DA-QUARTA-GERACAO-GIF-IV-PARA-A-CONSTRUCAO-DE-REATORES-DE-TORIO-NO-BRASIL.pdf>. Acesso em: 13 out. 2023.
- [33] INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. **Desenvolvimento de um escâner de varredura para avaliar a distribuição do combustível ²³⁵U nas placas de combustíveis nucleares**. Disponível em: <https://www.ipen.br/portal_por/conteudo/gestao_projetos/Projeto_46_original.pdf>. Acesso em: 16 out. 2023.