



**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**

**Autarquia Associada à Universidade de São Paulo**

# **Prospecção Tecnológica de Ciclos de Combustível e Reatores Nucleares para Emprego em Propulsão Naval**

**Gleison Wagner Balduino**

**Dissertação apresentada como parte dos  
requisitos para obtenção do Grau de  
Mestre em Tecnologia Nuclear - Reatores**

**Orientador:  
Prof. Dr. Delvonei Alves de Andrade**

**São Paulo**

**2023**

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
**Autarquia Associada à Universidade de São Paulo**

**Prospecção Tecnológica de Ciclos de Combustível e Reatores Nucleares para  
Emprego em Propulsão Naval**

**Versão Corrigida**

**Versão Original disponível no IPEN**

**GLEISON WAGNER BALDUINO**

**Dissertação apresentada como parte dos  
requisitos para obtenção do Grau de  
Mestre em Ciências na Área  
de Tecnologia Nuclear - Reatores**

**Orientador:  
Prof. Dr. Delvonei Alves de Andrade**

**São Paulo  
2023**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Como citar:

BALDUINO, G. W.. ***Prospecção Tecnológica de Ciclos de Combustível e Reatores Nucleares para Emprego em Propulsão Naval***. 2023. 161 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN, São Paulo. Disponível em: <<http://repositorio.ipen.br/>> (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de geração automática da Biblioteca IPEN, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Balduino, Gleison Wagner  
Prospecção Tecnológica de Ciclos de Combustível e Reatores Nucleares para Emprego em Propulsão Naval / Gleison Wagner Balduino; orientador Delvonei Alves Andrade. -- São Paulo, 2023.  
153 f.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear (Reatores) -- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2023.

Ciclo do combustível nuclear. 2. Reciclagem do combustível nuclear. 3. Combustíveis de fusão nuclear. 4. Reatores de fissão nuclear. 5. Reatores de fusão nuclear. I. Andrade, Delvonei Alves, orient. II. Título.

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

Autor: Gleison Wagner Balduino

Título: Prospecção Tecnológica de Ciclos de Combustível e Reatores Nucleares para Emprego em Propulsão Naval.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Data: 01 / 09 / 2023

### **Banca Examinadora**

Prof. Dr.: Delvonei Alves de Andrade

Instituição: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN

Julgamento:

Prof. Dr.: Ricardo Paulino Marques

Instituição: Escola Politécnica da USP

Julgamento:

Prof. Dr.: Luciano Ondir Freire

Instituição: Marinha do Brasil

Julgamento:

## DEDICATÓRIA

### GLORIA IN EXCELSIS DEO

Pela existência, por esta vida e por tudo, dedico este trabalho à Deus.  
Também o dedico a minha família por todo o amor, compreensão, incentivo e suporte.

## **AGRADECIMENTOS**

IN NECESSARIIS UNITAS, IN DUBIIS LIBERTAS, IN OMNIBUS CARITAS.

Agradeço primeiramente ao Prof. Dr. Delvonei Alves de Andrade, orientador deste trabalho, pela oportunidade, atenção, compreensão e cordialidade em todos os momentos.

Ao Dr. Luciano Ondir Freire, agradeço pela parceria, apoio e sugestões de imprescindível e inestimável valor para a consecução deste trabalho.

Agradeço à Marinha do Brasil e ao Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo pela oportunidade de realização deste trabalho e por todas as oportunidades a mim já ofertadas.

Agradeço ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares e à Universidade de São Paulo, seus professores e funcionários diretos e indiretos pela oportunidade, presteza, prontidão e profissionalismo exemplares.

Agradeço também aos integrantes da banca julgadora deste trabalho pelo tempo, dedicação e conhecimentos agregados.

## RESUMO

BALDUINO, G. W. . *Prospecção Tecnológica de Ciclos de Combustível e Reatores Nucleares para Emprego em Propulsão Naval*. 2023. 161 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN, São Paulo. Disponível em: <<http://repositorio.ipen.br/>> (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

Este trabalho apresenta um estudo sistematizado de ciclos de combustível de fusão e de fissão nuclear com foco na identificação do estado da arte em soluções de reatores nucleares de fissão e de fusão nuclear que tenham potencial de emprego em propulsão naval. Neste intento são descritos diversos ciclos de combustíveis nucleares tanto para reações de fissão nuclear bem como para reações de fusão nuclear. Em meio a cada ciclo são apresentadas soluções de reatores nucleares em diversos níveis de maturidade tecnológica. Cada solução é então analisada e classificada quanto a sua maturidade tecnológica, maturidade produtiva, estágio de desenvolvimento, possibilidade de escalonamento e portabilidade para o emprego naval, adequação quanto a requisitos de doutrinas nacionais de desenvolvimento, quanto ao passivo ambiental vinculado e quanto a dificuldade tecnológica de cada solução tendo em conta o parque industrial nacional. As soluções são organizadas em tabelas e discutidas, pontos positivos para emprego na propulsão naval são apresentados, itens, soluções e linhas de desenvolvimento tecnológico são sugeridos e um prognóstico futuro é apresentado ao final do trabalho, oferecendo ao leitor um panorama atualizado de soluções tecnológicas e de rumos do desenvolvimento tecnológico em andamento.

**Palavras-chave:** Combustível nuclear de fissão e de fusão, reatores de fissão e fusão nuclear e projetos de reatores nucleares contemporâneos.

## ABSTRACT

BALDUINO, G. W. . *Prospecção Tecnológica de Ciclos de Combustível e Reatores Nucleares para Emprego em Propulsão Naval*. 2023. 161 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN, São Paulo. Disponível em: <<http://repositorio.ipen.br/>> (data de consulta no formato: dd/mm/aaaa)

This work presents a systematic study of nuclear fission and fusion fuel cycles with a focus on identifying the state of the art solutions for nuclear fission and nuclear fusion reactors that have potential for use in naval propulsion. In this attempt, several cycles of nuclear fuels are described for both nuclear fission reactions and nuclear fusion reactions. In the middle of each cycle, nuclear reactor solutions at different levels of technological maturity are presented. Each solution is then analyzed and classified according to its technological maturity, productive maturity, stage of development, possibility of scaling and portability for naval use, adequacy in relation to the requirements of national development doctrines, in relation to the linked environmental liability and in terms of technological difficulty of each solution taking into account the national industrial park. The solutions are organized in tables and discussed, positive points for use in naval propulsion are presented, items, solutions and lines of technological development are suggested and a future prognosis is presented at the end of the work, offering the reader an updated panorama of technological solutions and of technological development in progress.

**Key-words:** Nuclear fission and fusion fuel, nuclear fission and fusion reactors and contemporary energy reactor designs.



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações básicas do reator AP1000. ....	44
Tabela 2 – Especificações básicas do reator IMSR da Terrestrial Energy. ....	48
Tabela 3 – Especificações básicas do reator HTR-PM. ....	50
Tabela 4 – Especificações básicas do projeto SCWR. ....	52
Tabela 5 – Especificações básicas do projeto TWR-P. ....	55
Tabela 6 – Especificações básicas do projeto ALEGRO. ....	62
Tabela 7 – Especificações básicas do projeto BN800. ....	63
Tabela 8 – Especificações básicas do projeto BREST-OD-300. ....	67
Tabela 9 – Relação das soluções tecnológicas de fissão nuclear analisadas. ....	119
Tabela 10 – Relação de soluções de fusão nuclear (em desenvolvimento). ....	120
Tabela 11 – Classificação das tecnologias de reatores de fissão. ....	122
Tabela 12 – Classificação das tecnologias de fusão. ....	122
Tabela 13– Relação das soluções tecnológicas de fissão nuclear analisadas. ....	125
Tabela 14 – Relação das soluções tecnológicas de fissão nuclear analisadas. ....	126

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 – Conceito de “Cusp” Magnético em fusão nuclear.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 2 – Conceito do reator CFR da Lockheed Martin.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 3 – Dispositivo DPF e configuração do plasma para formar o plasmóide final [240]. .....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 4 – Núcleo do reator da HB11 Energy [250]......</i>	<i>100</i>
<i>Figura 5 – Dispositivo ignitor da reação de fusão no interior do reator da HB11 Energy [250]......</i>	<i>100</i>
<i>Figura 6 – Núcleo do reator da célula combustível SunCell da Brilliant em testes laboratoriais [274]......</i>	<i>105</i>
<i>Figura 7 – Célula combustível SunCell com o detalhe do domo de placas fotovoltaicas e as aletas externas para refrigeração das placas [274]......</i>	<i>105</i>
<i>Figura 8 – Densidade de energia das reações QHe segundo a Clean Planet [256]......</i>	<i>107</i>
<i>Figura 9 – Funcionamento ao longo do tempo, absorção de hidrogênio e produção de calor [256]......</i>	<i>108</i>
<i>Figura 10 – Esquema da célula combustível QHe [257]......</i>	<i>109</i>
<i>Figura 11 - Brillouin Energy’s HYDROGEN HOT TUBE (HHT™) Boiler [262]. .....</i>	<i>112</i>

## Sumário

1. INTRODUÇÃO .....	13
2. OBJETIVO .....	24
3. METODOLOGIA .....	25
3.1. Metodologia de Prospecção e Formação de Base de Dados .....	25
3.2. Metodologia Utilizada na Classificação Tecnológica .....	26
3.3. Metodologia de Classificação de Maturidade Produtiva .....	29
3.4. Metodologia <i>Stage-Gate</i> .....	32
3.5. Doutrina Nacional .....	35
3.6. Metodologia de Avaliação das Soluções Tecnológicas .....	36
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	38
4.1. Ciclo do Combustível Nuclear .....	39
4.2. Ciclo da Fissão do U-235 e do Pu-239 .....	39
4.2.1. Ciclo da Fissão do U-235 .....	40
4.2.1.1. Solução Westinghouse AP1000 .....	44
4.2.1.2. Reator de Sal Fundido – IMSR Terrestrial Energy .....	46
4.2.1.3. <i>Very-High-Temperature Reactor</i> – Solução HTR-PM CNNC .....	49
4.2.1.4. <i>Supercritical-Water-Cooled Reactor</i> – Solução GIF .....	51

4.2.1.5.	<i>Traveling Wave Reactor</i> – Solução TerraPower.....	52
4.2.2.	Ciclo da Fissão do Pu-239.....	56
4.2.2.1.	<i>Gas-Cooled Fast Reactor</i> – Solução ALLEGRO.....	59
4.2.2.2.	<i>Sodium-Cooled Fast Reactor</i> – Solução BN-800.....	62
4.2.3.	<i>Lead-Cooled Fast Reactor</i> – Solução BREST-OD-300.....	64
4.3.	Ciclo da Fissão do U-233.....	67
4.4.	Relação das Soluções Tecnológicas de Ciclos de Fusão.....	71
4.4.1.	Ciclo da Fusão do Deutério-Trítio.....	72
4.4.1.1.	<i>Solução ITER</i> .....	76
4.4.1.2.	<i>Solução Commonwealth Fusion System</i> .....	78
4.4.2.	Ciclo da Fusão Deutério-Hélio-3.....	80
4.4.2.1.	Solução Helion Energy.....	82
4.4.3.	Ciclo da Fusão Deutério-Deutério.....	86
4.4.3.1.	Solução Lockheed Martin.....	87
4.4.3.2.	Solução Zap Energy.....	90
4.4.4.	Ciclo da Fusão Próton-Boro.....	92
4.4.4.1.	Solução Tri-Alpha Energy.....	93
4.4.4.2.	Solução Lawrenceville Plasma Physics.....	96
4.4.4.3.	Solução HB11 Energy.....	99

4.4.5.	Ciclo da Fusão Hidrogênio-Metal Alcalino.....	101
4.4.5.1.	Solução Brilliant Light Power.....	103
4.4.5.2.	Solução Clean Planet Inc.....	107
4.4.5.3.	Solução Brillouin Energy Corp. ....	110
4.4.5.4.	Solução Leonardo Corp.....	113
4.4.5.5.	Solução Industrial Heat LLC.....	116
5.	RESULTADOS.....	119
5.1.	Relação das Soluções Tecnológicas Analisadas.....	119
5.2.	Classificação das Soluções.....	121
6.	DISCUSSÃO.....	124
6.1.	Soluções Desencorajadas.....	124
6.2.	Soluções Tecnológicas Adequadas à Propulsão Naval.....	125
6.3.	Soluções Tecnológicas Promissoras.....	127
6.4.	Tendências Tecnológicas e Prognósticos Futuros.....	130
7.	CONCLUSÃO.....	135
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	138

## 1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho versa sobre tecnologias para a produção de energia elétrica a partir da energia nuclear. Neste contexto, verifica-se que em 2019 o consumo total de energia elétrica no Brasil foi de aproximadamente 480 terawatt-hora (TWh). Esta marca inclui o consumo de energia em todos os setores (residencial, comercial, industrial e transporte). Para que se possa ter uma ideia melhor, o Brasil possui duas usinas nucleares em operação, Angra 1 e Angra 2, Angra 1 tem uma capacidade instalada de 657 MW, enquanto Angra 2 tem uma capacidade instalada de 1.350 MW. Juntas, essas usinas têm uma capacidade instalada combinada de aproximadamente 2.007 MW. Portanto, em 2019, Angra 1 e Angra 2 geraram aproximadamente 15,7 TWh de energia elétrica, o que representa cerca de 3,3% do total de energia elétrica consumida no Brasil naquele ano [1].

Principalmente em virtude do avanço da indústria eletrônica, computacional e de telecomunicações, o país teve um aumento médio anual no consumo de energia elétrica de 3,7%, num período de 19 anos, a contar do ano 2000 ao ano de 2018, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) [2]. Com isto, verifica-se, que o aumento médio anual tem sido maior do que toda capacidade instalada de geração de energia núcleo-elétrica do Brasil. Isto demonstra a baixa participação desta fonte frente a crescente necessidade de energia do país.

Além das necessidades energéticas do país, há também a necessidade energética da Marinha do Brasil, com vistas ao emprego na propulsão naval. Estas necessidades elevam a importância do desenvolvimento e estabelecimento de um parque industrial nacional no setor de energia nuclear. Objetivo este que já vem sendo buscado pelo Estado brasileiro desde meados da década de 50, quando passou a atuar mais ativamente neste setor. Nesta época surgiram as primeiras políticas de estado que fomentam o desenvolvimento tecnológico do país sob um prisma estatista, monopolista, apartidário e atemporal. Isto tem proporcionado ao país um lentíssimo, mas gradativo, desenvolvimento tecnológico na área nuclear.

Já no contexto mundial, o setor de energia nuclear tem experienciado um forte desenvolvimento e interesse por novas tecnologias no setor. Este interesse tem sido impulsionado principalmente pela busca por soluções ambientalmente sustentáveis, com reduzida ou geração nula de CO<sub>2</sub>, maior segurança e eficiência em relação as soluções atuais. Contudo, a diversidade e a maturidade dessas tecnologias emergentes carregam consigo incertezas quanto ao sucesso e a viabilidade comercial de cada uma delas. O que requer uma cuidadosa análise de cada solução e dos fatores que podem influenciar seu sucesso e adoção.

É notório que o sucesso de uma nova tecnologia pode ser impactado por diversos fatores, como a eficiência na geração de energia, a adequação e regulamentação da cadeia logística do combustível nuclear, a

fabricação dos materiais e equipamentos empregados na construção, testes, comissionamento, manutenção e descomissionamento. E, como fator principal muito além de questões tecnológicas, tem-se o interesse político e as crenças públicas a respeito da segurança e dos benefícios da energia nuclear. Portanto, apesar da adoção de uma tecnologia emergente poder proporcionar vantagens competitivas tanto no âmbito comercial quanto no militar, incluindo aprimoramento da eficiência e da prontidão operacional; redução de custos; e expansão das capacidades estratégicas, tem-se que a difusão de informações assertivas, a escolha de soluções seguras e o apuro no trato das questões de segurança nuclear constituem os fatores de maior relevância para o sucesso de uma solução tecnológica nuclear no contexto de um país onde a opinião pública tem relevância [3][4].

Voltando ao cenário nacional, tem-se que a opinião pública é um fator preponderante, que deve ser considerado e cuidado continuamente, desde a escolha de uma nova tecnologia nuclear, até o seu descomissionamento. Neste contexto é importante a aceitação da tecnologia por pessoas bem-informadas e de amplo alcance na sociedade em geral, para que se possa alcançar o apoio necessário para o sucesso e a sustentabilidade do projeto. Neste contexto as fontes de informação de massa, em especial a profissional midiática e empresarial jornalística, podem, através da opinião pública, influenciar decisões do governo, de empresas e de investidores privados em relação a adoção de uma solução tecnológica nuclear.



Com vistas a aumentar a aceitação de uma tecnologia pelos cidadãos e pela sociedade, é importante que haja transparência, propaganda e comunicação clara e assertiva sobre as vantagens e desvantagens de uma solução tecnológica. O mesmo vale para os riscos assumidos e as medidas de segurança que serão adotadas [3][4]. É importante também que a tecnologia seja avaliada em termos de impacto ambiental e desenvolvimento social, além de sua eficiência e custo.

Voltando para o âmbito tecnológico, em um esforço de equacionar estas questões, novas soluções de reatores nucleares de fissão estão sendo desenvolvidas com o objetivo de superar as limitações de reatores nucleares existentes e oferecer maior segurança, eficiência e sustentabilidade na geração de energia núcleo-elétrica. Uma destas soluções são os Reatores Modulares Pequenos (*Small Modular Reactors* - SMRs), esses reatores são menores do que os reatores nucleares convencionais e têm uma capacidade de geração de energia elétrica menor [5]. Entretanto eles podem ser construídos em fábricas e depois transportados para o local de instalação, reduzindo os custos e o tempo de construção e de descomissionamento, podendo ser o reator inteiro trocado ao invés de trocar apenas o combustível. Exemplos de SMRs incluem o reator CAREM da Argentina [6] e o reator ISMR da TerraPower do Canadá [7].

Apesar de ter um tamanho reduzido um Reator Modular Pequeno (SMR) pode variar dependendo do tamanho e da tecnologia específica do

reator. Por exemplo, o reator SMR da empresa NuScale é projetado para gerar 77 MWe [5], enquanto o reator CAREM da Argentina é projetado para gerar 25 MWe [6]. Já o reator SMR da empresa Rolls-Royce é projetado para gerar até 470 MWe [8], o que é significativamente maior do que a maioria dos outros SMRs. A capacidade de geração de energia elétrica de um SMR é um fator importante na avaliação de sua viabilidade técnica e competitividade em relação a outras fontes de energia (viabilidade econômica). Uma vez que estes são fatores que afetam sua eficiência, sua rentabilidade, o custo de construção e operação e a viabilidade de o reator se integrar à rede elétrica existente.

Um outro exemplo de solução tecnologia é o reator de fissão avançada com segurança passiva, que é um reator projetado para ser mais seguro em caso de acidente [3]. Esse tipo de reator utiliza uma estratégia de segurança passiva de ganho duplo, ou seja, não requer nem a intervenção humana, nem uma fonte de energia elétrica externa para controlar/desligar o reator no caso de um incidente [3]. Exemplos de reatores de fissão avançada com segurança passiva incluem o reator AP1000 da Westinghouse [9] e o reator ESBWR da GE [10][11][12].

Outro projeto relevante é reatores de sal fundido (*Molten Salt Fast Reactor* - MSFR) que apresenta uma proposta bastante interessante, pois são reatores que usam o combustível nuclear na forma líquida, o que permite que este seja bombeado através do núcleo do reator e resfriado utilizando um

fluido composto por um sal fundido no qual o combustível está diluído. O uso de sal fundido como fluido refrigerante é vantajoso por ser este um bom condutor de calor e poder operar em altas temperaturas, o que permite que um MSFR atinja uma eficiência térmica muito alta. Além disso, a natureza líquida do combustível e do meio de resfriamento torna o reator mais seguro, uma vez que o sal fundido se expande e se contrai com as mudanças de temperatura, o que significa que o reator não é propenso a explosões ou fusões de combustível [13].

Outro projeto interessante é o reator de alta temperatura (*High Temperature Reactor* - HTR) esses reatores utilizam combustível nuclear sólido e são projetados para operar em altas temperaturas, o que permite uma maior eficiência energética e a possibilidade de gerar hidrogênio para uso em outros setores. O projeto HTR-PM da China é um exemplo de reator de alta temperatura em desenvolvimento [14].

Nota-se que diversas tecnologias de reatores de fissão tem sido objeto de desenvolvimentos recentes na área nuclear, contudo, além das tecnologias de reatores de fissão, vêm sendo realizados vultuosos investimentos no desenvolvimento de um reator de fusão funcional. Apesar de este esforço de desenvolvimento estar em andamento a há mais de meio século, nesta última década houve um significativo progresso e aumento de investimento na busca por esta tecnologia. A razão para este interesse é diversa, uma vez que os benefícios desta tecnologia são diversos, entre eles

pode-se citar o potencial da fusão nuclear para produzir energia limpa, sustentável e virtualmente ilimitada. Várias iniciativas e projetos estão em andamento buscando alcançar esse objetivo, cada um com seus próprios desafios e vantagens potenciais.

Uma técnica muito utilizada é o confinamento magnético, que emprega campos magnéticos de alta intensidade para confinar, comprimir e controlar o combustível em forma de plasma quente no interior do reator, propiciando as condições para que as reações de fusão ocorram. Um exemplo notável é o projeto ITER (*Reator Termonuclear Experimental Internacional*), uma iniciativa internacional que busca demonstrar a viabilidade técnica da energia de fusão em escala comercial.

Outro projeto interessante pertence a Tri-Alpha Energy [15], atualmente conhecida como TAE Technologies, que foca no desenvolvimento de um reator de configuração de campo reverso (*Field-Reversed Configuration* - FRC). Esta abordagem envolve a criação de um anel de plasma de alta temperatura auto-contido e estável, o que reduz a necessidade de sistemas complexos e caros para o confinamento magnético.

Outra abordagem é o projeto *Compact Fusion Reactor* (CFR) da Lockheed Martin [15], que visa desenvolver um reator de fusão menor e portátil, usando um conceito inovador de confinamento magnético "*high beta*". A expectativa é que esta abordagem permita a produção de usinas de

energia de fusão mais compactas e de fácil construção do que os sistemas tradicionais de confinamento magnético.

A Zap Energy está trabalhando em uma abordagem de fusão por Z-pinch [16] estabilizada por fluxo interrompido, que emprega uma corrente elétrica para comprimir o plasma e criar as condições necessárias para ocorrer a fusão. O objetivo é desenvolver um sistema de energia de fusão escalável e econômico [15].

A Lawrenceville Plasma Physics (LPP) [15] tem focado na fusão de foco de plasma denso (DPF), que utiliza a aceleração e compressão eletromagnética do plasma para alcançar as altas temperaturas e densidades requeridas para as reações de fusão. A expectativa é desenvolver a geração de energia de fusão de forma aneutrônica que produz o mínimo de resíduos radioativos.

A HB11 Energy está explorando uma abordagem única para a energia de fusão usando lasers para iniciar reações de fusão não térmicas entre hidrogênio e boro-11, o que pode levar a um processo de fusão mais limpo e simples em comparação com os métodos tradicionais [15][17].

A Helion Energy está desenvolvendo um reator de fusão magneto-inercial (MIF) que combina aspectos de ambos os confinamentos magnético e inercial de fusão [18]. A expectativa é criar um sistema de energia de fusão mais eficiente e econômico [15].

A E-CAT (Catalisador de Energia) da Leonardo Corporation concentra-se em reações nucleares de baixa energia (LENR) como alternativa aos métodos tradicionais de fusão. A tecnologia visa criar energia através de uma reação controlada entre hidrogênio e catalisadores de metal especiais, produzindo calor em excesso [15] [19] [20].

Nota-se que a área nuclear está em constante evolução, e tem o potencial de fornecer energia limpa, sustentável e praticamente ilimitada. Dado o avanço das tecnologias de reatores nucleares, é essencial que as organizações acompanhem de perto essas inovações para se manterem atualizadas e garantir a adoção das melhores soluções e práticas disponíveis. Neste contexto, o acompanhamento das novas tecnologias é fundamental para garantir a segurança, eficiência e sustentabilidade dos sistemas de energia nuclear. À medida que novos projetos e abordagens surgem, é crucial avaliar seu potencial e identificar possíveis desafios e riscos associados a cada tecnologia.

As organizações devem estabelecer um padrão objetivo de avaliação de novas tecnologias, a fim de tomar decisões assertivas sobre a adoção e implementação de inovações no campo da energia nuclear. Isso pode ser feito por meio de diversas estratégias, tais como:

- Níveis de prontidão tecnológica (TRL): Os TRLs são metodologia de avaliação que mede o grau de maturidade de uma tecnologia, variando do nível 1 (conceito básico) ao nível 9 (sistema totalmente testado e

comprovado). Os TRLs fornecem uma estrutura para avaliar o progresso e o potencial de uma tecnologia em desenvolvimento, ajudando as organizações a tomar decisões assertivas sobre as escolhas de investimentos e implementações.

- *Stage gates*: A abordagem *stage gates* envolve a divisão do processo de desenvolvimento e implementação de tecnologia em estágios distintos, com pontos, ou portões (*gates*), de decisão em cada ponto crítico. Esses portões permitem uma avaliação sistemática do progresso, riscos e benefícios potenciais de uma tecnologia, garantindo que apenas as inovações com maior probabilidade de sucesso avancem no processo.
- Painel de especialistas: Um painel de especialistas é um grupo de profissionais com conhecimento e experiência relevantes na área, que podem avaliar objetivamente as novas tecnologias e fornecer orientações sobre sua viabilidade, riscos e benefícios. Esse painel pode ajudar as organizações na tomada de decisões sobre a adoção e implementação de novas tecnologias.
- Doutrina: A doutrina é um conjunto de princípios e diretrizes estabelecidos para orientar as organizações na avaliação e adoção de novas tecnologias. A doutrina pode incluir critérios de segurança, sustentabilidade, eficiência e outros fatores relevantes para garantir que

as tecnologias adotadas estejam alinhadas com os objetivos e valores da organização.

Diante deste cenário, torna-se evidente a importância do monitoramento constante das inovações em tecnologias de reatores nucleares pelo país e pela Marinha do Brasil. A adoção de padrões objetivos de avaliação, como níveis de prontidão tecnológica (TRL), *stage gates*, painéis de especialistas e doutrinas específicas, é fundamental para garantir uma análise adequada e criteriosa das tecnologias emergentes.

Ao implementar uma abordagem estruturada e objetiva para avaliar novas tecnologias, as organizações podem tomar decisões assertivas, minimizar riscos e maximizar a eficiência na adoção e implementação de inovações no campo tecnológico nuclear. Essa prática, por sua vez, pode auxiliar na busca por soluções sustentáveis, seguras e eficientes em termos de energia, contribuindo para o avanço do setor e o desenvolvimento de uma matriz energética mais limpa e responsável para o futuro. Além disso, essa abordagem pode apoiar os objetivos estratégicos da Marinha do Brasil, melhorando a capacidade de operações e a autonomia energética dos meios, bem como o fortalecimento da segurança nacional e o aumento da projeção de poder no cenário internacional.



## 2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é realizar uma prospecção tecnológica juntos as tecnologias emergentes de reatores nucleares e seus ciclos do combustível, mantendo o foco em reatores compactos que tenham potencial de emprego em propulsão naval. Trata-se de uma prospecção tecnológica norteada pelos aspectos de viabilidade técnica e econômica, no contexto nacional. Sendo o objetivo final a obtenção de um prospecto tecnológico comparativo relacionando de forma transversal as diversas tecnologias analisadas. Obtendo, dessa forma, um panorama informacional que possa servir de referência para a orientação e direcionamento dos rumos do desenvolvimento da propulsão nuclear brasileira.

### 3. METODOLOGIA

No trabalho em tela pretende-se prospectar e classificar tecnologias em função do seu nível de maturidade tecnológica TRL (*Technology Readiness Levels*) e em função do seu nível maturidade produtiva MRL (*Manufacturing Readiness Level* - MRL). Estas metodologias de classificação da maturidade do desenvolvimento e fabricação de uma dada tecnologia, quando empregadas em conjunto permitem uma robusta comparação. Auxiliando na discussão de diferentes tecnologias de uma forma uniforme, sem a perda de consistência técnica e precisão das características de desempenho de cada projeto [21][22][23][24][25][26][27].

#### 3.1. Metodologia de Prospecção e Formação de Base de Dados

A prospecção desta literatura especializada será realizada por meio de bases de dados acadêmicas como Web of Science, Scopus, arXiv, INSPIRE, American Chemical Society, Royal Society of Chemistr, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library, Google Acadêmico, Google Patentes entre outros. Além destas fontes convencionais pretende-se utilizar páginas da internet especializadas na área nuclear como o World-Nuclear, empresas de pesquisa e desenvolvimento da área nuclear e de órgãos, comissões e agências regulatórias da área nuclear de diversos países, inclusive da agência

internacional de energia atômica, órgão vinculado à Organização das Nações Unidas.

Importante destacar que sempre que possível buscou-se privilegiar referências bibliográficas nacionais em especial do IPEN e USP. Ainda, como muitas informações serão obtidas de sítios de internet de empresas da área, importante destacar, que estas informações serão usadas neste trabalho sem verificações de veracidade, uma vez que não há meios viáveis de se verificar a veracidade de resultados e feitos informados por estas entidades.

### **3.2. Metodologia Utilizada na Classificação Tecnológica**

Como já mencionado acima, neste trabalho de prospecção tecnológica utilizou-se a metodologia de classificação de maturidade tecnológica conhecida como TRL (*Technology Readiness Level* - TRL). Esta metodologia tem sido amplamente utilizada para avaliar nos EUA e no mundo para identificar, medir e discernir o estágio de desenvolvimento de uma tecnologia, produto ou sistema [28]. A metodologia TRL foi desenvolvida pela NASA na década de 1970 e propõem uma escala de 9 níveis de maturidade, onde cada nível representa um estágio específico no processo de desenvolvimento, maturação e implementação de uma tecnologia [25]. Estes níveis de 1 a 9, conhecidos como níveis de TRL, estão detalhados a seguir:

1. TRL 1 – Os fenômenos físicos e os princípios básicos são observados e relatados a nível de bancada laboratorial. Uma pesquisa básica é conduzida para identificar os princípios científicos fundamentais subjacentes à tecnologia;
2. TRL 2 – Os conceitos tecnológicos e/ou aplicação é formulada. A ideia básica da tecnologia é formulada, e suas possíveis aplicações são identificadas;
3. TRL 3 – Obtém-se uma prova de conceito analítica e experimental do elemento crítico da tecnologia. Estudos analíticos e experimentais são realizados para determinar a viabilidade técnica da tecnologia, espera-se um pequeno projeto que demonstre a funcionalidade básica do conceito, num contexto da utilidade fim, de modo a validar/garantir a viabilidade técnica a partir deste ponto;
4. TRL 4 - Validação de componente e/ou sistema em ambiente de laboratorial. Nesta etapa componentes e sistemas são testados em um ambiente controlado (laboratório) com objetivo de verificar o desempenho da tecnologia. Nesta etapa a tecnologia está sendo robustecida e aprimorada para um posterior teste mais rigoroso;
5. TRL 5 - Validação de componente e/ou sistema em ambiente relevante. Nesta etapa os testes são realizados em um ambiente mais próximo das condições reais de operação para avaliar a funcionalidade e a robustez da tecnologia. Este ambiente geralmente possui aspectos

similares ao operacional, porém em condições ideais, ainda limitando o rigor que o projeto será submetido;

6. TRL 6 - Demonstração de sistema em ambiente relevante. Nesta etapa um protótipo do sistema é testado em um ambiente relevante para demonstrar o desempenho da tecnologia em condições próximas às condições reais;
7. TRL 7 - Demonstração de sistema em ambiente operacional. Nesta etapa a tecnologia é testada em um ambiente operacional real, demonstrando sua aplicabilidade e eficácia;
8. TRL 8 - Sistema completo e qualificado. Nesta etapa a tecnologia passa por testes finais e qualificação, garantindo que atenda aos requisitos e às especificações definidas para sua missão; e
9. TRL 9 - Sistema comprovado e pronto para uso comercial. Nesta etapa a tecnologia foi aprovada na etapa 8 e é considerada plenamente operacional, testada, validada e pronta para ser implementada em um ambiente comercial e cumprir sua missão em qualquer condição de uso dentro de suas especificações.

A metodologia TRL se faz muito útil para fornecer uma linguagem comum e um entendimento compartilhado do progresso e dos riscos associados ao desenvolvimento de uma tecnologia. No entanto, é importante observar que os TRLs não são uma medida absoluta de sucesso ou fracasso,

e que os níveis de maturidade podem variar dependendo do contexto específico de cada tecnologia e setor [28][25].

### 3.3. Metodologia de Classificação de Maturidade Produtiva

Para avaliar a capacidade de um ator (empresa/governo) de fabricar/construir uma dada tecnologia, no que se refere a capacidade do ator de entregar um produto funcional, será empregado a metodologia de classificação de maturidade produtiva MRL (*Manufacturing Readiness Level* - MRL). A metodologia MRL é uma abordagem utilizada para avaliar a maturidade dos processos de manufatura associados a uma tecnologia ou produto [27]. A metodologia MRL foi desenvolvida pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos (*Department of Defense* - DoD) e é frequentemente empregada em conjunto com a metodologia TRL para fornecer uma avaliação abrangente, clara, eficaz e precisa da prontidão de uma tecnologia para produção e implantação/entrega [26].

A metodologia de classificação de maturidade produtiva MRL possui também 9 níveis de prontidão [27], assim como o TRL [25], estes níveis são:

1. MRL 1 - Identificação básica das oportunidades de manufatura. Nesta etapa uma pesquisa básica é realizada para identificar processos de manufatura capazes de contemplar o processo ora fabricado de forma

- laboratorial (artesanal em muitos casos) e oportunidades de melhoria dos processos que se tem utilizado até então;
2. MRL 2 - Desenvolvimento do conceito de manufatura. Neste ponto é onde o projeto preliminar da planta se inicia, onde os conceitos de manufatura são formulados e as possíveis abordagens/soluções são identificadas e escolhidas;
  3. MRL 3 - Prova de conceito de manufatura. Nesta etapa estudos analíticos e experimentais são realizados para determinar a viabilidade de processos de manufatura selecionados, ou seja, nesta etapa está se verificando se os processos são capazes de atingir os requisitos construtivos da tecnologia;
  4. MRL 4 - Desenvolvimento de processos de manufatura em laboratório. Nesta etapa os processos de manufatura são desenvolvidos e testados em ambiente laboratorial para que se possa observar e ajustar interfaces e procedimentos;
  5. MRL 5 - Validação de processos de manufatura em ambiente relevante. Nesta etapa os processos de manufatura são testados em condições semelhantes às de produção real, o que se procura obter neste nível é uma reprodutibilidade consistente e estável;
  6. MRL 6 - Demonstração do sistema de manufatura. Nesta etapa um sistema de manufatura é testado e validado, demonstrando que a

- tecnologia pode ser produzida em série e com sucesso, ou seja, com qualidade regular entre unidades, dentro dos padrões estabelecidos;
7. MRL 7 - Demonstração de processos de manufatura em escala piloto. Nesta etapa os processos de manufatura são testados e validados em um ambiente de produção em escala piloto, neste ponto já se tem uma produção relevante da tecnologia, o que se busca é a consolidação de procedimentos e padrões;
  8. MRL 8 - Processos de manufatura maduros e em escala de produção. Nesta etapa os processos de manufatura são otimizados até estarem prontos para a produção em escala, o foco é otimização final dos processos; e
  9. MRL 9 - Manufatura em escala total. Nessa etapa a tecnologia foi considerada aprovada na etapa anterior e porta está pronta para ser produzida em escala total, com processos de manufatura já bem estabelecidos, conhecidos, comprovados e eficientes.

Importante ressaltar que embora seja muito útil para produtos produzidos em série, esta não é a natureza de projetos de reatores nucleares. Os projetos de reatores nucleares são construídos em função de normatizações e requisitos específicos de cada aplicação, cliente e/ou país. Esta natureza dificulta que projetos de reatores nucleares sejam produzidos de modo seriado, desta forma, não há uma correspondência direta entre a metodologia MRL e a indústria nuclear. Seria necessária uma metodologia



específica para a área o que ainda não há. Portanto, para compatibilizar estas sutilezas a metodologia será ajustada para cada projeto, considerando a máxima maturidade produtiva como sendo o nível sete, que representa o estágio de planta piloto.

Dessa forma a metodologia de classificação produtiva MRL fornece padrões e informações valiosas sobre a prontidão da cadeia produtiva de uma tecnologia. Isso permite que as partes interessadas tomem decisões informadas sobre investimentos em pesquisa, desenvolvimento e gerenciamento de projetos [26]. A aplicação conjunta das metodologias TRLs e MRLs oferece uma visão abrangente da maturidade tanto tecnológica quanto produtiva de um projeto [27], representando uma ferramenta poderosa e valiosa na avaliação, medição e gerenciamento de riscos associados ao desenvolvimento, produção e implantação de tecnologias, projetos e produtos. Um dos objetivos deste estudo de prospecção tecnológica é identificar e classificar o estado do desenvolvimento e a capacidade de prontificação de cada solução avaliada.

### **3.4. Metodologia *Stage-Gate***

A metodologia de análise *Stage-Gate*, é uma estratégia de gerenciamento e acompanhamento do desenvolvimento de um produto, que foi elaborada e estruturada pelo Prof. Dr. Robert G. Cooper, Professor Emérito

de Gestão de Marketing e Novo Desenvolvimento de Produtos na DeGroot School of Business da Universidade McMaster em Hamilton, Canadá. Ele também é presidente do Product Development Institute Inc., empresa que oferece treinamento e consultoria em gestão de inovação e desenvolvimento de novos produtos.

A metodologia de análise *Stage-Gate* é uma forma de estruturar informações e formalizá-las com objetivo de gerenciar o processo de desenvolvimento de um novo produto, desde a ideia inicial até o lançamento. A estrutura do método *Stage-Gate* é dividida em fases, ou estágios, separados por pontos de decisão, ou portões. Onde cada estágio representa uma fase distinta do desenvolvimento do produto e cada portão é um ponto de verificação, onde a liderança avalia o progresso do projeto e decide se deve ou não prosseguir para a próxima fase.

Os estágios da metodologia incluem: pesquisa de mercado; desenvolvimento de protótipos; testes; e validação. Enquanto que os portões são os pontos de tomada de decisão onde os projetos podem ser modificados; aprovados para continuar para o próximo estágio; reciclados para trabalho adicional; ou cancelados completamente. Segue abaixo a estrutura Stage-Gate adotada neste trabalho.

- Estágio 1: Descoberta/ideação - Identificar oportunidades de mercado, gerar ideias para novos produtos.

- Portão 1: Análise inicial - Avaliar a validade da ideia com base no mercado-alvo, viabilidade técnica e nicho estratégico.
- Estágio 2: Construção de caso de negócios - Desenvolver o conceito do produto, estimar custos de marketing e produção, realizar análise de risco.
- Portão 2: Análise detalhada - Avaliar o caso de negócios, decidir prosseguir com o desenvolvimento do produto.
- Estágio 3: Desenvolvimento - Criar protótipos, testar e validar o design do produto.
- Portão 3: Análise pós-desenvolvimento - Avaliar o sucesso do desenvolvimento, decidir se o produto está pronto para testes de mercado.
- Estágio 4: Teste/Validação - Realizar testes de mercado, validar aceitação do mercado.
- Portão 4: Análise pré-lançamento - Avaliar os resultados do teste de mercado, decidir prosseguir com o lançamento do produto.
- Estágio 5: Lançamento - Lançar o produto no mercado.

O processo Stage-Gate permite que as empresas gerenciem cuidadosamente o risco e o investimento associados ao desenvolvimento de novos produtos. Como objetivo de garantir que apenas as ideias mais promissoras e viáveis sejam levadas adiante. Após a classificação das

tecnologias será realizado a avaliação das tecnologias selecionadas, comentando suas particularidades, potencialidades, riscos e desafios.

### **3.5. Doutrina Nacional**

Outro fator considerando neste trabalho ao analisar uma tecnologia é o que se adotou a chamar aqui de doutrina nacional de desenvolvimento tecnológico. Esta avaliação leva em conta os seguintes aspectos:

- 1) Acordos internacionais assinados pelo país que impactam no desenvolvimento da tecnologia nuclear; e
- 2) Política nacional de desenvolvimento para o setor nuclear.

Em resumos para o item 1 temos, principalmente, os tratados com a agência internacional de energia atômica (IAEA) e com a agência Brasil-Argentina. O impacto de interesse do item 1 para este trabalho se materializa na impossibilidade de utilizar ciclos envolvendo o plutônio. Contudo este ciclo e reatores foram estudados para fins didáticos e de divulgação interna de tecnologias que o país está abrindo mão.

Em relação ao item 2 tem-se a política estatista nacional que impede a existência de uma indústria nacional ligada a área nuclear. Isto ocorre por meio do inciso V, do Artigo 177, da Constituição Federal de 1988. Cujo impacto neste trabalho inexistente, mas por ser o responsável pelo nível insignificante e irrelevante do desenvolvimento nuclear nacional frente ao

restante do mundo, faz-se importante de ser citado. Uma vez que o Estado é incapaz de abarcar o desenvolvimento de uma área da amplitude e diversidade da área nuclear. Isto não significa que a atuação do Estado não seja importante através de instituições de pesquisa e desenvolvimento e do fomento de pesquisas, pesquisadores, projetos e empresas de desenvolvimento tecnológico. Mas o extermínio do setor privado é sólida garantia de subdesenvolvimento tecnológico e intelectual.

### **3.6. Metodologia de Avaliação das Soluções Tecnológicas**

Dentro da proposta de prospecção tecnológica deste trabalho as soluções tecnológicas serão classificadas e avaliadas em função das necessidades do país e da indústria naval brasileira. Neste contexto, dentre as várias tecnologias de reatores nucleares disponíveis, serão selecionadas as mais promissoras para os interesses nacionais. Este procedimento de seleção exige uma avaliação cuidadosa da maturidade tecnológica (TRL) e da capacidade produtiva (MRL), da tecnologia e da capacidade de entrega, respectivamente.

Neste contexto, através do emprego combinado das metodologias TRL, MRL e *Stage-Gates*, é possível obter uma avaliação abrangente, clara e objetiva das tecnologias de reatores nucleares em termos de prontidão tecnológica e da capacidade de realização/entrega e estágio de desenvolvimento. Essa abordagem integrada a doutrina nacional ajudará a

identificar as tecnologias de reatores nucleares mais promissoras. Com o emprego de outros elementos como a avaliação da capacidade de miniaturização, portabilidade, emprego naval e economicidade espera-se ser possível chegar a um painel avaliativo de relevante interesse.

Para isto, após a classificação das tecnologias, será montado uma tabela comparativa com a relação de todas as tecnologias avaliadas, o nível de TRL, MRL, Stage-Gate, custo estimado do projeto desenvolvimento/implantação, a possibilidade de miniaturização, a possibilidade de emprego em propulsão naval (portabilidade), doutrina nacional e o nível de dificuldade tecnológica. Este último lastreado nas possibilidades da indústria nacional em relação ao necessário para a obtenção de cada solução. Para os itens miniaturização, possibilidade de emprego em propulsão naval e doutrina será utilizado um campo binário booleano. O mesmo ocorre para o item nível de dificuldade tecnológica, onde será utilizado um fator de intensidade baixo, médio, alto.

#### 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica doravante apresentada busca identificar as principais características de cada ciclo de combustível ressaltando as características de complexidade tecnológica e custo de desenvolvimento. A pesquisa utilizou-se de informações abertas, disponíveis em sítios da internet de instituições governamentais, supranacionais, empresas privadas, artigos científicos publicados na área, revistas especializadas e livros. Importante destacar, que estas informações estão limitadas ao nível de precisão disponibilizado por estas entidades e que este fato limita a acurácia dos resultados deste trabalho, estando fortemente vinculado na confiabilidade das fontes prospectadas. Outrossim, ressalta-se que estas limitações constituem um desafio perene na área nuclear, devido as inúmeras políticas nacionais e internacionais que regulam, controlam e limitam o acesso do setor público e privado à informação na área nuclear.

Apesar destas limitações, intrínsecas do setor nuclear, elas não representaram empecilho para a realização deste trabalho, uma vez que o objetivo aqui não é obter um prognóstico preciso, ou seja, fixar um cenário e medir suas características, mas sim identificar direções, rumos, tendências e compará-los entre si, obtendo-se um prognóstico. Neste contexto, a pesquisa bibliográfica foi realizada de modo estruturado, elencando-se objetivos e prospectando as informações disponíveis para cada um.

#### 4.1. Ciclo do Combustível Nuclear

A escolha de uma solução tecnológica de reator nuclear implica na escolha de um dado ciclo de combustível nuclear, de forma que a complexidade de um pode impossibilitar ou inviabilizar a adoção do outro. Além disso a relação entre a forma de fabricação do combustível nuclear e o tipo de reator nuclear está diretamente ligada à forma como o combustível é preparado, processado e utilizado no reator.

O ciclo do combustível nuclear envolve várias etapas, desde a mineração ou extração do elemento químico, enriquecimento (quando necessário), fabricação do combustível, uso no reator, até o gerenciamento e disposição dos rejeitos radioativos.

#### 4.2. Ciclo da Fissão do U-235 e do Pu-239

O ciclo de fissão do U-235 e do Pu-239 refere-se aos reatores que operam a base de reações nucleares que ocorrem com estes dois elementos, liberando energia e produzindo uma variedade de produtos de fissão e nêutrons. Neste caso, tanto o U-235 quanto o Pu-239 são materiais físeis, ou seja, ambos podem sustentar uma reação nuclear em cadeia quando atingidos



por um nêutron. O ciclo de fissão desses isótopos está no cerne da geração de energia nuclear na totalidade dos reatores ao redor do mundo.

#### 4.2.1. Ciclo da Fissão do U-235

O ciclo da fissão U-235 compreende toda a cadeia de processos que vão desde a extração, processamento e utilização até o descarte do combustível nuclear. O ciclo da fissão do U-235 é composto por uma série de processos interconectados que vão transformando o urânio natural até chegar no combustível nuclear adequado para cada tipo de reator nuclear, apresenta-se abaixo, de forma sucinta, as principais etapas deste processo.

- a) Mineração: A extração do urânio da natureza pode ocorrer por três vias, através da mineração a céu aberto, através da mineração subterrânea ou através da lixiviação in loco (*In Situ Leaching* - ISL) [29]. Na mineração a céu aberto e subterrânea, o minério de urânio é mecanicamente extraído da terra, enquanto no ISL o urânio é dissolvido em água no local e depois bombeado para a superfície [30]. O minério é então triturado em um moinho para separar o urânio, criando um composto amarelado chamado de *yellowcake*, ou bolo amarelo, este substrato possui tipicamente 70-90% de óxido de urânio (U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) [29]. Em relação aos custos associados à mineração e moagem do urânio,

eles podem variar de US\$ 20 a US\$ 60 por libra de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> (trióxido de urânio) produzido [31].

- b) Conversão: Utilizando uma planta industrial especializada, o *yellowcake* é convertido no gás hexafluoreto de urânio (UF<sub>6</sub>), o que permite sua utilização nos processos de enriquecimento [29]. Esta conversão do U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> em UF<sub>6</sub> se dá pela reação do U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> com o ácido fluorídrico (HF) para formar tetrafluoreto de urânio (UF<sub>4</sub>), que em seguida é oxidado com gás flúor para formar o UF<sub>6</sub> [32]. O custo deste processo de conversão pode variar entre US\$ 6 a US\$ 12 por quilograma de urânio [33].
- c) Enriquecimento: O urânio natural é encontrado na natureza com aproximadamente 0,7% de U-235 e 99,3% de U-238 [29]. Contudo, a maioria dos reatores nucleares comerciais requer um combustível com uma concentração mais alta de U-235, geralmente entre 3-5% [34]. Os principais métodos de enriquecimento do UF<sub>6</sub> são a centrifugação a gás, a difusão gasosa e a separação a laser [29]. Destes, a centrifugação a gás é o método mais disseminado, por ter o menor custo. Este método envolve a rotação do gás UF<sub>6</sub> em altas velocidades em cascatas de máquinas rotativas ultra velozes, o que permite criar a condição cinética necessária para separar o isótopo U-235 mais leve do isótopo U-238 mais pesado [35]. O custo deste processo pode variar entre US\$ 100 a US\$ 150 por SWU (*Separative Work Unit*) [36].

- d) Fabricação do combustível: Após ser enriquecido o UF<sub>6</sub> é reconvertido em pó, na forma de dióxido de urânio (UO<sub>2</sub>), por meio de um processo chamado redução e hidrólise [29]. O pó enriquecido é prensado na forma de pequenas pastilhas cilíndricas e sinterizado em altas temperaturas [37]. As pastilhas sinterizadas são então inseridas em tubos metálicos, geralmente feitos de uma liga de zircônio, chamados de varetas combustível [29]. As varetas combustíveis são então montadas em conjuntos combustível, que são então carregados em um reator nuclear [38]. O custo do processo de fabricação do combustível pode variar de US\$ 200 a US\$ 300 por quilograma de urânio enriquecido [39].
- e) Descarga e armazenamento do combustível usado: Após um período entre 3 e 5 anos de queima contínua no núcleo do reator nuclear, parte do combustível nuclear é descarregada e substituída por uma parte nova [29]. O combustível queimado, também chamado de combustível gasto ou irradiado, ainda contém uma quantidade significativa de materiais fissionáveis e produtos de fissão radioativos [29]. O combustível queimado é primeiramente armazenado temporariamente no local da usina nuclear, em piscinas de armazenamento ou em recipientes de armazenamento seco [29].
- f) Gerenciamento de resíduos: A etapa final do ciclo de combustível U-235 envolve o gerenciamento dos resíduos nucleares gerados ao longo

do processo [29]. Isso inclui resíduos de alto nível (*High-Level Waste* - HLW), como combustível gasto ou resíduos do reprocessamento, resíduos de baixo nível (*Low-Level Waste* - LLW) e resíduos de nível intermediário (*Intermediate-Level Waste* - ILW) [38]. Vários métodos de tratamento e descarte são empregados, dependendo da classificação dos resíduos e dos requisitos regulatórios aplicáveis [38].

Importante destacar, que os custos apresentados acima são estimativas de custos do tipo operacional. Em relação ao custo do desenvolvimento, pode-se tomar como referência o projeto EURATOM (Comunidade Europeia de Energia Atômica), que foi criado em 1957, com o objetivo de promover a pesquisa e o desenvolvimento pacífico da energia nuclear na Europa [40]. Desde a sua criação, o financiamento do EURATOM tem sido fornecido através de programas de pesquisa e treinamento de vários anos. O orçamento do EURATOM é parte integrante do orçamento geral da União Europeia e tem sido alocado para períodos específicos [41]. Por se tratar de informação sensível é difícil de ser encontrada. Porém através de relatórios de agências nacionais e internacionais, foi possível identificar que o sexto programa de pesquisa e desenvolvimento tecnológico, realizado entre 2002 a 2006, recebeu cerca de €1,2 bilhão, enquanto o sétimo programa realizado entre 2007 a 2011, investiu €2,7 bilhões [42][21]. Além disso, no âmbito do programa Horizonte 2020, realizado entre 2014 a 2020, o EURATOM recebeu mais €1,6 bilhões [22].

#### 4.2.1.1. Solução Westinghouse AP1000

Os reatores de água pressurizada (*Pressurized Water Reactors* – PWR) são a tecnologia de reator nuclear de geração nucleoe elétrica mais disseminada e bem estabelecida no mundo. Dentre estes reatores os reatores nucleares PWR de terceira geração são atualmente os mais avançados em franca utilização, um exemplar desta tecnologia é o reator AP1000 que entrou em operação, em 2018, na cidade de Sanmen, na província de Zhejiang [43], na China. Desenvolvido pela empresa Westinghouse Electric Company, o AP1000 é um reator nuclear com uma potência elétrica de 1.100 MWe, possui um projeto otimizado e simplificado e que, por empregar métodos passivos de resfriamento e necessitar de menor número de componentes, possui maior segurança do que reatores nucleares PWR de geração anterior [44], conforme pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 – Especificações básicas do reator AP1000.

Fabricante	Potência/ Tipo	Combustível	Moderador	Refrigerante	TRL/MRL	Custo
Westinghouse EUA	1.117 MWe/ PWR [44]	Pastilha UO <sub>2</sub> U235 4,5% [44] [45]	Água leve	Água leve	8/7	14 bi USD

Segundo relatório publicado pela U.S. Energy Information Administration (EIA) em 2020, o custo médio estimado de construção de um reator nuclear de 1.100 MWe, como o AP1000, nos Estados Unidos da América,

é de aproximadamente 6.000 dólares por kilowatt elétrico (kWe) [43]. Sabendo-se que a capacidade de geração de energia do AP1000, que é de 1.100 MWe, o custo total de construção seria de aproximadamente 6,6 bilhões de dólares.

Importante destacar que os gastos reais podem divergir consideravelmente das estimativas, em função de fatores como demoras nas obras, alterações nos valores dos insumos e despesas com mão de obra, bem como questões ligadas à obtenção de licenças e regulamentações. Um caso ilustrativo foi o projeto de ampliação da central nuclear de Vogtle, nos EUA, que envolveu a construção de dois reatores nucleares AP1000. A previsão orçamentária do projeto era de 14 bilhões de dólares, mas em razão de diversos fatores, como atrasos e contratempos com fornecedores, o custo total do empreendimento alcançou aproximadamente 28 bilhões de dólares [43]. Por estar em venda ao cliente final, com poucas unidades estabelecidas, o reator nuclear AP1000 é classificado com maturidade tecnológica (TRL) em nível oito [28][25] e maturidade produtiva (MRL) também em nível sete, produção em escala piloto. Lembra-se que os reatores nucleares não são produzidos de modo seriado, portanto, não existem linhas de produção como em outras tecnologias que são comumente produzidas em grandes quantidades [26][27]. Neste trabalho, para os projetos já em operação, ou seja, com uma maturidade plena, será adotado o nível sete para a máxima maturidade produtiva.

#### 4.2.1.2. Reator de Sal Fundido – IMSR Terrestrial Energy

Os reatores de Sal Fundido (*Molten Salt Reactors* – MSR) são uma classe de reatores nucleares que utilizam sais fundidos como fluido refrigerante e, muitas vezes, o combustível nuclear é dissolvido em meio ao fluido refrigerante [46]. Esses reatores oferecem uma série de vantagens potenciais em comparação com os reatores nucleares convencionais, incluindo maior eficiência térmica, segurança inerente, flexibilidade de combustível e redução de resíduos nucleares [46][47].

Os MSRs operam a temperaturas mais altas do que os reatores de água pressurizada e de água fervente convencionais, resultando em maior eficiência termodinâmica e, portanto, melhor conversão de energia térmica em energia elétrica. A alta temperatura do fluido refrigerante também permite a utilização de ciclos de energia mais avançados, como o ciclo Brayton, que pode aumentar ainda mais a eficiência do sistema [46][47][48]. A maior segurança dos reatores nucleares MSRs é atribuída à sua capacidade de expansão térmica negativa, devido ao coeficiente de reatividade. Ou seja, um aumento na temperatura do reator leva a uma redução na reatividade do combustível, diminuindo a taxa de fissão e estabilizando o sistema. Além disso, os MSRs podem incluir dispositivos de segurança passiva, como barras de grafite congeladas que derretem em caso de superaquecimento, permitindo

que o combustível escoe para um tanque de contenção passivo, interrompendo a reação em cadeia [46][48].

Os MSRs também são flexíveis em termos de combustível, pois podem utilizar uma variedade de materiais combustíveis dissolvidos no fluido refrigerante. Dentre estes materiais podemos citar o urânio na forma de hexafluoreto de urânio (UF<sub>6</sub>) ou tetrafluoreto de urânio (UF<sub>4</sub>), podendo ser U233, U235 ou U238 [46]. O tório geralmente dissolvido como tetrafluoreto de tório (ThF<sub>4</sub>) e o plutônio (239 e 241), bem como combustível nuclear reciclado [46]. Além disso, os MSRs podem ser projetados para queimar ativamente os resíduos nucleares de longa duração, reduzindo significativamente a quantidade e o tempo de armazenamento dos resíduos nucleares [46].

Um exemplo de reator nuclear tipo MSR de quarta geração é o *Integral Molten Salt Reactor* – IMSR desenvolvido pela empresa canadense Terrestrial Energy [7] que pretende prontificá-lo em 2028 [49]. O IMSR é um projeto de reator nuclear modular de pequeno porte (*Small Modular Reactor* – SMR), com uma capacidade nominal de 400 MWt (megawatts térmicos), podendo ser utilizado para geração de energia elétrica e fornecimento de calor para aplicações industriais [46].

O núcleo do IMSR utiliza sais fundidos de lítio e berílio, conhecido como FLiBe, que possui excelentes propriedades termodinâmicas e de transferência de calor [50]. O combustível nuclear é uma mistura de urânio



235 e urânio 238 dissolvidos no sal fundido [51], na Tabela 2 é apresentado um resumo dos principais dados técnicos do reator.

Tabela 2 – Especificações básicas do reator IMSR da Terrestrial Energy.

Fabricante	Potência/ Tipo	Combustível	Moderador	Refrigerante	TRL/MRL	Custo
Terrestrial Energy Canadá	440/195 MWt/MWe MSR [51][50]	U235 max. 5% dissolvido no FLiBe [52][50]	Sal fundido de FLiBe e grafite [50]	Sal fundido de FLiBe (fluoreto de lítio LiF e Fluoreto de berílio BeF <sub>2</sub> ) [51][50]	3/2	4,8 bi USD

Em outubro de 2020, a Terrestrial Energy concluiu a primeira fase do processo de licenciamento de projeto de fornecedor da Comissão Reguladora Nuclear do Canadá (CNSC) para o IMSR [53]. Esse marco indica que o projeto IMSR está progredindo em direção à aprovação regulatória e à construção de um protótipo. O sucesso na primeira fase do processo de licenciamento sugere que o IMSR esteja com um nível de maturidade tecnológica (TRL) em torno de 3, onde a etapa inicial do projeto foi demonstrada e licenciada, partindo para o início da construção de um protótipo [25][28].

A Terrestrial Energy tem trabalhado em parceria com fabricantes e fornecedores para desenvolver processos de fabricação e montagem modulares para o IMSR [54]. Essas atividades sugerem que o projeto IMSR está com um nível 2 de maturidade produtiva (MRL) [26][27].

A Terrestrial Energy não informa o custo estimado do seu produto, mas de acordo com um relatório da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) e da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), o custo estimado de SMRs pode variar de US\$ 4.000 a US\$

12.000 por kW elétrico instalado [55]. Usando esses valores como referência, o custo de um IMSR pode ficar entre 1,6 a 4,8 bilhões de dólares.

#### **4.2.1.3. *Very-High-Temperature Reactor* – Solução HTR-PM CNNC**

O reator nuclear *Very-High-Temperature Reactor* – VHTR consiste em um avanço na tecnologia de reatores nucleares de quarta geração (Gen IV) [56]. O VHTR opera em temperaturas significativamente mais elevadas do que os reatores convencionais, variando entre 750 e 1.000 graus Celsius, o que permite alcançar um alto rendimento na geração energia núcleo-elétrica e a viabilização da produção de hidrogênio [56][57].

A tecnologia do VHTR consiste na utilização de partículas de combustível TRISO (TRi-Structural-ISOtropic) e um moderador de grafite. As partículas TRISO consistem em um núcleo de óxido ou carbeto de urânio, cercado por várias camadas de material compósito de carbeto de silício e pirocarbono, que proporcionam excelente retenção de produtos de fissão e resistência a altas temperaturas [56][57][58]. É utilizado um moderador de grafite para desacelerar os nêutrons e, assim, aumentar a probabilidade de interação com os núcleos de combustível [58][59].

O VHTR é geralmente projetado como um reator refrigerado a gás, em que o hélio é utilizado como fluido de refrigeração devido à sua elevada capacidade térmica e inércia química [60]. Isso permite uma eficiente

transferência de calor e minimiza os riscos de reações químicas adversas no sistema [60][61]. A combinação de partículas de combustível TRISO, moderador de grafite e refrigeração a gás confere ao VHTR maior segurança e robustez. O projeto intrinsecamente seguro do VHTR é caracterizado por características passivas de segurança, como a capacidade de resfriamento por convecção natural em caso de perda de energia [57][59][62].

Um exemplo de reator nuclear tipo VHTR é o projeto HTR-PM que foi desenvolvido pelo Instituto de Pesquisa de Energia Nuclear da China (INET) e pela Corporação Nacional Nuclear da China (CNNC). A construção da primeira unidade do HTR-PM começou em 2012 no local de Shidaowan, na província de Shandong, e em 2021, a unidade foi conectada à rede elétrica pela primeira vez [63]. O HTR-PM utiliza elementos combustíveis em forma de esferas contendo partículas TRISO e moderador de grafite. O reator é resfriado por hélio e opera a temperaturas próximas a 750 graus Celsius. A capacidade de geração elétrica do projeto HTR-PM é de 210 MWe [63][64]. A Tabela 3 apresenta um sumário das principais características técnicas do reator HTR-PM.

Tabela 3 – Especificações básicas do reator HTR-PM.

Fabricante	Potência/ Tipo	Combustível	Moderador	Refrigerante	TRL/MRL	Custo
INET & CNNC	200 MWe VHTR/AGR [63][64]	Esferas contendo partículas TRISO com U235 4.1% a 8,5/9,08% [63][64]	Grafite [63]	Gás Hélio [63]	8/7 [63]	3 bi USD [65]

O HTR-PM representa um marco importante no desenvolvimento de reatores VHTR, pois é um dos primeiros projetos a alcançar a fase de

demonstração comercial [63]. Portanto, o reator nuclear HTR-PM possui maturidade tecnológica (TRL) em nível oito [25][28] e maturidade produtiva (MRL) em nível sete [26][27]. Segundo apontamentos da *World Nuclear Association* o custo estimado para o projeto HTR-PM da China foi de aproximadamente US\$ 3 bilhões [65].

#### **4.2.1.4. *Supercritical-Water-Cooled Reactor* – Solução GIF**

O *SuperCRITICAL Water-cooled Reactor* – SCWR, que é um reator nuclear de quarta geração muito semelhante ao PWR, porém consideravelmente avançado, em algumas literaturas ele é apresentado como um tipo de reator nuclear PWR. O SCWR opera com o fluido refrigerante em condições supercríticas, o que significa que a pressão e a temperatura do fluido refrigerante estão acima do ponto crítico da água (22,1 MPa e 374 °C). Essas condições as propriedades líquidas e gasosas do fluido refrigerantes coexistem simultaneamente o que proporciona uma maior eficiência termodinâmica e uma simplificação no projeto do reator.

Em virtude do menor número de estágios e maior eficiência termodinâmica o reator nuclear SCWR pretende alcançar uma eficiência de conversão de energia de 45% a 50%, o que é um excelente ganho em comparação com os 33% a 36% de eficiência dos reatores PWR convencionais. O reator nuclear SCWR encontra-se em desenvolvimento por vários países,

incluindo Estados Unidos, Canadá, União Europeia, Japão, Rússia e China, sob a iniciativa Generation IV International Forum (GIF) [66][67] e pretende gerar em entre de 1000 MWe [68]. Com base nas informações disponíveis de forma publicamente, o SCWR ainda está em fase de estudos teóricos iniciais, modelagem matemática e simulação computacional [66][67], por isso o projeto de reator nuclear SCWR possui maturidade tecnológica (TRL) nível 1 [25][28] e possui maturidade produtiva (MRL) nível 1 [26][27]. A Tabela 4 apresenta um sumário das principais características técnicas do SCWR.

Tabela 4 – Especificações básicas do projeto SCWR.

Fabricante	Potência/ Tipo	Combustível	Moderador	Refrigerante	TRL/MRL	Custo
GIF	1000 MWe SCWR/PWR [68]	Pastilha UO2 U235 5% a 9% [45] [66]	H2O, ZrH2 ou D2O [66]	Água leve [66]	1/1 [67]	-

#### 4.2.1.5. *Traveling Wave Reactor* – Solução TerraPower

A topologia de reator nuclear tipo *Traveling Wave Reactor* – TWR é uma topologia de reator de fissão nuclear rápido, de quarta geração, que pretende utilizar ondas de combustível para sustentar a reação nuclear. O TWR é projetado para utilizar uma variedade de combustíveis, incluindo urânio empobrecido, urânio natural e tório, reduzindo assim a necessidade de enriquecimento e reprocessamento do combustível nuclear [69].

A queima do combustível nuclear em um reator do tipo TWR ocorre através de um processo chamado "queima em onda" (ou "burning wave"),

onde ocorre a conversão de material fértil em material fissível e a subsequente fissão, de forma sequencial e contínua ao longo do núcleo do reator [70]. Assim, inicialmente, uma pequena quantidade de combustível fissil, como o plutônio-239 ou o urânio-235, é inserida no ponto central do núcleo do reator, formando uma região chamada "iniciador" [71]. Ao redor dessa região, geralmente em disposição geométrica radial, são dispostos materiais férteis, como urânio-238 ou tório-232, que não são capazes de sustentar uma reação em cadeia de fissão por conta própria [69][70][71].

Quando o reator é ativado, os nêutrons gerados pela fissão do material iniciador são absorvidos pelos átomos do material fértil. Isso leva à formação de materiais físeis, como plutônio-239 a partir do urânio-238 e urânio-233 a partir do tório-232, através do processo de captura de nêutrons seguida de decaimento beta [72]. À medida que os materiais físeis são formados, a fissão desses novos átomos gera mais nêutrons, que por sua vez são absorvidos pelos átomos de material fértil adjacentes. Esse processo cria uma onda de conversão e fissão que se move radialmente através do núcleo do reator ao longo do tempo, gerando calor e mantendo a reação em cadeia de fissão de forma sustentável [72][73].

A velocidade e a direção da onda de queima do combustível nuclear podem ser controladas por meio da geometria do núcleo, da distribuição do combustível e do uso de elementos de controle e de moderadores de nêutrons. Por conta deste controle da onda de propagação da transmutação,

a onda de queima pode ser mantida por décadas sem a necessidade de reabastecimento ou do reprocessamento de combustível nuclear [72][73][74].

A energia térmica gerada no TWR é transferida para um circuito de troca de calor por meio de um fluido refrigerante, como o sódio líquido, que possui excelentes propriedades térmicas e baixa absorção de nêutrons. O calor transferido é usado para produzir vapor de água em um trocador de calor secundário, que por sua vez aciona uma turbina a vapor, gerando eletricidade [69][70][71]. Um dos principais benefícios do TWR é sua capacidade de queimar uma grande quantidade de combustível nuclear sem a necessidade de enriquecimento ou reprocessamento. Isso o torna atraente do ponto de vista da proliferação nuclear e da gestão de resíduos radioativos e custo do ciclo do combustível nuclear. Além disso, os TWRs são projetados para ter alta eficiência e segurança, utilizando sistemas passivos de segurança e refrigeração [74].

Um exemplar de reator nuclear de topologia TWR vem sendo desenvolvido pela empresa TerraPower, uma empresa de tecnologia nuclear fundada por Bill Gates. A TerraPower tem trabalhado no desenvolvimento do reator TWR desde 2006 e o projeto tem avançado significativamente nos últimos anos, a previsão para o início das operações está para o final da década de 20. O projeto da empresa TerraPower é chamado de *Traveling Wave Reactor Prototype* – TWR-P, e é um protótipo de reator TWR com uma capacidade de geração de energia núcleo-elétrica de 345 MWe. A TerraPower

anunciou, em junho de 2021, que iria construir um projeto de demonstração chamado Natrium em parceria com a GE Hitachi Nuclear Energy, utilizando o conceito TWR [75][76][77]. Dado o anúncio do início da construção do protótipo, pode-se classificar o reator nuclear Natrium/TWR-P com uma maturidade tecnológica (TRL) no nível 3 [25][28][75][76][77] e uma maturidade produtiva (MRL) no nível 2 [26][27][75][76][77]. A Tabela 5 apresenta um sumário das principais características técnicas do reator TWR-P.

Tabela 5 – Especificações básicas do projeto TWR-P.

Fabricante	Potência/ Tipo	Combustível	Moderador	Refrigerante	TRL/MRL	Custo
TerraPower EUA	345 MWe TWR [75]	U238 & U235 a 15,75%, em liga metálica de U-10%Zr [74]	Não usa moderador (reator rápido)	Sódio [74]	3/2 [77]	1 bi USD [78]

Em relação ao custo do projeto, a TerraPower e a GE Hitachi Nuclear Energy afirmam que o projeto do reator nuclear Natrium tem um custo estimado de construção de cerca de US\$ 1 bilhão [78]. Sendo que em outubro de 2020, o departamento de energia dos estados unidos (*Department of Energy – DOE*) concedeu à TerraPower o prêmio de demonstração de reator avançado (*Advanced Reactor Demonstration Program – ARD*) no valor de US\$ 80 milhões para apoiar o desenvolvimento e a construção do projeto Natrium [76].



#### 4.2.2. Ciclo da Fissão do Pu-239

O ciclo da fissão do plutônio-239 (Pu-239) constitui uma parte integrante do ciclo do combustível nuclear fechado, ou reprocessado. Esta estratégia visa aumentar a eficiência na utilização do combustível nuclear e reduzir a quantidade de resíduos radioativos gerados [79] [80]. O Pu-239 é um subproduto do ciclo da fissão do urânio-238 (U-238), já abordado o tópico anterior, as principais etapas do ciclo do Pu-239 são:

- a) Formação do Pu-239: A formação do Pu-239 ocorre durante a operação de um reator nuclear contendo U-238 no seu núcleo. Os núcleos de U-238 presentes no combustível nuclear absorvem nêutrons e se transformam em U-239, que decai rapidamente em neptúnio-239 (Np-239) e, em seguida, em Pu-239 [23].
- b) Reprocessamento: Após retirada do combustível irradiado, ele é submetido a um processo industrial conhecido como PUREX (*Plutonium-Uranium Redox EXtraction* - PUREX) que, devido a vantajosa relação custo/benéfico é o método mais utilizado para o reprocessamento do combustível nuclear irradiado, cujo objetivo é recuperar plutônio e urânio para reutilização como matéria-prima na indústria nuclear [81]. O processo PUREX consiste na dissolução do combustível nuclear irradiado em ácido nítrico concentrado, seguida por etapas de extração líquido-líquido utilizando solventes orgânicos

[82]. A separação química do urânio e do plutônio ocorre através de reações redox em presença de um agente complexante, geralmente o ácido tributílfosfato (TBP) em uma matriz de hidrocarboneto (n-dodecano ou querosene) [83].

As etapas do processo PUREX são divididas em três fases principais: extração, re-extração e purificação [84]. Na fase de extração, a fase aquosa contendo os actinídeos e produtos de fissão é posta em contato com a fase orgânica contendo o TBP. O urânio e o plutônio são extraídos seletivamente para a fase orgânica, enquanto os produtos de fissão e os elementos terras raras permanecem na fase aquosa [82]. Na fase de re-extração, o urânio e o plutônio são separados da fase orgânica e transferidos de volta para a fase aquosa utilizando agentes redutores e agentes complexantes, como o ácido hidroxilamônio e o ácido etilenodiaminotetraacético (EDTA) [83]. Finalmente, na etapa de purificação, impurezas remanescentes são removidas para obter produtos de alta pureza, adequados para uso como combustível nuclear [84]. O custo do processo PUREX pode variar de US\$ 1.000 a US\$ 2.000 por quilograma de combustível gasto [85] [86]. A princípio pode parecer mais caro do que extrair e produzir um combustível novo, mas ao considerar os custos de transportar e manter o resíduo nuclear não processado o reprocessamento torna-se valoroso.

- c) Fabricação de combustível MOX: O Pu-239 recuperado é misturado com urânio para formar o combustível MOX. A proporção entre plutônio e urânio no MOX pode variar dependendo do tipo e projeto do reator, em reatores PWR o limite máximo é de 5,3%, já o projeto ALLEGRO tem trabalhado com 25.5% [86]. O combustível MOX é usado em reatores nucleares, como os reatores de água pressurizada (PWR), os reatores de água fervente (BWR), reator de água pesada pressurizada (*Pressurized Heavy Water Reactor* - PHWR) também conhecidos como reator CANDU, reator refrigerado a gás (*Advanced Gas-cooled Reactor* - AGR), reator de alta temperatura refrigerado a gás (*High Temperature Gas-cooled Reactor* - HTR) [87][88], entre outros. Em estudo de 2010 realizado pelo Oak Ridge National Laboratory, foi estimado que o custo de fabricação do combustível MOX era de aproximadamente US\$ 2.000 a US\$ 3.000 por quilograma de combustível [89].
- d) Gerenciamento de resíduos: Os resíduos gerados no processo de reprocesso, incluindo os produtos de fissão e os materiais transurânicos de vida longa, devem ser gerenciados de maneira adequada e segura em conformidade com a legislação vigente. Existem diversas técnicas de tratamento, condicionamento e armazenamento de longo prazo para lidar com esses resíduos [90][91][92]. Estimativas de custo para a disposição de resíduos nucleares variam significativamente, com alguns

estudos sugerindo custos de cerca de US\$ 1 milhão por tonelada métrica de resíduos [93].

Desta feita, desconsiderando o custo de gerenciamento dos resíduos, temos que o custo isolado do reprocessamento e fornecimento de combustível reprocessado foi estimado em US\$ 1.000 a US\$ 2.000 por quilograma de material reprocessado [93], mais o custo da fabricação de MOX, que foi estimado em aproximadamente US\$ 2.000 a US\$ 3.000 por quilograma de combustível [89]. Portanto, a soma dos custos das duas etapas pode variar de US\$ 3.000 a US\$ 5.000 por quilograma. O que é bem mais caro do que o uso de combustível novo, de U-235, contudo o preço passa a ser atrativo devido à economia no armazenamento dos resíduos e devido ao lucro com a obtenção de materiais transurânicos.

#### **4.2.2.1. *Gas-Cooled Fast Reactor* – Solução ALLEGRO**

Os reatores nucleares rápidos refrigerados a gás (*Gas-Cooled Fast Reactor* – GFR), são um tipo de reator de geração núcleo-elétrico avançado, de quarta geração (Gen IV), que utilizam gás como fluido refrigerante e operam com um espectro de nêutrons rápido. A utilização de nêutrons rápidos permite aos GFRs alcançarem maior eficiência e reduzir o volume e a toxicidade dos resíduos nucleares, quando comparados com os reatores de água pressurizada convencionais (PWR) [94][95]. Os reatores nucleares GFR

utilizam um combustível composto por óxido misto de urânio e plutônio, chamado de MOX, ou carbeto de urânio e plutônio (UC-PuC). O que permite sustentar reações nucleares em um espectro de nêutrons rápidos [95]. A utilização de um espectro nêutrons rápidos permite a queima de elementos transurânicos (TRU), reduzindo assim o tempo de armazenamento dos resíduos nucleares [95][96]. Por conta disso, além do GFR ser capaz de ser empregado na geração de energia nucleoeleétrica, ele pode ser utilizado para outras aplicações como a produção de hidrogênio e a dessalinização de água salgada [95][97].

Os reatores GFR comumente utilizam o gás hélio como fluido refrigerante, por possuir uma elevada capacidade térmica e inércia química, o que proporciona uma transferência de calor eficiente e minimiza os riscos de reações químicas adversas no ecossistema do reator [97][98]. Para tanto, o fluido refrigerante é pressurizado e circula pelo núcleo do reator, onde absorve o calor gerado pela reação nuclear, e depois passa por trocadores de calor para gerar vapor, que é utilizado para acionar turbinas e gerar eletricidade [98][99]. Esta topologia de reator incorpora diversas características passivas de segurança, como a capacidade de remover o calor residual sem a necessidade de sistemas ativos de resfriamento [97][98][100]. Além disso, o GFR também possui um coeficiente de reatividade de temperatura negativo, o que significa que um aumento na temperatura do núcleo do reator resulta em uma redução na taxa de reação nuclear, contribuindo para a estabilidade e segurança do

sistema [97][98], estas duas principais características agregam forte confiabilidade e segurança a esta topologia de reator nuclear.

Um exemplar de projeto de reator de geração nucleoe elétrica do tipo GFR é o projeto ALLEGRO, que é um reator nuclear experimental desenvolvido por uma aliança cooperativa entre a França, a República Tcheca, a Hungria e a Eslováquia, no âmbito do fórum tecnológico *Generation IV International Forum* – GIF [94]. O projeto ALLEGRO foi concebido como uma instalação de pesquisa e demonstração com uma potência térmica instalada entre 50-100 MWt [94][101]. O projeto utiliza combustível de óxido misto de urânio e plutônio (MOX) ou carbeto de urânio e plutônio (UC-PuC) e fluido refrigerante a base de hélio [95][101]. A Tabela 6 apresenta o sumário dos principais dados técnicos do projeto ALLEGRO.

Quanto aos níveis de maturidade tecnológica (TRL) e maturidade produtiva (MRL) do projeto ALLEGRO ainda são baixos, uma vez que o projeto está em estágios iniciais de desenvolvimento e não entrou na fase de construção. O projeto está na fase de estudos conceituais e de design preliminar para abordar aspectos críticos, como segurança, sistemas de refrigeração e combustível [95][97][98]. Portanto o projeto ALLEGRO encontra-se com a maturidade tecnológica (TRL) no nível 1 [25][28][98] e a maturidade produtiva (MRL) no nível 1 [26][27][98].

Tabela 6 – Especificações básicas do projeto ALEGRO.

Fabricante	Potência/ Tipo	Combustível	Moderador	Refrigerante	TRL/MRL	Custo
Consórcio Europeu V4G4	50 a 100 MWt GFR [94][101]	Pastilha cilíndricas de UO <sub>2</sub> <20 % MOX ou UC-PuC Pu 25.5% [101][91]	Não usa moderador (reator rápido)	Gás Hélio [90]	1/1 [98]	-

#### 4.2.2.2. *Sodium-Cooled Fast Reactor* – Solução BN-800

Os reatores nucleares do tipo *Sodium-Cooled Fast Reactor* – SFR são um tipo de reator nuclear de quarta geração (Gen IV) que utiliza um espectro de nêutrons rápidos e um líquido metálico (geralmente sódio) como fluido refrigerante [94]. Os reatores nucleares SFRs também oferecem vantagens significativas em termos de eficiência energética podendo atingir uma 40% ou mais de eficiência térmica. Além disso possuem melhor gerenciamento de resíduos nucleares e segurança em comparação com os reatores de água pressurizada convencionais (PWRs) [102]. Os SFRs utilizam combustíveis à base de óxido misto de urânio e plutônio (MOX) ou combustíveis metálicos à base de urânio e plutônio, com uma matriz de zircaloy ou aço inoxidável [102][103]. A alta densidade de energia do sódio líquido permite uma maior transferência de calor, resultando em maior eficiência térmica e melhor desempenho do reator em comparação com os fluidos refrigerantes convencionais [104].

Os SFRs apresentam fortes características de segurança intrínseca, como o coeficiente de reatividade de temperatura negativo, o que significa

que a reatividade diminui à medida que a temperatura aumenta, proporcionando estabilidade ao reator [102][104][105]. Além disso, o sódio líquido não pressuriza o sistema de refrigeração, reduzindo o risco de explosão ou vazamento em caso de acidente [94][102][106].

Um exemplar de reator nuclear de topologia SFR é o reator nuclear BN-800, localizado na Rússia, que é um reator de nêutrons rápidos refrigerado a sódio com uma capacidade de geração núcleo-elétrica de 880 MWe, e encontra-se em operação comercial desde 2016 [107]. O BN-800 foi parte de um acordo, assinado entre os Estados Unidos e a Rússia, para queima de plutônio oriundo de armamentos. O BN-800 utiliza combustível misto de óxido de urânio e plutônio (MOX) e possui um núcleo projetado para queimar ativamente plutônio e outros elementos transurânicos, contribuindo para a redução dos resíduos nucleares de longa duração [107][108][109]. Além disso, o BN-800 incorpora várias melhorias em termos de segurança e eficiência em comparação aos seus antecessores [109][110]. A Tabela 7 apresenta um sumário das principais características técnicas do reator BN800.

Tabela 7 – Especificações básicas do projeto BN800.

Fabricante	Potência/ Tipo	Combustível	Moderador	Refrigerante	TRL/MRL	Custo
Rosatom	880 MWe GFR [107]	MOX 20.2% [109]	Não usa moderador (reator rápido)	Sódio líquido [108]	8/7	5,2 bi USD [111]

Por estar em operação comercial, o reator nuclear BN-800 possui maturidade tecnológica (TRL) em nível oito [25][28] e maturidade produtiva (MRL) em nível sete [26][27]. Contudo, apesar de que o BN-800 incorpore



várias melhorias em termos de segurança e eficiência em comparação aos seus antecessores, ele não é considerado um reator de quarta geração (Gen IV), pois foi projetado e construído antes da definição dos objetivos e critérios de desempenho específicos para os reatores Gen IV [108][112].

A construção do BN-800 na Rússia teve um custo estimado de aproximadamente US\$ 5,2 bilhões [111], mas o custo de um reator nuclear como o BN-800 varia em função de vários fatores, como normas regulatórias; localização geográfica; parque industrial disponível; capacitação e nível do mercado de trabalho e custos de materiais sensíveis e tecnológicos.

#### **4.2.3. *Lead-Cooled Fast Reactor* – Solução BREST-OD-300**

Os reatores nucleares refrigerados por meio de chumbo líquido (*Lead-Cooled Fast Reactor* – LFR) são um tipo de reator nuclear avançado, de quarta geração (Gen IV), que utiliza nêutrons rápidos para a fissão nuclear e o chumbo líquido ou uma liga de chumbo-bismuto como fluido refrigerante do núcleo. A solução de reator nuclear tipo LFR busca oferecer maior eficiência térmica, melhor gerenciamento de resíduos nucleares e maior segurança passiva em comparação com os reatores convencionais de terceira geração [112][113].

O emprego de chumbo líquido, como fluido refrigerante e escudo de radiação, possui várias propriedades benéficas para aplicações em reatores

nucleares, como a alta capacidade térmica, a excelente condutividade térmica e a baixa pressão de vapor [174][175]. Essas propriedades permitem que os LFRs operem a temperaturas mais altas (em torno de 550-800°C) e em condições de baixa pressão, o que resulta em maior eficiência térmica e uma menor probabilidade de perda de refrigerante [114][115]. Outra vantagem importante dos reatores nucleares LFR é a sua capacidade de utilizar e queimar o combustível nuclear de forma mais eficiente, por operarem com espectro de neutros rápidos, o que contribui para a redução dos resíduos nucleares de longa duração e possibilita a utilização de combustíveis nucleares mais abundantes, como o tório [116]. Além disso, os LFRs possuem características de segurança passiva aprimoradas, como a expansão térmica negativa do fluido refrigerante a base de chumbo, que ajuda a limitar a potência do reator e a resfriar o núcleo em caso de acidentes [115][117].

Um exemplar de reator nuclear de topologia LFR é o projeto russo BREST-OD-300, que é um reator nuclear avançado de nêutrons rápidos refrigerado a chumbo. Este reator de demonstração (protótipo) tem uma capacidade elétrica de 300 MWe e foi projetado com o objetivo de validar e demonstrar as tecnologias envolvidas em reatores refrigerados a chumbo para aplicações futuras em energia nuclear [118].

O reator nuclear BREST-OD-300 que utiliza combustível a base de nitreto de urânio-plutônio (UN-PuN) com um ciclo do combustível nuclear fechado, o que minimiza a produção de resíduos nucleares de longa duração

e ajuda a mitigar a proliferação de materiais nucleares [119]. Além disso, o projeto visa aprimorar questões relacionadas ao ciclo de combustível fechado e ao gerenciamento de resíduos nucleares, ajudando a promover uma energia nuclear mais sustentável e segura. As principais características do projeto BREST-OD-300 incluem:

- Refrigeração a chumbo: O reator BREST-OD-300 utiliza chumbo líquido como fluido refrigerante, o que agrega excelentes propriedades de transferência de calor, baixa pressão de operação, além de atuar como um eficiente escudo de radiação [114];
- Segurança passiva: O reator BREST-OD-300 foi projetado com várias características de segurança passiva, como coeficiente de reatividade negativo, inércia térmica do núcleo, e capacidade de remoção de calor residual [115];
- Ciclo de combustível fechado: O projeto emprega um ciclo de combustível fechado para reduzir a produção de resíduos nucleares e minimizar a proliferação de materiais nucleares [119].
- Flexibilidade no gerenciamento de resíduos: O BREST-OD-300 é capaz de queimar tanto o combustível nuclear gerado em reatores térmicos quanto o plutônio recuperado de armas nucleares, contribuindo para a redução do estoque de resíduos nucleares e material fissil [120].

A Tabela 8 apresenta um sumário das principais características técnicas do reator BREST-OD-300.

Tabela 8 – Especificações básicas do projeto BREST-OD-300.

Fabricante	Potência/ Tipo	Combustível	Moderador	Refrigerante	TRL/MRL	Custo
Rosatom	300 MWe LFR [118]	MOX 10 a 15% [120]	Não usa moderador (reator rápido)	Chumbo líquido [114]	4/3	412 mi USD [121]

A construção do primeiro reator nuclear BREST-OD-300 iniciou em 2020 e está prevista para ser concluída em 2026 [118][119], a um custo previsto de US\$ 412 milhões [121]. Infelizmente os detalhes do projeto, estágio da certificação/comissionamento, andamento da construção e custos não estão disponíveis. Contudo, dado ao estágio de construção de um protótipo já iniciado, pode-se classificar o reator nuclear BREST-OD-300 com uma maturidade tecnológica (TRL) de nível 4 [25][28][118] e com uma maturidade produtiva (MRL) de nível 3 [26][27][118].

### 4.3. Ciclo da Fissão do U-233

O ciclo da fissão do U-233 (urânio-233) consiste em uma opção de combustível nuclear alternativa que utiliza o tório como matéria-prima. O U-233 é produzido a partir da conversão do tório-232 (Th-232) em protactínio-233 (Pa-233), após a absorção de um nêutron e que, posteriormente, decai para urânio-233, através de decaimento beta [122]. O ciclo da fissão do U-233 possui alguns atrativos, devido à abundância do tório na crosta terrestre, o que se estima ser de cerca de três a quatro vezes maior do que a do urânio [123].

O ciclo da fissão do U-233 é geralmente empregado em reatores de tório, como os Reatores de Sal Fundido (*Molten Salt Reactors* - MSR) e os Reatores de Água Pesada (*Pressurized Heavy Water Reactors* - PHWR) [124]. O U-233 ainda pode ser empregado como elemento fissil em misturas com outros isótopos de urânio, como o U-238 e como elemento fértil em combinação com plutônio ou urânio altamente enriquecido (*High Enrichment Uranium* - HEU) [125].

Uma das principais vantagens do ciclo da fissão do U-233 é a sua capacidade de reduzir a quantidade de resíduos nucleares de longa duração, já que o tório produz menos produtos de fissão do que outros ciclos de combustível [126]. Além disso, o ciclo do combustível do U-233 possui um potencial de proliferação nuclear reduzido, pois o U-232, um subproduto inevitável da produção de U-233, emite radiação gama de alta energia, tornando o material difícil de ser manuseado e facilmente detectável a distância [127].

O ciclo da fissão do U-233 é uma boa opção de combustível nuclear devido à abundância de tório no planeta Terra, devido também à redução dos resíduos nucleares de longa duração e ao menor potencial de proliferação nuclear agregado. Todavia, o estabelecimento deste ciclo requer o desenvolvimento de tecnologias avançadas de reatores, aprimoramento dos processos de fabricação de combustível e estratégias de gerenciamento de resíduos nucleares [125][126].

O ciclo da fissão do U-233 ainda não é empregado na indústria de geração de energia nuclear. No entanto, ele foi explorado e testado em alguns projetos de pesquisa e reatores experimentais. Como por exemplo, o Reator Experimental de Sal Fundido (Molten Salt Reactor Experiment - MSRE), operado no Oak Ridge National Laboratory nos Estados Unidos entre 1965 e 1969, utilizou o ciclo da fissão do U-233 [128].

Outro desafio desta tecnologia trata-se do processo de produção do U-233 a partir do tório que é mais complexo do que o processo de enriquecimento de urânio para obter U-235. A conversão do tório em U-233 envolve a absorção de um nêutron pelo tório-232, seguida pela transmutação em protactínio-233 e do decaimento deste em urânio-233 [129]. Isso pode aumentar os custos de produção de combustível para o ciclo U-233 em comparação com o ciclo U-235.

Outrossim, a maioria dos reatores comerciais existentes utiliza o ciclo da fissão do U-235, o que significa que os custos associados à implantação e operação desses reatores são bem conhecidos e otimizados. Enquanto para o ciclo da fissão do U-233 há a necessidade do desenvolvimento e implantação de tecnologias de reator avançadas, como reatores de sal fundido (MSRs) ou reatores de alta temperatura resfriados a gás (HTRs), que podem ter custos iniciais mais altos devido ao investimento em pesquisa, desenvolvimento e implantação [130][131].

Em relação ao reprocessamento e gerenciamento de resíduos, o ciclo da fissão do U-233 pode gerar menos resíduos nucleares de longa duração em comparação com o ciclo U-235, o que pode resultar em custos de gerenciamento de resíduos potencialmente mais baixos [131]. No entanto, a infraestrutura e os processos de reprocessamento para o ciclo de combustível U-233 ainda não foram desenvolvidos, o que pode gerar custos adicionais.

Outrossim, o ciclo da fissão do U-235 já possui regulamentações e protocolos de segurança bem estabelecidos devido ao seu uso generalizado na indústria nuclear. Em contraste, o ciclo de combustível U-233, que não é amplamente utilizado, vai exigir o desenvolvimento de novas regulamentações e diretrizes de segurança, o que pode aumentar o custo total [132].

Em resumo o ciclo da fissão do U-233 ainda está na fase de pesquisa e desenvolvimento para muitas de suas aplicações. Enquanto o ciclo da fissão do U-235 possui uma longa história e um desenvolvimento extenso, resultando em uma tecnologia mais madura e robusta, com custos bem conhecidos [133].

Encerra-se a análise das soluções tecnológicas de reatores nucleares de fissão, abaixo serão analisadas as soluções tecnológicas de reatores nucleares do ciclo de fusão nuclear.

#### 4.4. Relação das Soluções Tecnológicas de Ciclos de Fusão

Nesta sessão analisadas soluções tecnológicas inovadoras para os ciclos de fusão nuclear do deutério-trítio, deutério-hélio-3, deutério-deutério, próton-boro e hidrogênio-metal alcalino. Serão analisadas as soluções das seguintes empresas:

- ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*), o ITER não é uma empresa, mas uma colaboração internacional entre 35 países, que está desenvolvendo soluções para o ciclo da fusão nuclear do deutério-trítio;
- Commonwealth Fusion System (CFS), com soluções para o ciclo da fusão nuclear do deutério-trítio;
- Helion Energy, com soluções para o ciclo da fusão nuclear do deutério-hélio-3;
- Compact Fusion Reactor (CFR), uma empresa pertencente a gigante da indústria de defesa americana Lockheed Martin, com soluções para o ciclo da fusão nuclear do deutério-deutério;
- Zap Energy, com soluções para o ciclo da fusão do deutério-deutério;
- Tri-Alpha Energy, conhecida como TAE Fusion Power, com soluções para o ciclo da fusão nuclear do próton-boro (p-B11);



- Lawrenceville Plasma Physics (LPP), uma empresa bastante interessante com soluções para o ciclo da fusão nuclear do próton-boro (p-B11);
- HB11 Energy, com soluções para o ciclo da fusão próton-boro (p-B11);
- Brilliant Light Power Inc, com soluções no âmbito do ciclo da fusão nuclear do hidrogênio-metal alcalino.;
- Clean Planet Inc, uma empresa japonesa que traz soluções no ciclo da fusão nuclear de baixa energia (LENR);
- Brillouin Energy Corp, com soluções para o ciclo da fusão nuclear de baixa energia (LENR); e
- Leonardo Corporation, também com soluções para o ciclo da fusão nuclear de baixa energia (LENR).

#### 4.4.1. Ciclo da Fusão do Deutério-Trítio

O ciclo da fusão do deutério-trítio se baseia em reações de fusão nuclear que ocorrem por meio da interação de núcleos de deutério ( $^2\text{H}$ ) e de trítio ( $^3\text{H}$ ), dois isótopos do hidrogênio [134]. Essas reações têm atraído grande interesse na pesquisa de energia nuclear, devido ao seu potencial como fonte de energia limpa e sustentável. A fusão do deutério-trítio ocorre em duas etapas principais. Na primeira etapa, um núcleo de deutério e um núcleo de trítio se fundem, formando um núcleo de hélio-4 ( $^2\text{H} + ^3\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + n$ ), com a

liberação de um nêutron de alta energia [135]. A energia liberada nesta reação é de aproximadamente 17,6 MeV, sendo a maior parte na forma de energia cinética no nêutron [136]. A segunda etapa consiste na captura do nêutron por um núcleo de lítio, sendo transformado em trítio, completando assim o ciclo ( ${}^6\text{Li} + n \rightarrow {}^3\text{H} + {}^4\text{He}$ ) [137].

Uma comparação detalhada entre as duas etapas pode ser realizada analisando as diferenças entre o ciclo de fusão do deutério-trítio e outros ciclos de fusão nuclear, como o ciclo do deutério-deutério ( ${}^2\text{H} + {}^2\text{H}$ ). O ciclo de fusão do deutério-deutério é um processo no qual dois núcleos de deutério se fundem, gerando dois possíveis produtos: um núcleo de trítio e um próton ( ${}^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{H} + p$ ) ou um núcleo de hélio-3 e um nêutron ( ${}^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + n$ ) [138].

A principal diferença entre os dois ciclos está na energia liberada e na taxa de reação. A reação de fusão do deutério-trítio libera mais energia do que a reação de deutério-deutério, além de ter uma seção transversal de fusão maior, o que significa que a taxa de reação é mais alta [139]. Isso torna o ciclo do deutério-trítio mais atraente do ponto de vista da produção de energia.

Todavia, o ciclo do deutério-trítio apresenta desafios, tais como a dificuldade de obtenção e armazenamento do trítio, que é um isótopo radioativo do hidrogênio, com meia-vida de apenas 12,3 anos [140]. Além disso, os nêutrons de alta energia gerados na reação de fusão do deutério-trítio podem ativar os materiais do reator e gerar resíduos radioativos [141].

A produção de deutério e trítio utiliza processos distintos devido às suas características e respectiva abundância na natureza.

No caso do deutério ( $^2\text{H}$ ), também conhecido como hidrogênio pesado, que é um isótopo estável do hidrogênio, ele pode ser encontrado naturalmente e de forma abundante na água. Cerca de 1 em cada 6.500 átomos de hidrogênio na água é um átomo de deutério. Para extraí-lo é necessário separá-lo do hidrogênio comum ( $^1\text{H}$ ) presente na água [142]. Uma das técnicas empregadas para realizar essa separação é a destilação fracionada. A destilação fracionada aproveita a diferença nas temperaturas de ebulição da água pesada (101,4 °C) e da água comum (100,0 °C). Dessa forma a água é aquecida e os vapores são coletados em função da temperatura da água em ebulição. Os vapores são condensados separadamente em frações com diferentes concentrações de deutério [143].

Outra forma é através da eletrolise, onde a água é decomposta em hidrogênio e oxigênio por meio de uma corrente elétrica. Como o deutério tem uma taxa de descarga menor que o hidrogênio comum, a concentração de deutério aumenta no eletrodo negativo (cátodo) [144], onde pode ser coletado.

Outra forma é através da troca química, que é a troca isotópica entre a água e um composto químico, como a amônia por exemplo, que é utilizada no processo de separação. A diferença na energia de ligação entre

os isótopos de hidrogênio produz uma preferência no processo de troca, concentrando o deutério no composto químico [145].

No caso do trítio ( $^3\text{H}$ ), trata-se de um isótopo radioativo do hidrogênio com uma meia-vida de aproximadamente 12,3 anos. Ocorre que sua disponibilidade na natureza é extremamente baixa, por conta disso é necessário produzi-lo a partir de outros materiais, o que eleva sobremaneira o seu custo [146]. Há duas principais formas de obtenção do trítio, uma é através de reatores nucleares de fissão. O trítio pode ser produzido em reatores nucleares de fissão através da captura de nêutrons por um núcleo de lítio-6 ( $^6\text{Li}$ ), como já visto [147]. Esse processo ocorre no interior de barras de combustível de lítio ou no fluido refrigerante do reator. Outra forma de se obter o trítio é através de aceleradores de partículas, neste caso o trítio é produzido através do bombardeamento de alvos de lítio com prótons de alta energia gerando trítio e hélio-3 ( $^7\text{Li} + \text{p} \rightarrow ^3\text{H} + ^4\text{He}$ ) [148].

Portanto, pode-se concluir que a fusão do deutério-trítio tende a ser mais eficiente em termos energéticos, além de apresentar uma taxa de reação maior em comparação com o ciclo do deutério-deutério. No entanto, possui a dificuldade na obtenção e no armazenamento do trítio e na geração de nêutrons de alta energia, que podem ativar os materiais do reator. O ciclo do deutério-deutério, embora menos eficiente, oferece vantagens em termos de disponibilidade de recursos e simplicidade do processo.

#### 4.4.1.1. *Solução ITER*

O ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) é uma colaboração internacional entre 35 países, incluindo membros da União Europeia, China, Índia, Japão, Coreia do Sul, Rússia e Estados Unidos [149] para a pesquisa e desenvolvimento da tecnologia de fusão nuclear. O objetivo do projeto ITER é demonstrar a viabilidade científica e tecnológica da fusão nuclear como fonte de energia limpa e praticamente inesgotável. O reator de fusão nuclear desenvolvido pelo ITER é um reator do tipo tokamak, que pretende gerar 500 MW [150] que faz uso do confinamento magnético, sendo projetado para confinar e controlar o plasma de alta temperatura (cerca de 100 a 150 milhões de graus Celsius) necessários para as reações de fusão nuclear [151].

O confinamento magnético no tokamak é alcançado utilizando conjuntos de bobinas magnéticas que geram dois campos magnéticos, um toroidal e outro poloidal. O campo magnético toroidal, criado por bobinas circundantes externas, tem a função de comprimir o plasma no centro do reator, em um formato toroidal. O campo magnético poloidal, gerado por uma corrente elétrica que flui através do próprio plasma, tem a função de manter a estabilidade do plasma e a prevenir instabilidades [151] geradas pela turbulência do fluido e iterações eletromagnéticas. Ainda, o campo magnético poloidal é essencial para impedir que o plasma entre em contato com as

paredes do reator. Isso é crucial por conta das temperaturas extremamente altas do plasma (da ordem de 100 a 150 milhões de graus Celsius) [151][152].

A fusão nuclear ocorre quando os núcleos do combustível (geralmente deutério e trítio) se fundem, formando um núcleo de hélio e liberando um nêutron de alta energia. A energia liberada na forma de calor é usada para aquecer um fluido, que então é usado para gerar eletricidade por meio de turbinas a vapor convencionais [153]. O projeto ITER visa alcançar uma relação de ganho de energia (Q) maior que 10, o que significa que a energia gerada pela fusão deve ser pelo menos dez vezes maior que a energia necessária para aquecer e confinar o plasma [153].

A construção do ITER começou em 2010 no sul da França, e o progresso tem sido substancial desde então. A formação do primeiro plasma está prevista para 2025, seguida por experimentos de fusão com trítio e deutério, visando atingir a plena potência em 2035 [154][155][156]. Em função do protótipo estar em construção com 78.1% [157] das obras concluídas e com os primeiros testes previstos para 2025, o funcionamento pleno para 2035, pode-se classificar o reator nuclear de fusão do ITER com uma maturidade tecnológica (TRL) no nível 3 [25][28][154][155][156] e com uma maturidade produtiva (MRL) no nível 2 [26][27][154][155][156].

O custo total do projeto ITER, incluindo a construção do reator nuclear, os custos associados ao desenvolvimento e fabricação dos componentes do reator pelos países participantes, é estimado

aproximadamente em cerca de 20 a 25 bilhões de euros [158][159]. O financiamento do projeto ITER é compartilhado pelos 35 países participantes, com a União Europeia contribuindo com aproximadamente 45% do custo total e o restante dividido entre os outros países membros [160].

#### 4.4.1.2. *Solução Commonwealth Fusion System*

A Commonwealth Fusion Systems (CFS) é uma empresa voltada para a busca de soluções tecnológicas de energia limpa, fundada por pesquisadores do MIT Plasma Science and Fusion Center (PSFC). A CFS busca desenvolver e pretende comercializar a energia de fusão nuclear como uma fonte de energia sustentável e confiável. O projeto principal da CFS é o reator de fusão nuclear *Soonest / Smallest Private-Funded Affordable Robust Compact* – SPARC [161][162].

O SPARC é um reator de fusão nuclear do tipo tokamak, que pretende gerar entre 50 e 100 MWt [150], é um reator similar ao reator em desenvolvimento pelo consorcio internacional ITER já tratado na sessão anterior (5.2.1). Contudo, diferentemente do ITER, o SPARC está sendo projetado para ser significativamente menor e mais compacto. O projeto SPARC busca utilizar ímãs supercondutores de última geração, feitos de fitas de óxido de bário, cobre e ítrio (REBCO) capazes de criar campos magnéticos

de extrema força e, assim, permitir um projeto de reator nuclear menor e mais eficiente [161][163].

O objetivo do projeto SPARC é demonstrar a viabilidade científica e tecnológica da fusão nuclear em uma escala menor e mais rápida do que o ITER. O SPARC visa alcançar uma relação de ganho de energia (Q) maior que 10, o que significa que a energia gerada pela fusão deve ser pelo menos duas vezes maior que a energia necessária para aquecer e confinar o plasma [164]. Se o SPARC for bem-sucedido, a CFS planeja desenvolver e construir um reator de fusão comercial chamado *Affordable Robust Compact* – ARC [165]. O ARC seria um reator de fusão nuclear em escala comercial, capaz de gerar energia nucleoeleétrica competitiva em comparação com outras fontes de energia.

Contudo o projeto SPARC ainda se encontra em fases iniciais de desenvolvimento, atualmente a equipe do projeto está trabalhando na otimização do design do reator, na validação das simulações e na construção de componentes críticos, como os ímãs supercondutores [161][162][164][166]. Os ímãs supercondutores são um componente crucial do projeto SPARC, pois são responsáveis pela criação dos campos magnéticos de extrema força. Em setembro de 2020, a CFS e o MIT anunciaram a conclusão bem-sucedida de um teste de um ímã supercondutor de alta temperatura (*High Temperature Superconductor* - HTS) a nível de protótipo, o que representa um marco importante no desenvolvimento do projeto SPARC [162] [167].



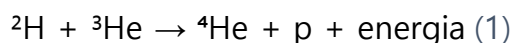
A equipe do projeto planeja alcançar o 'primeiro plasma' até 2025 [162][166][167]. Em conformidade com as metodologias discutidas nas sessões 4.2 e 4.3 e em função do estágio de validação de simulações, construção e testes bem-sucedidos de elementos críticos do projeto, início da construção do reator [167] e a previsão de início das atividades em 2025, pode-se classificar o projeto de reator nuclear de fusão SPARC com uma maturidade tecnológica (TRL) no nível 2 [25][28][162][166][168] e com uma maturidade produtiva (MRL) no nível 1 [26][27][162][166][168].

Em relação aos custos do projeto SPARC, a CFS não divulga os custos, mas no site da empresa é declarado que desde que foi fundada em 2018 a CFS já recebeu um total de 2 bilhões de dólares [169], além de diversas premiações como em janeiro de 2023, quando recebeu o prêmio *Department of Energy's Innovation Network for Fusion Energy – INFUSE*. Tendo em vista o andamento das obras e a proximidade para a conclusão do primeiro protótipo estima-se que o desenvolvimento e construção do protótipo SPARC tenha um custo de 2 bilhões de dólares.

#### **4.4.2. Ciclo da Fusão Deutério-Hélio-3**

O ciclo da fusão deutério-hélio-3 ( ${}^2\text{H}+{}^3\text{He}$ ) se baseia na reação entre núcleos de deutério ( ${}^2\text{H}$ ) e hélio-3 ( ${}^3\text{He}$ ). Esta reação é vantajosa devido à sua natureza aneutrônica, o que significa que em comparação com os outros ciclos

de fusão, como o deutério-trítio, produz menos nêutrons de alta energia e, portanto, menos radioatividade induzida nos materiais do reator [170]. A reação do ciclo de fusão deutério-hélio-3 pode ser vista pela Equação 1:



Nesta reação, um núcleo de deutério e um núcleo de hélio-3 se fundem para formar um núcleo de hélio-4 ( ${}^4\text{He}$ ) e um próton (p). A maior parte da energia liberada nesta reação está na forma de energia cinética no próton produzido [171]. Embora o ciclo da fusão do deutério-hélio-3 tenha várias vantagens em comparação com outros ciclos de fusão, como menor radioatividade induzida e maior eficiência energética, ele ainda enfrenta alguns desafios referentes a implementação prática. Um dos principais obstáculos é a disponibilidade limitada de hélio-3 no planeta [172]. Sendo o Hélio-3 um isótopo raro, a maioria das fontes disponíveis atualmente vêm de reatores nucleares ou de reações de decaimento do trítio acumulado em estoques de armas nucleares [173].

Outro desafio no desenvolvimento do ciclo de fusão deutério-hélio-3 é a necessidade de uma temperatura de plasma maior em comparação com outros ciclos de fusão, como deutério-trítio, devido a maior força de repulsão eletrostática entre os núcleos carregados positivamente [175]. Apesar desses desafios, o ciclo de fusão deutério-hélio-3 continua sendo uma área de pesquisa promissora, devido ao seu potencial para produzir energia de fusão limpa e sustentável [175].

#### 4.4.2.1. Solução Helion Energy

A Helion Energy é uma empresa privada que busca soluções para a produção de energia nucleoe elétrica por meio da fusão nuclear. A Helion Energy trabalha com o conceito de Fusão Magnética Inercial – FMI, que combina aspectos de fusão magnética e de fusão inercial para atingir a fusão nuclear em um dispositivo compacto e eficiente [176]. A técnica de fusão por confinamento magneto-inercial (FMI) é um conceito híbrido, que combina elementos das abordagens de fusão magnética e fusão inercial, buscando superar as limitações e desafios enfrentados por cada uma dessas técnicas isoladamente [177].

Na fusão magnética, campos magnéticos são usados para confinar e controlar o plasma, mantendo-o isolado das paredes do reator e aquecendo-o até as temperaturas necessárias para a fusão ocorrer. Os tokamaks e estelators são exemplos de dispositivos de fusão magnética [153]. Um grande desafio enfrentado por esta técnica é o controle das instabilidades do plasma.

Já na técnica de fusão inercial, o combustível é comprimido e aquecido rapidamente por pulsos intensos de energia, como lasers ou feixes de partículas. Estes pulsos empurram o plasma por meio de choques

mecânicos, criando um plasmóide de alta densidade e alta temperatura em um ponto alvo em um curto período, resultando na fusão nuclear [178].

A técnica de fusão magneto-inercial FMI combina a compressão do plasma e a rápida transferência de energia da fusão inercial com o confinamento magnético da fusão magnética. Isso é feito, por exemplo, acelerando um plasma em forma de anel, como na configuração de campo invertido (FRC), ao longo de um campo magnético até uma zona de colisão central, onde ocorre a fusão. Em alguns casos, feixes de íons de alta energia são injetados no plasma para aumentar ainda mais a densidade e a temperatura, permitindo que a fusão ocorra [176].

A técnica de configuração de campo invertido *Field-Reversed Configuration* – FRC consiste na formação de um anel compacto e autoconfinado de plasma, por meio do emprego de campos magnéticos invertidos em relação ao campo magnético externo principal [179]. O FRC é considerado uma abordagem promissora para a fusão nuclear, devido à sua simplicidade, alta pressão alcançada no plasma e potencial para operação em estado estacionário (estado de equilíbrio dinâmico, onde as propriedades do plasma, como densidade, temperatura e distribuição de partículas, permanecem constantes ao longo do tempo, ou seja, processos como a geração de energia, perda de energia e transporte de partículas entram em equilíbrio, a obtenção deste estado é o objetivo da maioria dos reatores nucleares de fusão [180]).

A formação do FRC ocorre geralmente através de um processo chamado "reversão do campo", que envolve a aplicação de uma corrente elétrica rápida e muito intensa ao longo de um campo magnético externo estático. Esse processo leva à inversão do campo magnético interno do plasma e à formação do anel compacto de plasma [180][181]. As linhas de campo magnético no FRC são fechadas dentro do anel de plasma, o que permite o confinamento eficiente das partículas carregadas e a redução das perdas de energia para as paredes do reator. Além disso, o FRC possui uma relação favorável entre a pressão do plasma e a pressão magnética, o que contribui para a estabilidade e a eficiência do processo de fusão [181][182].

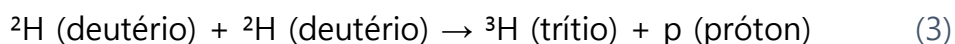
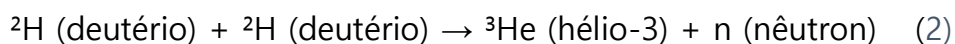
A técnica de fusão magneto-inercial FMI tem o potencial de ser mais escalável e econômica do que outros conceitos de reator de fusão, devido à sua capacidade de operar em escalas menores e com taxas de repetição mais altas. Além disso, alguns projetos de FMI, como o reator Polaris de 50 MW da Helion Energy [183], propõem o uso de combustíveis de fusão mais acessíveis e abundantes, como deutério e hélio-3, reduzindo os problemas associados à disponibilidade de combustível e à produção de resíduos radioativos [184]. Ao todo a empresa já desenvolveu 6 experimentos, sendo o Polaris 7 o experimento mais atual, previsto para estar operacional em 2024 [176][185]. Mas a empresa já trabalha no desenvolvendo do oitavo experimento, a suceder o reator nuclear Polaris.

A Helion Energy espera que o projeto Polaris seja capaz de produzir energia de fusão de forma sustentável e a custos competitivos em comparação com outras fontes de energia [184][186]. Portanto, tendo em conto caráter sigiloso que trabalha a empresa, utilizando as informações disponíveis de forma aberta e lícita, em conformidade com as metodologias discutidas nas sessões 4.2 e 4.3, considerando o estágio atual de desenvolvimento de componentes e sistemas, teste em um ambiente controlado de laboratório, verificação de desempenho da tecnologia e novo ciclo de desenvolvimento e robustecimento/aprimoramento para posterior testes mais rigorosos [184][186], pode-se classificar o projeto de reator nuclear de fusão FMI da Helion Energy com uma maturidade tecnológica (TRL) no nível 1 [25][28][176][184][186] e com uma maturidade produtiva (MRL) no nível 1 [26][27][176][184][186].

Quanto ao montante investido no trabalho da Helion Energy ao longo dos seus sete experimentos é difícil de precisar, pois os detalhes contábeis não são abertos. Contudo foi divulgado pela empresa que ela havia arrecadado mais de US\$ 500 milhões em financiamento de investidores para o desenvolvimento de seu reator de fusão [187]. Embora esse montante inclua fundos para pesquisa, desenvolvimento e construção do protótipo, não se pode garantir que represente o investimento total realizado pela empresa, já que isso pode incluir outras despesas relacionadas à empresa, como capital de giro e custos operacionais.

#### 4.4.3. Ciclo da Fusão Deutério-Deutério

O ciclo da fusão deutério-deutério (D-D) consiste na fusão de dois núcleos de deutério ( $^2\text{H}$ ) em condições de alta pressão e temperatura. A reação de fusão D-D pode resultar em dois produtos possíveis, com probabilidades semelhantes, conforme pode ser visto na Equação 2 e 3.



As reações de fusão D-D são importantes na área de fusão nuclear, pois, em comparação com o trítio que é radioativo e raro, o deutério é relativamente abundante na natureza, como já visto anteriormente. Além disso, as reações D-D produzem menos nêutrons de alta energia do que as reações de deutério-trítio, o que é benéfico em termos de ativação de materiais e gerenciamento de resíduos nucleares [188].

Contudo, a reação D-D apresenta desafios significativos em comparação com o ciclo de fusão deutério-trítio (D-T). A principal barreira é a temperatura necessária para que a reação D-D ocorra, esta é significativamente maior do que a necessária para a reação D-T. A temperatura de ignição para o ciclo D-D é estimada em cerca de 100 milhões de graus Celsius, enquanto a temperatura para o ciclo D-T é de cerca de 50 milhões de graus Celsius [189]. Além disso, o produto da reação D-D envolve a formação

do trítio que pode levar à subsequente reação de fusão D-T, aumentando assim a produção de nêutrons e a ativação de materiais estruturais do reator [190].

#### 4.4.3.1. Solução Lockheed Martin

A Lockheed Martin é uma empresa multinacional de defesa, segurança e aeroespacial, de grande capilaridade no mercado estadunidense e mundial. A abordagem da Lockheed Martin para alcançar a fusão nuclear é baseada em um tipo de configuração de campo magnético chamado "*cusp* magnético" [191]. O objetivo é criar um reator de fusão compacto e escalável que possa ser utilizado para gerar energia elétrica de maneira limpa e sustentável. O projeto de reator nuclear de fusão da empresa é chamado de Compact Fusion Reactor – CFR e pretende gerar em torno de 100 MWe [192] a partir de 2025 [192].

O projeto do reator nuclear CFR da Lockheed Martin é significativamente menor do que os reatores de fusão convencionais, como os tokamaks ou estelators. Isso é possível devido à geometria específica do *cusp* magnético, que permite confinar o plasma de forma eficiente em um espaço compacto [193]. O conceito de *cusp* magnético é baseado na interação de campos magnéticos externos e internos que geram pontos de equilíbrio magnético, conhecidos como "*cusps*", onde o plasma é confinado [194]. Esses



*cusps* estão localizados ao longo do eixo central do reator e são responsáveis por manter o plasma estável e quente o suficiente para sustentar as reações de fusão, como pode ser visto nas Figura 1 e 2, abaixo.

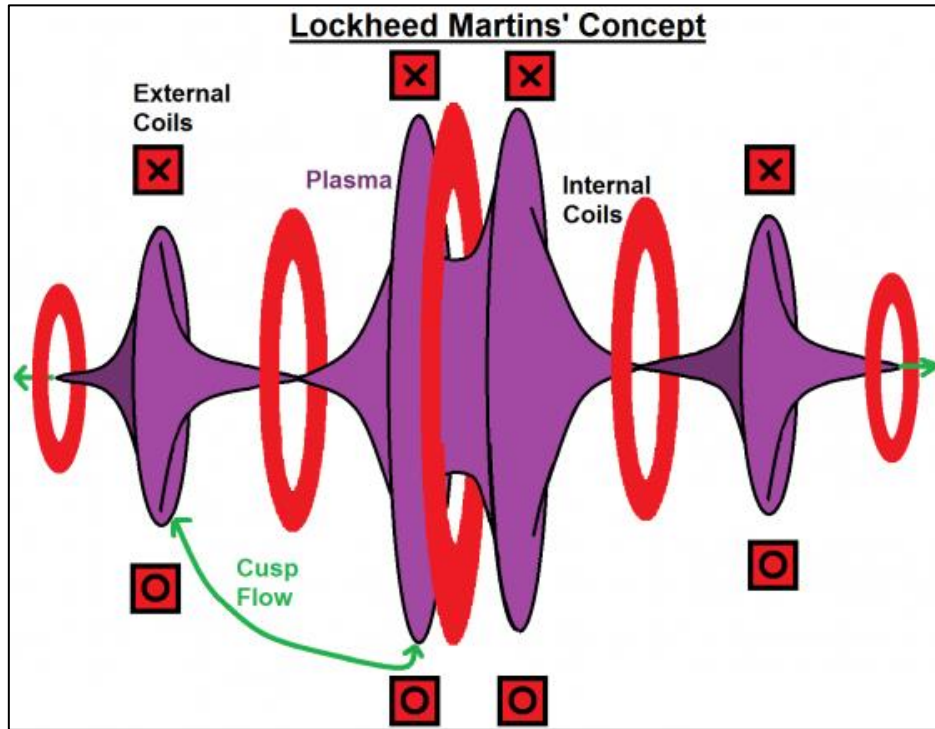


Figura 1 – Conceito de "Cusp" Magnético em fusão nuclear.  
Fonte: BESA Center Perspectives Paper No. 909, July 29, 2018

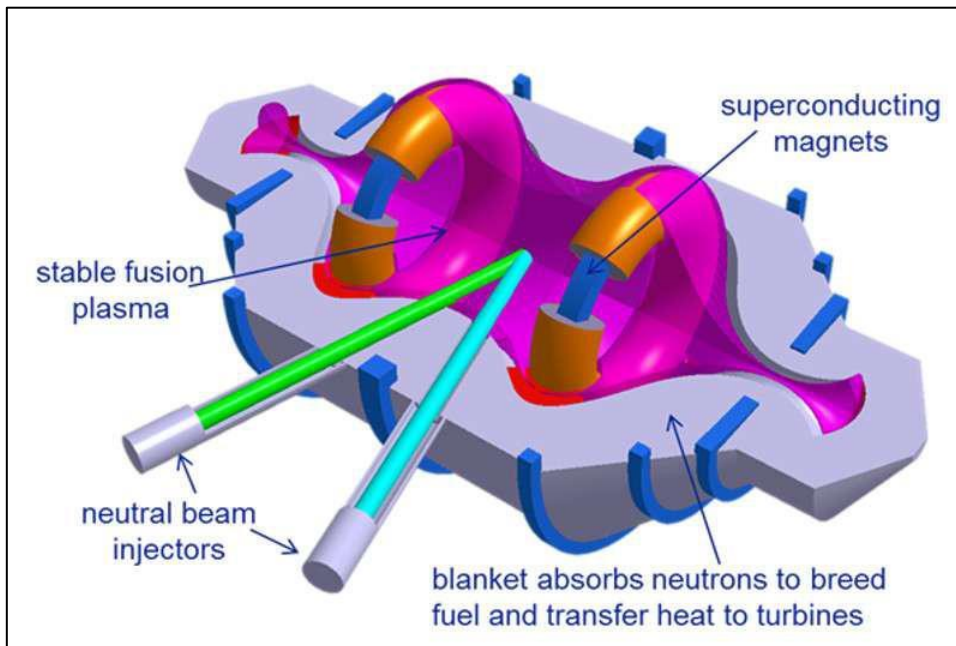


Figura 2 – Conceito do reator CFR da Lockheed Martin.  
FONTE: LOCKHEED MARTIN

O "*cusp*" magnético é um conceito em física do plasma e engenharia de fusão nuclear referente a uma região onde os campos magnéticos de diferentes direções encontram-se e interagem, criando um ponto de equilíbrio magnético, ou seja, um ponto de estado estacionário do plasma [194]. A região de *cusp* magnético é utilizada para confinar o plasma no reator de fusão nuclear CFR [191], pois esses pontos de equilíbrio atuam como barreiras que impedem as partículas carregadas de escapar do plasma confinado [193]. Como resultado, o plasma é mantido em uma região compacta e estável, onde as reações de fusão podem ocorrer de forma eficiente. Uma das principais vantagens do *cusp* magnético é que ele pode permitir o confinamento de plasma em espaços compactos, o que pode reduzir o tamanho e o custo dos reatores de fusão nuclear baseados nesse princípio [195].

A Lockheed Martin acredita que seu projeto de CFR tem o potencial de acelerar a comercialização da energia de fusão, devido ao seu tamanho compacto, custos reduzidos de construção e manutenção, e possibilidade de implantação rápida [195]. No entanto, é importante notar que o projeto CFR ainda está em fase de pesquisa e desenvolvimento, e muitos desafios técnicos precisam ser superados antes que se torne uma realidade comercial.

Em termos de maturidade tecnológica e produtiva, tem-se que o projeto de reator nuclear de fusão CFR da Lockheed Martin teve início em 2010 com a pretensão de estar operacional em 2025 [192]. A princípio o

objetivo era desenvolver um reator de fusão nuclear compacto e eficiente [191]. Em 2014, a equipe do projeto anunciou ter alcançado avanços no projeto do reator e na compreensão da física do plasma [196].

Com base nas informações disponíveis, tendo em conta as premissas das sessões 4.2 e 4.3, é razoável estimar que o projeto CFR esteja em um nível 1 de TRL, onde a pesquisa básica está sendo conduzida para identificar os princípios científicos fundamentais subjacentes à tecnologia [25][28][191][195][196]. Quanto ao MRL, é provável que o projeto esteja com um nível 1, uma vez que a equipe está realizando pesquisas básicas [26][27][191][195][196].

Quanto ao montante investido não foram encontradas fontes com valores confiáveis.

#### **4.4.3.2. Solução Zap Energy**

A Zap Energy é uma empresa sediada em Seattle, nos Estados Unidos, fundada por Brian Nelson e Uri Shumlak, ambos professores de engenharia elétrica e de computação da Universidade de Washington. A empresa é focada na busca por soluções tecnológicas para a área de fusão nuclear compacta. Nos dias correntes está desenvolvendo um reator de fusão nuclear baseado no conceito chamado Z-Pinch (*Sheared Flow Stabilized Z-Pinch* ou SFS Z-Pinch) [197]. A intenção da empresa é desenvolver uma

solução compacta, escalável e econômica para a produção de energia nuclear-elétrica por meio da fusão nuclear.

O conceito SFS Z-Pinch deriva da abordagem Z-Pinch tradicional, na qual correntes elétricas de alta intensidade são empregadas para comprimir o gás combustível até gerar um plasma, o processo continua e aumenta a pressão e a temperatura até atingir as condições para ocorrer a fusão nuclear [198]. Contudo, a abordagem SFS Z-Pinch é diferente da Z-Pinch convencional, uma vez que utiliza um fluxo de plasma cisalhado para estabilizar o plasma e reduzir a instabilidade comuns em topologias do tipo Z-Pinch [199].

Assim, a estabilização do plasma obtida através da introdução de um fluxo de plasma com velocidades diferentes ao longo do raio do plasma principal, criando um cisalhamento que reduz a instabilidade e faz com que o plasma seja comprimido a densidades e temperaturas muito elevadas [199]. Isso resulta em uma configuração de plasma mais estável e energeticamente eficiente. A Zap Energy conseguiu demonstrar a estabilização do plasma em ambiente laboratorial e vem trabalhando para aumentar a densidade e a temperatura do plasma, buscando atingir as condições necessárias para a ocorrência da fusão nuclear [197].

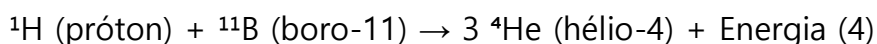
Em relação a maturidade tecnológica e produtiva alcançada pela Zap Energy, com base nas informações disponíveis, tendo ainda em conta as premissas das sessões 4.2 e 4.3, é razoável estimar que o reator de fusão da Zap Energy esteja com um TRL 1, onde a pesquisa básica está sendo conduzida

para identificar os princípios científicos fundamentais subjacentes à tecnologia [25][28][197][198][199]. Quanto ao MRL, é provável que o projeto esteja no nível 1, uma vez que a equipe está realizando pesquisas básicas [26][27][197][198][199].

Em relação ao montante investido, a Zap Energy recebeu US\$ 6,8 milhões [227] do Departamento de Energia dos Estados Unidos (DoE) por meio do programa ARPA-E, que visa apoiar tecnologias de energia inovadoras e de alto impacto. Em maio de 2021 a empresa anunciou a captação de mais US\$ 27,5 milhões [200] de grupos de investimentos em energia limpa, incluindo a Chevron Technology Ventures, o que totaliza um montante de US\$ 34,3 milhões, o que é pouco frente a outras soluções analisadas acima.

#### 4.4.4. Ciclo da Fusão Próton-Boro

O ciclo da fusão próton-boro (p-B) trata-se de uma reação nuclear de fusão resultante da colisão de um núcleo de hidrogênio (próton) e um núcleo de boro-11 ( $^{11}\text{B}$ ). A reação p-B é representada pela  $^1\text{H}$  (próton) +  $^{11}\text{B}$  (boro-11)  $\rightarrow$  3  $^4\text{He}$  (hélio-4) + Energia:



Esta reação é uma reação aneutrônica, ou seja, não produz nêutrons como produto da reação, tornando-se uma boa opção para a geração de energia, devido à redução da ativação de materiais estruturais do reator e a

redução na produção de resíduos radioativos [201]. Além disso, a ausência de nêutrons torna mais fácil a conversão direta da energia cinética dos produtos da reação de fusão em eletricidade, o que pode elevar a eficiência do processo de geração de energia [6].

No entanto, a reação p-B apresenta alguns desafios significativos em comparação com outras reações de fusão, como as reações deutério-trítio (D-T) e deutério-deutério (D-D). O principal desafio é a alta temperatura necessária para que a reação p-B ocorra. A temperatura de ignição para a reação p-B é estimada em cerca de 3 bilhões de graus Celsius, muito maior do que a necessária para as reações D-T e D-D [4].

Outro desafio é a baixa seção transversal da reação p-B, o que significa que a probabilidade de ocorrência da reação é baixa, mesmo em altas temperaturas e densidades [8]. Isso resulta na necessidade de condições extremas de confinamento e pressão, que são difíceis de alcançar e manter em experimentos de fusão.

#### **4.4.4.1. Solução Tri-Alpha Energy**

A Tri Alpha Energy (TAE Technologies), é uma empresa privada fundada na Califórnia/EUA, no ano de 1998, pelo físico Norman Rostoker, um pesquisador renomado da área de física de partículas elementares, também por outros acadêmicos proeminentes. A TAE é uma empresa financiada por

uma série de grupos de investimentos, incluindo Chevron, Google, Reimagined Ventures, Sumitomo Corporation of Americas, and TIFF Investment Management [202], além de ter recebido investimentos de Paul Allen, co-fundador da Microsoft. A TAE Technologies é uma empresa de energia limpa com foco em fusão nuclear, cujo objetivo principal é desenvolver uma fonte segura, limpa, econômica e inesgotável de energia através do uso de reatores de fusão nuclear [203].

O projeto da empresa tem uma abordagem baseada na técnica de "Field-Reversed Configuration" (FRC), uma variação do dispositivo de fusão por confinamento magnético. O FRC tem a capacidade de manter o plasma confinado de forma mais estável e por mais tempo do que os designs de Tokamak tradicionais. No projeto da empresa o reator injeta dois campos FRCs opostos em um longo tubo de vácuo. Quando eles colidem no centro, o plasma é aquecido até atingir temperaturas altíssimas. Há também uma série de anéis ao longo desse tubo de vácuo que geram um campo magnético específico que ajuda a confinar o plasma e a mantê-lo afastado das paredes do tubo. O que evita que o plasma em temperaturas de milhões de graus Celsius atinja o tubo, o que derreteria qualquer material atualmente conhecido [203].

O reator da TAE utiliza boro como combustível de fusão, este é um passo relevante, pois o boro possui maior abundância e é mais fácil de ser obtido do que o trítio. Além disso a reação de fusão emite principalmente

partículas carregadas em vez de nêutrons de alta energia, o que pode minimizar os problemas de ativação radioativa associados a outros tipos de reatores de fusão [204].

Apesar do enorme potencial, a fusão baseada em boro-11 ainda é um desafio técnico e científico bastante significativo, uma vez que exige temperaturas e pressões muito mais elevadas do que as reações de fusão de deutério-trítio mais comuns. No entanto, a TAE Technologies tem feito progressos significativos no avanço dessa tecnologia e espera atingir o "break-even" energético em breve, recentemente a empresa conseguiu pela primeira vez obter êxito na fusão do boro-11 através com utilização da técnica de confinamento por campo magnético [204]. A TAE divulgou, em artigo publicado na revista *Nature*, haver obtido uma taxa de reação de fusão nuclear cerca de 200 vezes maior do que a esperada pelos modelos atuais [205].

Em relação a maturidade tecnológica e produtiva alcançada pela TAE Technologies, com base nas informações disponíveis, tendo ainda em conta as premissas das sessões 4.2 e 4.3, é razoável estimar que o projeto de reator de fusão da TAE esteja com um TRL de nível 1, onde a pesquisa básica está sendo conduzida para identificar os princípios científicos fundamentais subjacentes à tecnologia [25][28][203][204]. Quanto ao MRL encontra-se também no nível 1, é provável que o projeto esteja no nível 1, uma vez que a equipe está realizando pesquisas básicas [26][27].



Em relação ao montante investido, a TAE Technologies já conseguiu angariar cerca de US\$ 1,2 bilhões [202] através de diversas parcerias com grupos de investimento e investidores individuais.

#### **4.4.4.2. Solução Lawrenceville Plasma Physics**

A Lawrenceville Plasma Physics (LPP ou LPPFusion), é uma empresa privada de pesquisa e desenvolvimento da área de fusão nuclear fundada em 1994 pelo NASA's Jet Propulsion Laboratory [206] e liderada desde sua fundação pelo físico Eric Lerner, que ficou conhecido pelo livro "The Big Bang Never Happened" [207], onde ele desafia a fundação matemática do Big Bang por meio de observações empíricas e propõe uma nova teoria matemática baseada na física de plasma para harmonizar as previsões com as medições cosmológicas [208][209]. Eric Lerner defende desde aquela época a fusão nuclear baseada em plasma como uma fonte potencial de energia limpa e sustentável [210].

O projeto de reator de fusão nuclear da LPPFusion busca por uma solução aneutrônica, por meio de uma técnica denominada Focus Fusion, que a junção do combustível p-B11 com a técnica de DPF (*Dense Plasma Focus*) [211]. A DPF é uma técnica compacta e simples desenvolvida na década de 1960 por N.V. Filippov na URSS e por J. W. Mather nos EUA [211]. O dispositivo DPF desenvolvido pela LPPFusion consiste em dois eletrodos concêntricos

fechados em uma câmara de vácuo. Nesta câmara é feito vácuo para limpeza do ambiente e depois ela é preenchida até certa pressão o gás combustível [211]. Quando em operação, os capacitores descarregam um pulso no eletrodo o que ioniza o gás e formam-se linhas de corrente de plasma, composta por filamentos de corrente pinçada entre os eletrodos. Quando a configuração de plasma atinge a extremidade do eletrodo interno (o ânodo), os filamentos se juntam, formando pontos quentes ou plasmoides densos confinados magneticamente onde é obtido as condições necessárias para ocorrência das reações de fusão [210][211][212], conforme pode ser visto na Figura 3.

A empresa pretende produzir um reator com capacidade de geração de 5 MW, muito compacto capaz de caber em uma garagem. Com os experimentos atuais a empresa atingiu uma das maiores taxas de geração de energia por fusão já registrada de  $3.4 \times 10^{20} \text{keV-s/m}^3$  [211], o que apesar de parecer um valor alto ainda está muito longe para se tornar viável. A empresa pretende alcançar um protótipo funcional com geração de 5 MW de energia entre 2026 e 2030 [211].

O valor investido na empresa não é divulgado, mas no site da empresa é informado seu valor de mercado é de US\$ 66,7 milhões de dólares [213].

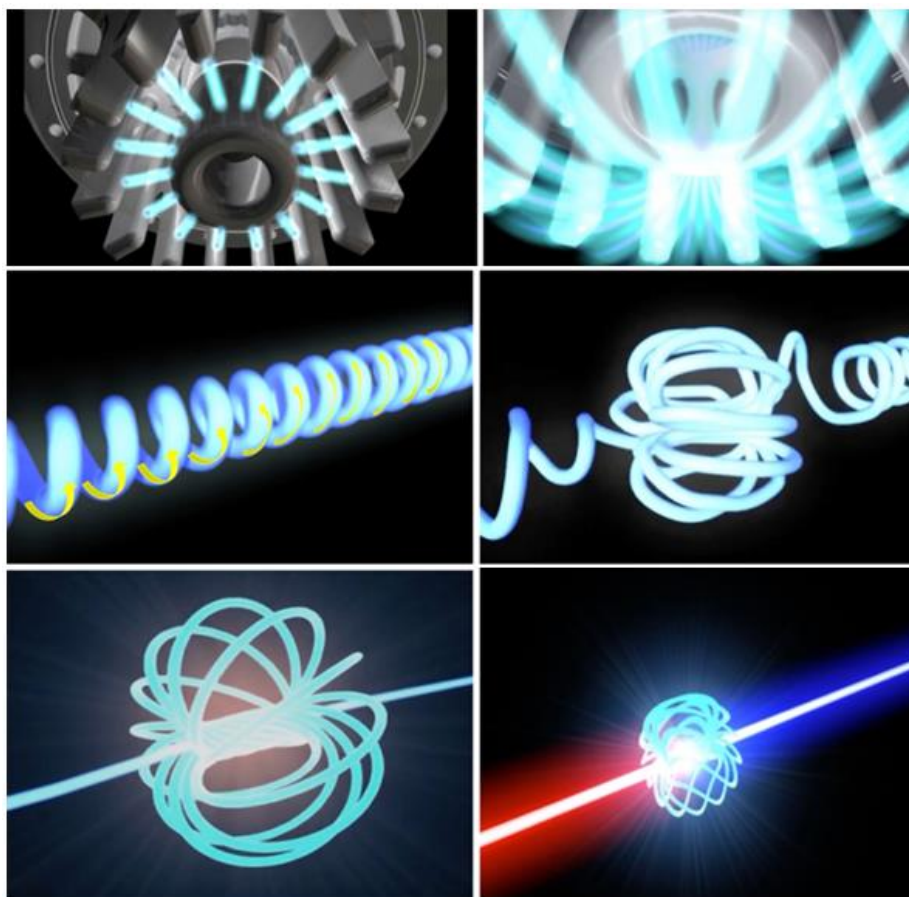


Figura 3 – Dispositivo DPF e configuração do plasma para formar o plasmóide final [240].

Em relação a maturidade tecnológica e produtiva atual do projeto de reator de fusão da LPPFusion, com base nas informações disponíveis, tendo ainda em conta as premissas das sessões 4.2 e 4.3, é razoável estimar que o reator de fusão da LPPFusion esteja com um TRL de nível 2, onde a ideia básica da tecnologia é formulada e suas possíveis aplicações são identificadas [25][28][210][211][212]. Quanto ao MRL, em função do nível TRL é possível estimar que o projeto esteja em um nível 1, onde o projeto preliminar da planta se inicia e os conceitos de manufatura são formulados, as possíveis abordagens/soluções são identificadas e escolhida [26][27][210][211][212].

#### 4.4.4.3. Solução HB11 Energy

A HB11 Energy foi fundada pelo professor Heinrich Hora, físico teórico da Universidade de New South Wales, na Austrália, muito conhecido pelo seu trabalho em física de plasmas e fusão nuclear através da utilização de lasers para iniciar a reação de fusão de hidrogênio-boro [214] sem altas temperaturas. Sua abordagem sugeria o uso de propriedades do laser que ainda não existiam até então. Isso mudou em 1985 quando Donna Strickland e Gerard Mourou demonstraram sua técnica de "*Chirped Pulse Amplification*" (CPA) de lasers o que estabeleceu a base teórica que estava faltando. Este trabalho rendeu a Strickland e Mourou o Prêmio Nobel de Física de 2018 [214]. Já a pesquisa do Prof. Hora resultou na criação da HB11 Energy [215].

O núcleo do reator da HB11 Energy é formado por uma esfera de captação de partículas elétrica com um dispositivo ignitor da reação de fusão no seu interior, como pode ser visto na Figura 4 [214][216][217]. O dispositivo ignitor é formado por uma chapa conformada para formar três espiras, como pode ser visto na Figura 5. O dispositivo ignitor utiliza dois lasers, um primeiro laser (*laser 1*) para gerar um campo magnético de cerca de 4.5 quilo Tesla através do bombardeamento da primeira espira [217][218]. O campo magnético formado das duas outras espiras, perpendiculares a primeira, é responsável por confinar e comprimir o gás combustível no alvo do segundo

laser que é responsável pelo aquecimento do combustível até as condições necessárias para a reação de fusão [214][217][218].

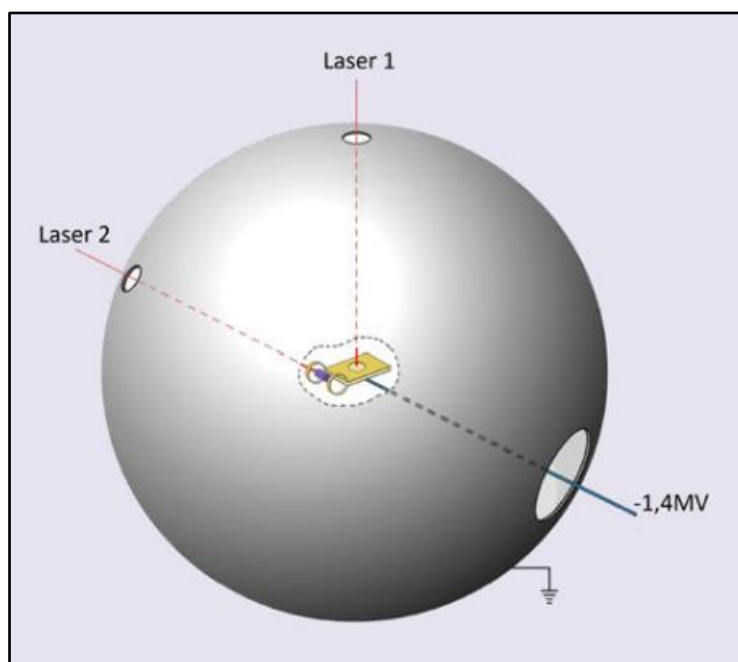


Figura 4 – Núcleo do reator da HB11 Energy [250].

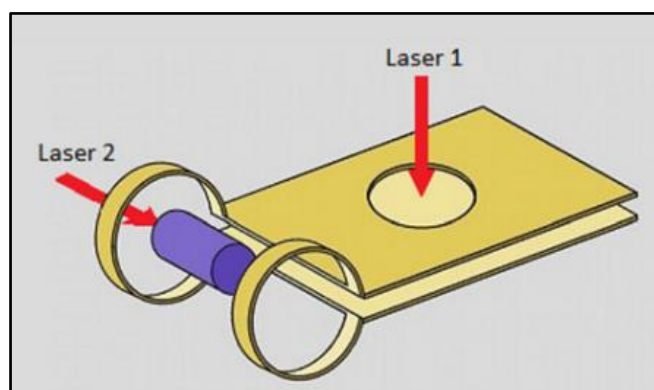


Figura 5 – Dispositivo ignitor da reação de fusão no interior do reator da HB11 Energy [250].

A HB11 Energy acredita ser possível gerar da ordem de GJ de energia com um único pulso de laser de 30kJ e energia [216][217][218][219]. Apesar deste objetivo de geração de energia, a HB11 ainda não atingiu o ponto de equilíbrio (*breakeven*) de geração de energia que é estimado em  $2 \times 10^{15} \alpha$  de partículas alfa por pulso de laser [214][216][219]. Atualmente a empresa está a quatro ordens de grandeza deste limiar [219][220]. A HB11

Energy espera que seu primeiro protótipo funcional esteja pronto por volta de 2050 [221]. A empresa não revela suas fontes de financiamento, apesar de já haver ganho premiações governamentais [222].

Em relação a maturidade tecnológica e produtiva atual do projeto de reator de fusão da HB11 Energy, com base nas informações disponíveis, tendo ainda em conta as premissas das sessões 4.2 e 4.3, é razoável estimar que o reator de fusão da HB11 Energy esteja com um TRL de nível 1, onde a prova de conceito está sendo estabelecida [25][28][211][216][217][218][219][220]. Quanto ao MRL, em função do nível TRL é possível estimar que o projeto também esteja em um nível 1, uma vez que a equipe está trabalhando no desenvolvimento e na validação da tecnologia em ambiente laboratorial [26][27][216][217][218][219][220].

#### **4.4.5. Ciclo da Fusão Hidrogênio-Metal Alcalino**

O ciclo da fusão do hidrogênio-metal alcalino refere-se às reações nucleares de fusão envolvendo os núcleos de hidrogênio de metais alcalinos, tais como lítio (Li), sódio (Na), potássio (K) entre outros e metais como o estanho. Essas reações são de grande interesse na pesquisa de fusão nuclear, pois podem fornecer energia limpa e sustentável com menos problemas associados à radioatividade em comparação com outros ciclos de fusão, como o deutério-trítio (D-T).

Uma das reações de fusão de hidrogênio-metal alcalino mais estudadas é a fusão do próton-lítio (p-Li), que ocorre entre um núcleo de hidrogênio (próton) e um núcleo de lítio-6 ( ${}^6\text{Li}$ ) ou lítio-7 ( ${}^7\text{Li}$ ). Trata-se de uma reação aneutrônica, ou seja, que não produz nêutrons como produto da reação. Isto a torna uma opção atraente para a geração de energia limpa, devido à redução dos problemas associados à ativação de materiais e resíduos radioativos [223]. Entretanto, a reação p-Li apresenta grandes desafios em comparação com outras reações de fusão, como as reações D-T e D-D. Um dos principais desafios é a alta temperatura necessária para que a reação p-Li ocorra. A temperatura de ignição para a reação p-Li é estimada em cerca de 2 bilhões de graus Celsius, muito maior do que a necessária para as reações D-T e D-D [224].

Outro desafio é a baixa seção transversal de choque da reação p-Li, o que resulta em uma baixíssima probabilidade de ocorrência desta reação, mesmo em altas temperaturas e pressão [225]. Isso resulta na necessidade de condições extremas de confinamento e pressão, muito difíceis de serem alcançadas e mantidas em experimentos de fusão.

Apesar desses desafios, a reação p-Li e outras reações de fusão hidrogênio-metal alcalino continuam sendo áreas ativas de pesquisas no campo da fusão nuclear, principalmente no campo das reações nucleares de baixa energia tratadas abaixo [161][226][227]. Além disso é importante registrar que não se trata apenas de pesquisa, mas sim de experimentos,

protótipos e resultados obtidos, segundo a alegação de diversas empresas que são pertencentes a grupos distintos de pessoas. Entre elas, podemos citar a Leonardo Corporation e a Brilliant Light Power. Portanto, se alguma destas empresas estiver sendo honesta em suas afirmações ter-se-á uma verdadeira revolução tecnológica em breve.

#### **4.4.5.1. Solução Brilliant Light Power**

A Brilliant Light Power Inc. é uma empresa sediada em Cranbury, New Jersey, nos Estados Unidos, foi fundada por Randell L. Mills, em 1991, com o nome original de HydroCatalysis Inc. Em 1994 a empresa foi renomeada para BlackLight Power, Inc. e em 2015 para o nome atual: Brilliant Light Power. O Dr. Randell L. Mills é químico e ficou conhecido por desenvolver a teoria do hidrino [228][229], que estende as visões aceitas no campo da física quântica. Segundo essa teoria, o hidrogênio pode existir em um estado abaixo do nível de energia do átomo de hidrogênio no estado fundamental, quando seu elétron assume este sub orbital abaixo de S1, mais próximo do núcleo, torna-se um hidrino [228][229][230][231]. De acordo com Mills, para essa transição o hidrogênio libera energia, que pode ser usada para gerar eletricidade [231][232][233][234][235].

Mills diz ainda que o hidrino é a partícula fundamental da matéria escura e demonstra isto através de medições laboratoriais onde ele observa



que o padrão de radiação ultravioleta extrema emitido pelo hidrogênio ao tornar-se um hidrino. O intervalo de comprimento de onda observado (10-45 nm) corresponde ao mesmo intervalo de comprimento de onda luminoso observado pelos astrônomos e vinculado por eles à matéria escura [228][230][234].

Segundo a Brilliant o reator SunCell é um concentrador de luz visível termo fotovoltaico com capacidade de gerar 250 kW de energia elétrica [236]. Na Figura 6 pode-se observar a célula de plasma do reator SunCell, onde é injetado o gás hidrogênio e o catalisador. Duas bombas eletromagnéticas impelem estanho fundido (cerca de 10 a 12 kg) formando um fluxo metálico que serve como o eletrodo do reator, para a formação do arco voltaico de baixa tensão e alta corrente e formação do plasma de reação [237][238].

Ainda segundo a Brilliant a reação libera cerca de 200 vezes mais energia que a queima química do hidrogênio, que pode ser obtido da água adicionando uma carga parasitária de 0,5% no sistema [237]. Segundo a empresa o SunCell é uma fonte de energia óptica acoplada a um conjunto de células fotovoltaicas concentradoras. No sistema elas operam com 1000 vezes a intensidade da luz solar e servem para converter a energia luminosa em energia elétrica [237][238], com pode ser observado na Figura 7.

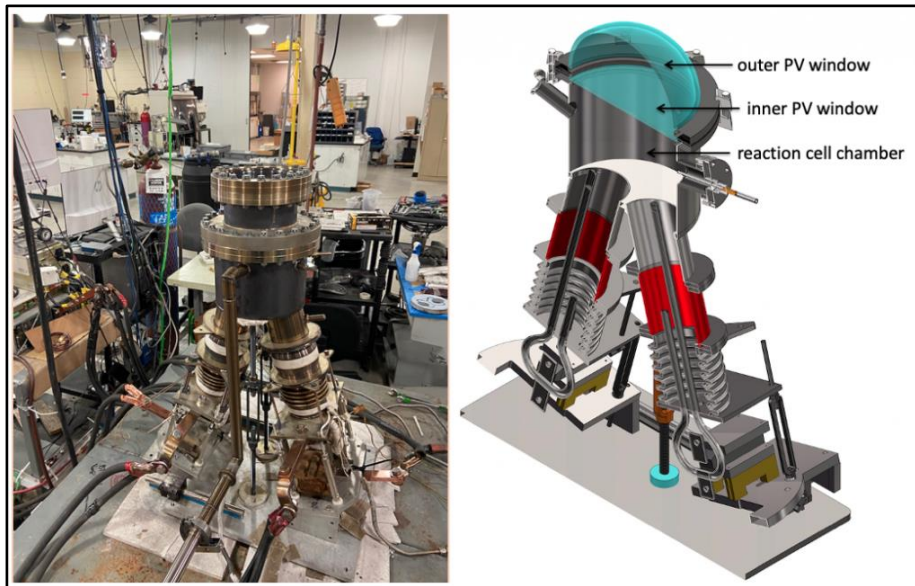


Figura 6 – Núcleo do reator da célula combustível SunCell da Brilliant em testes laboratoriais [238].

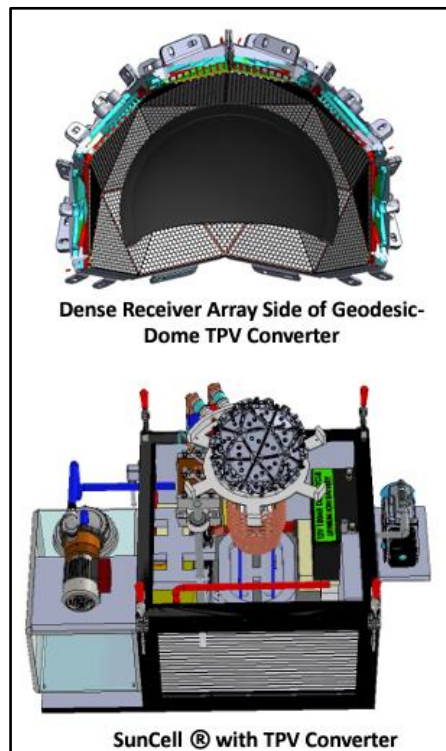


Figura 7 – Célula combustível SunCell com o detalhe do domo de placas fotovoltaicas e as aletas externas para refrigeração das placas [238].

O plasma produzido pela SunCell 3000-5000K, emite radiação com uma densidade de potência de 4,6 a 35 MW/m<sup>2</sup>, correspondendo a 150 kW a 1,14 MW, em uma janela de 8 polegadas de diâmetro. O processo de

conversão de energia óptica em elétrica possui cerca de 50% de eficiência, chegando a um custo final de menos de US\$ 0,001/kWh [237][238].

A empresa já identificou cerca de 22 métodos de formação de hidrino utilizando metais alcalinos e metais como o estanho, todos validados em universidades (segundo a empresa).

Em relação ao custo de desenvolvimento a Brilliant afirma ter investido US\$ 120 milhões de dólares [238], o que também gerou mais de 100 artigos revisados por pares, mais de 80 patentes aceitas e mais de 100 patentes em espera [238]. A empresa já possui um modelo de engenharia validado e trabalha na produção de um protótipo voltado para o mercado consumidor [237][238].

Quanto a maturidade do projeto, devido ao fato de a empresa alegar possuir um protótipo com COP > 5, é razoável estimar que a célula combustível SunCell esteja com um TRL 3, onde componente e sistemas críticos são validados em ambiente relevante (modelo de engenharia) e trabalha-se em um protótipo para testes em um ambiente relevante, para demonstrar o desempenho da tecnologia em condições próximas às condições reais [25][28][237][238]. Quanto ao MRL, em função do nível TRL é possível estimar que o projeto esteja em um nível 2, uma vez que os processos de manufatura estão sendo desenvolvidos e testados em ambiente laboratorial para que se possa observar e ajustar interfaces e procedimentos, ou seja, está experimentando métodos e processos de fabricação de partes [26][27][238].

#### 4.4.5.2. Solução Clean Planet Inc.

A Clean Planet Inc. é uma empresa japonesa fundada em 2012 por Hideki Yoshino, um empresário japonês que foi presidente da Nissan Motor Co. de 1996 a 2001. A Clean Planet Inc. trabalha no desenvolvimento de células combustíveis de hidrogênio que utilizam um suposto fenômeno chamado por ela de QHe, que em termos de geração de energia tratar-se-ia de um fenômeno intermediário entre reações químicas e nucleares, mas próximo as nucleares, como pode ser visto na Figura 8 e 7.

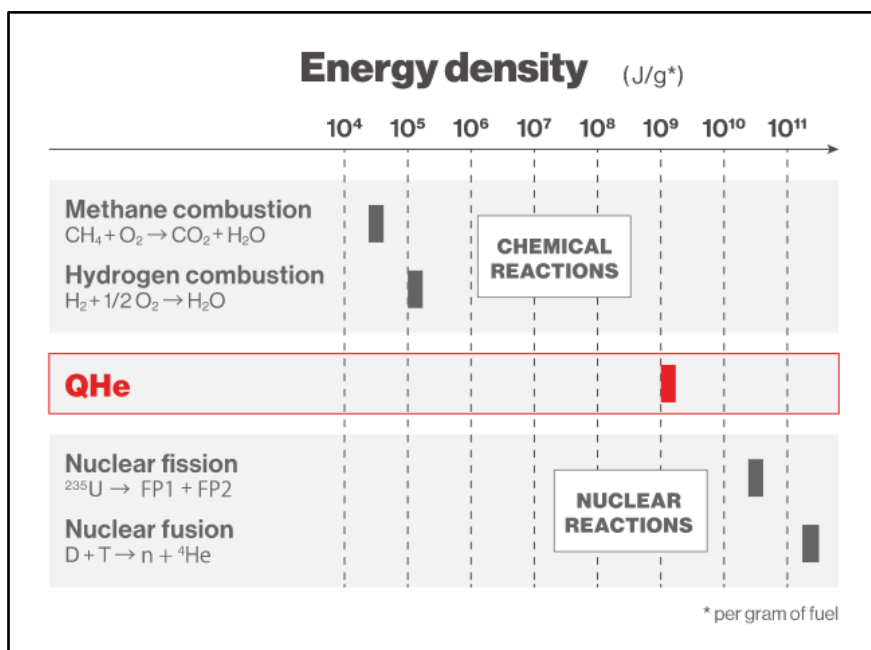


Figura 8 – Densidade de energia das reações QHe segundo a Clean Planet [239].

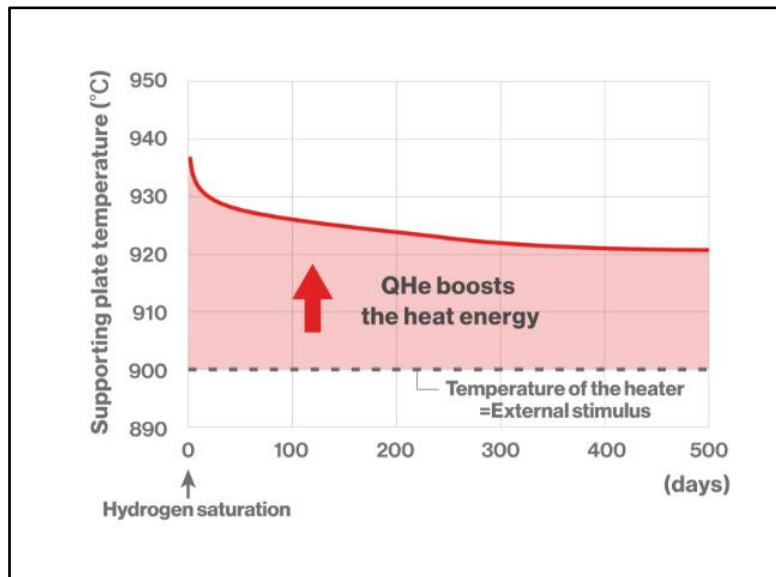


Figura 9 – Funcionamento ao longo do tempo, absorção de hidrogênio e produção de calor [239].

A princípio de funcionamento do método QHe está na difusão de hidrogênio em compósito multicamada de metal nanométrico [240]. O método consiste em induzir uma reação do gás H<sub>2</sub> (ou D<sub>2</sub>) com a estrutura da camada de película fina de Ni e Cu metal [240] em folhas multicamada [241]. A difusão quântica do hidrogênio nos filmes finos (25mm×25mm×0.1mm [242]) é induzida através do aquecimento da célula a uma temperatura entre 700 e 900 °C [241][242], como pode ser visto na Figura 10. Ao atingir a faixa de temperatura acima o hidrogênio passa a ser consumido em reações nucleares em escala nanométrica que produzem calor em excesso e onde naturalmente mais hidrogênio da atmosfera externa é absorvido para dentro da célula para sustentar a reação, enquanto houver hidrogênio no exterior [240][241][242]. As reações nucleares formam elementos mais leves do que o níquel, incluindo o oxigênio [241][243].

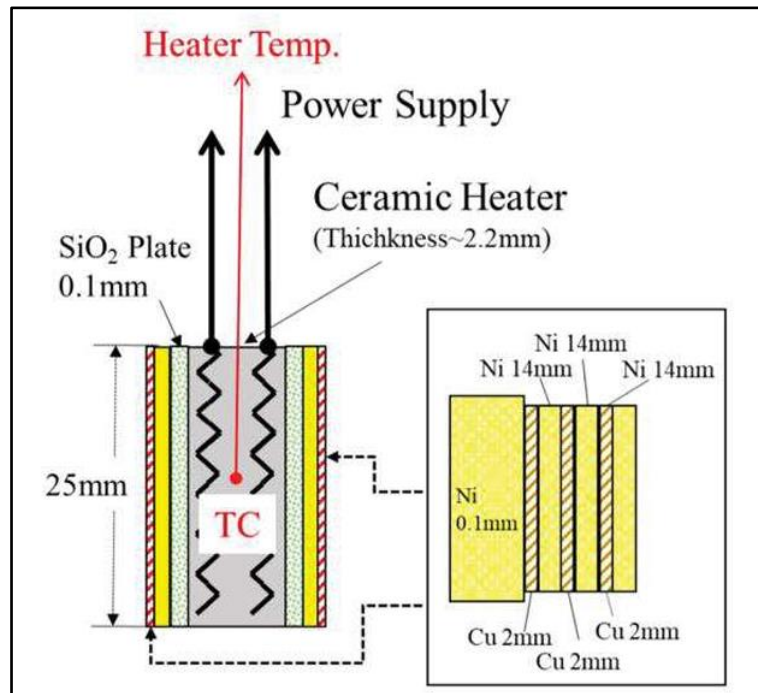


Figura 10 – Esquema da célula combustível QHe [241].

A Clean Planet não informa os valores investidos no projeto nem quanto tem arrecadado em investimentos. Em relação ao estado atual do projeto a empresa afirma estar trabalhando em um modelo de engenharia da célula combustível de 2KW [239]. Portanto, com base nestas informações [239], tendo ainda em conta as premissas das sessões 4.2 e 4.3, é razoável estimar que a célula combustível LENR da Clean Planet esteja com um TRL em nível 2, onde a ideia básica da tecnologia é formulada e suas possíveis aplicações são identificadas [25][28][239][240]. Quanto ao MRL, em função do nível TRL é possível estimar que o projeto esteja em um nível 1, onde o projeto preliminar da planta se inicia e os conceitos de manufatura são formulados, as possíveis abordagens/soluções são identificadas e escolhida [26][27][239].

#### 4.4.5.3. Solução Brillouin Energy Corp.

A Brillouin Energy Corp. é uma empresa com sede na Califórnia, nos Estados Unidos, fundada em 2009 por Robert George Godes, que atua como seu Presidente e Diretor de Tecnologia. O Dr Robert G. Godes é reconhecido por sua contribuição no campo da LENR, onde inventou a tecnologia de controle eletrônico Q-Pulse [244] utilizada pela Brillouin Energy, que visa iniciar e controlar reações de fusão a frio em cilindros de hidrogênio.

O método empregado pela Brillouin Energy constitui-se em uma reação controlada de captura de elétrons que gera uma reação nuclear que produz excesso de energia térmica, usando quantidades muito pequenas de hidrogênio, níquel e eletricidade como insumos [245]. Primeiramente o hidrogênio, na forma de eletrólito úmido ou de gás, é carregado em um vaso de pressão contendo um núcleo metálico constituído de um material proprietário a base de níquel [244][245].

O Dr. Godes alega que as cargas elétricas do gerador Q-Pulse™ percorrem o vaso de pressão, resultando em conjunto de *compressed lattice* dentro do vaso comprimido. Neste estado, massa é criada da seguinte forma: um próton é convertido em um nêutron, causando enorme perda de energia no sistema; 1H (prótio) é convertido em 2H (deutério), 2H (deutério) é convertido em 3H (trítio) e 3H (trítio) é convertido em 4H (quátrio). Esse processo resulta na produção de energia líquida quando o 4H (quátrio) beta

decai rapidamente e libera grande quantidade de calor, além de mais uma pequena quantidade de  $4\text{He}$  (hélio) no sistema. Esse processo, denominado CECR [245], libera mais energia do que foi necessário para criar todas as etapas anteriores. Segundo a empresa a energia liberada possui um nível de densidade de energia equivalente em escopo à fusão nuclear, mas sem a geração de radiação. O processo CECR continua em uma taxa de bilhões de reações por segundo, criando uma fonte de calor segura, confiável e contínua [244][245][246].

A Brillouin Energy acondiciona conjuntos de cilindros de pressão para formar uma caldeira (*boiler*), que é um de seus produtos em desenvolvimento, conforme pode ser visto na Figura 11. A empresa visa produzir quatro linhas de produto, uma com potência térmica até 600 W, outra com potência de 600 W a 1 KW, outra com potência média de 1 KW a 500 KW e uma de alta potência acima de 500 KW [245].



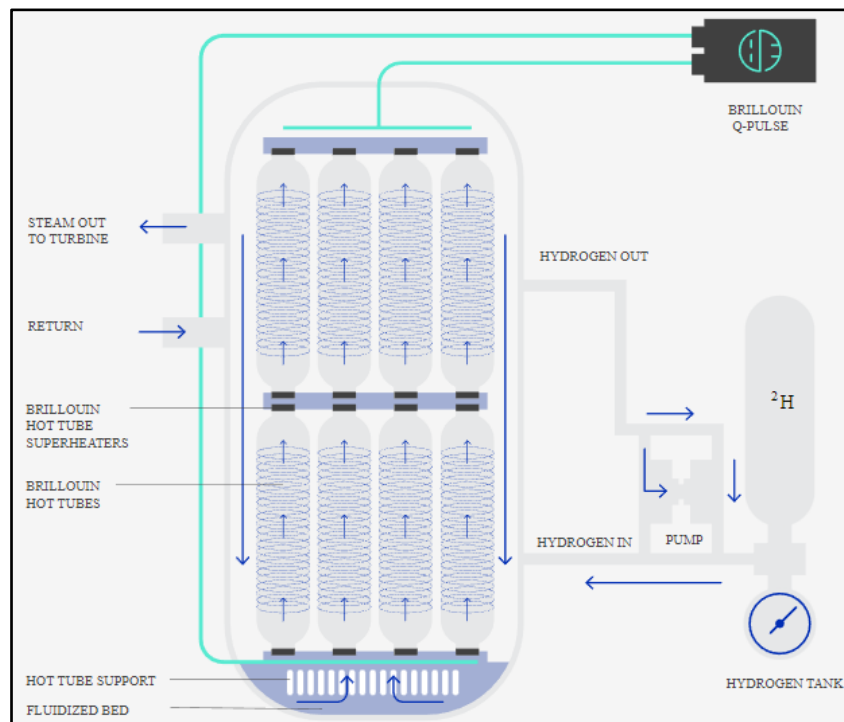


Figura 11 - Brillouin Energy's HYDROGEN HOT TUBE (HHT™) Boiler [245].

A empresa declara que tem utilizado de recursos próprios para financiar seu crescimento e desenvolvimento, principalmente por meio de ofertas privadas de ações a investidores credenciados. E também por meio da prestação de serviços de consultoria, engenharia ou trabalho de patente em troca de patrimônio, juntamente com algumas receitas iniciais de licenças de clientes ou financiamento sem fins lucrativos [247], contudo a empresa não informa valores.

A respeito da maturidade tecnológica e produtiva do projeto de reator de fusão da Brillouin Energy a empresa apresenta resultados de coeficientes de geração de energia COP acima de 1, chegando a 2.7 [248]. Contudo, apresenta poucas informações sobre sua tecnologia e dados para avaliar a realização desses testes. Contudo, com base nas informações apresentadas pela empresa [245][248], tendo ainda em conta as premissas das

sessões 4.2 e 4.3, é razoável estimar que o reator de fusão da Brillouin Energy esteja com um TRL no nível 1, onde a ideia básica da tecnologia é formulada e suas possíveis aplicações são identificadas [25][28]. Quanto ao MRL, em função do nível estimado para o TRL, pode-se estimar que o projeto esteja também no nível 1, onde o projeto preliminar da planta se inicia e os conceitos de manufatura são formulados, as possíveis abordagens/soluções são identificadas e escolhida [26][27].

#### **4.4.5.4. Solução Leonardo Corp.**

A Leonardo Corporation é uma empresa sediada na Flórida, Estados Unidos, fundada em 1997 pelo inventor e empresário italiano Andrea Rossi, não confundir com a multinacional da indústria de defesa italiana a Leonardo S.p.A., anteriormente conhecida como Finmeccanica, fundada em 1948 e que atualmente fabrica desde caça, helicópteros e canhões a até satélites e dispositivos para exploração espacial. A Leonardo Corporation, de Andrea Rossi, é uma pequena empresa (uma startup de tecnologia) que detém os direitos de uma suposta tecnologia de reator nuclear de fusão, tipo LENR, chamado de E-Cat e desenvolvido pelo próprio CEO da Leonardo Corporation o Sr. Andrea Rossi. A metodologia exata por trás da suposta tecnologia E-Cat não é divulgada, sendo mantida como um segredo comercial pelo Sr. Rossi e

a Leonardo Corporation. Contudo, algumas informações genéricas são divulgadas.

Supostamente o reator LENR E-Cat utiliza uma mistura de níquel com hidrogênio e um catalisador não divulgado para iniciar uma reação LENR [249][250][251]. Importante ressaltar a semelhança dos mecanismos básicos do E-Cat com a abordagem empregada pela empresa Brilliant (ver seção 3.4.5.1). Segundo o Sr. Rossi para o funcionamento do E-Cat os átomos de hidrogênio são supostamente absorvidos em uma matriz de níquel, por meio de um processo conhecido como adsorção. A presença do catalisador, cuja identidade exata é mantida em segredo, supostamente facilita a absorção de hidrogênio pelo níquel. E, uma vez que os átomos de hidrogênio estejam dentro da matriz de níquel, o Sr. Rossi alega que eles se fundem com os átomos de níquel para formar o elemento cobre. No que, segundo ele, ocorreria uma reação de fusão nuclear de baixa energia onde uma grande quantidade de energia seria liberada [249][250][251][252].

O Sr. Rossi através de suas empresas realizou algumas parcerias para validação e para acreditação por terceiros do funcionamento do E-Cat [253][254]. Contudo a diversidade das instituições envolvidas é restrita o que depõem conta a credibilidade do E-Cat. Todavia o Sr. Rossi segue vendendo seus produtos, baseados na suposta tecnologia E-Cat, através de sítio próprio (<https://ecatorders.com/pre-order-e-cat-products/>) onde é comercializada a pré-venda do E-Cat MiniSKLep SSM de 10 W, por US\$25,00, E-Cat SKLep SSM

de 100 W, por US\$ 249,00 e o E-Cat SKLep SSM Plants de 1 MW, por US\$ 2,5 milhões [255]. Porém a Leonardo Corporation condicionou o início da fabricação e posterior entrega dos produtos à obtenção de um milhão de pedidos para o produto de 100 W ou 1MW [255], o que ainda não ocorreu, portanto o produto ainda não está no mercado.

Quanto ao custo da tecnologia, a Leonardo Corporation não revela o quanto pagou pelos direitos do E-Cat, mas em 2011 houve um acordo de licenciamento da tecnologia para a Industrial Heat LLC (outra startup de energia, foi criada em 2012 por ex-diretores da Cherokee e investidores, alguns deles ligados a Hollywood e a empresa Apple) [256]. Neste acordo a Industrial Heat pagou \$11,5 milhões para o sr. Rossi, mas o acordo foi interrompido em 2016 por meio de disputa judicial. A disputa foi resolvida em um acordo sob sigilo absoluto, portanto as especificidades financeiras envolvidas são incertas [256].

Com relação ao nível de maturidade, considerando as informações acima, tendo ainda em conta as premissas das sessões 4.2 e 4.3, é razoável estimar que o reator nuclear LENR do sr Rossi esteja com um TRL em nível 3, uma vez a empresa já informa possuir um modelo de engenharia com COP > 5 [25][28][251][253][254][255]. Quanto ao MRL, em função do nível TRL, é possível estimar que o projeto esteja em um nível 2, uma vez que os processos de manufatura estão sendo desenvolvidos [26][27][251][253][254][255].

#### 4.4.5.5. Solução Industrial Heat LLC.

A Industrial Heat LLC é uma pequena empresa, do tipo *startup* de tecnologia, sediada em Raleigh, na Carolina do Norte, nos Estados Unidos, fundada, em outubro do ano de 2012 [257], por Thomas Darden e J.T. Vaughn, com o objetivo de, juntamente com outros 13 investidores, financiar o desenvolvimento do projeto E-Cat do Sr. Andrea Rossi [258]. O Sr. Thomas Darden é um empreendedor e executivo americano que fundou, em 1984, a Cherokee Investment Partners, uma empresa privada de investimento que se especializa na reabilitação de propriedades contaminadas e na promoção de projetos de desenvolvimento sustentável. Já o sr. J.T. Vaughn é um executivo sênior da Cherokee Investment Partners. É importante não confundir a empresa com a Industrial Heat Treat, fundada em 1971, em Salt Lake City, Utah, nos Estados Unidos.

A relação histórica da Industrial Heat LLC com o Sr. Andrea Rossi teve início em outubro de 2012, mesmo ano e mês em que foi fundada a Industrial Heat [259]. A empresa comprou os direitos de propriedade intelectual do E-Cat de Rossi por um valor informado de 11,5 milhões de dólares [256][258]. No entanto, em 2016, Rossi processou a Industrial Heat, alegando que a empresa não tinha cumprido certos compromissos contratuais, incluindo um pagamento de 89 milhões de dólares após o suposto sucesso de um teste de um ano do E-Cat. Em contrapartida, a Industrial Heat afirmou

que os testes de Rossi não eram válidos e que a tecnologia do E-Cat não funcionava [256][258][260]. Infelizmente o processo foi resolvido fora do tribunal, em 2017, e os detalhes do acordo não foram divulgados, caso tivesse sido resolvido no tribunal os registros jurídicos ficariam públicos, mas pelo o que parece a Industrial Heat ficou com direito de usufruir livremente da tecnologia do E-Cat, pois continuou a pesquisar e registrar pedidos de patentes sobre as bases tecnológicas do E-Cat [261].

A Industrial Heat LLC, até a data de produção deste trabalho, não possui site, não divulga suas atividades, seu balanço financeiro, não produz nem um tipo de informação sobre suas atividades. A empresa somente ficou conhecida por conta do litígio com o sr Rossi, rapidamente resolvido fora dos tribunais. A empresa possui três patentes registradas e nove em avaliação pelo USPTO (United States Patent and Trademark Office). As patentes da empresa começaram a ser aceitas a partir de 2019, mesmo as primeiras datando de 2014 [262], tendo obtido patentes iniciadas em 2020 e em 2022 [263]. Ocorre que em 2018 a empresa saltou do valor de mercado de US\$38 milhões de dólares para cerca de US\$ 918 milhões de dólares, após notícias de aportes de fundos de investimento e celebridades públicas [259].

A empresa segue produzindo patentes e angariando vultosos investimentos, sempre desprendendo esforços na manutenção de sigilo sobre todas as suas operações. Os fatos relatados acima objetivam indicar, além da possível influência financeira na obtenção de patentes, que o gerador de calor

proposto pelo sr. Rossi está atraindo a atenção e a ambição de muitos investidores profissionais. Por conta disto seus elementos base de funcionamento podem servir de subsídio na pesquisa de LENR.

## 5. RESULTADOS

Nesta sessão serão apresentados os resultados das pesquisas realizadas para as tecnologias inovadoras propostas no plano de trabalho. Primeiramente as soluções serão apresentadas, posteriormente classificadas e avaliadas. A classificação de cada tecnologia avaliada em conformidade com as metodologias de classificação TRL e MRL já tratadas acima. Após a classificação, as tecnologias serão organizadas em um painel comparativo para que possam ser avaliadas em função dos objetivos e necessidades do setor de propulsão naval nacional.

### 5.1. Relação das Soluções Tecnológicas Analisadas

Neste trabalho foram avaliadas oito soluções de reatores de fissão nuclear, sendo cinco do ciclo do U-235 e três do Pu-239. Conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – Relação das soluções tecnológicas de fissão nuclear analisadas.

	<b>Solução</b>	<b>Ger.</b>	<b>Potência</b>
<b>U-235</b>	PWR Westinghouse AP1000	III	1.100 MWe
	MSR Terrestrial Energy IMSR	IV	400 MWt
	VHTR CNNC & INET HTR-PM	III	210 MWe
	SCWR GIF	IV	1000 a 1700 MWe
	TWR TerraPower TWR-P	IV	345 MWe
	GFR Cons. V4G4 ALLEGRO	IV	50 a 100 MWt



<b>Pu- 239</b>	SFR Rosatom BN-800	III	880 MWe
	LFR Rosatom BREST-OD-300	IV	300 MWe

Além das soluções de reatores nucleares de fissão, também foram pesquisadas tecnologias de reatores de fusão em desenvolvimento, mesmo não havendo uma solução funcional neste campo. Isto se deve ao fato do vultoso contingente de grupos de pesquisa, empresas e organizações internacionais investindo neste campo de pesquisa e, principalmente, devido ao volume e relevância de marcos tecnológicos atingidos por estas entidades, o que torna importante voltar atenção ao estado atual desta tecnologia com vista aos possíveis impactos no futuro próximo. A Tabela 10 apresenta a relação de tecnologias de reatores de fusão nuclear, em desenvolvimento, analisadas neste trabalho. Pode-se observar na referida tabela a ausência de valores de potência para algumas tecnologias, isso se deve ao fato de estes valores não serem divulgados pelos grupos de pesquisa, possivelmente pela impossibilidade de identificá-lo devido ao estágio incipiente do desenvolvimento da tecnologia.

Tabela 10 – Relação de soluções de fusão nuclear (em desenvolvimento).

	<b>Tecnologia</b>	<b>Empresa/Grupo</b>	<b>Potência</b>
Deutério- Trítio $^2\text{H} + ^3\text{H}$	Tokamak	ITER	500 MWt
	Tokamak	CFS/SPARC	50/100 MWt
deutério- hélio-3 $^2\text{H} + ^3\text{He}$	FMI	Helion Energy Polaris	50 MW

deutério- deutério $^2\text{H} + ^2\text{H}$	CUSP Mag.	Lockheed Martin CFR	100 MWe
	Z-Pinch	Zap Energy	-
Próton-Boro p-B	FRC	Tri Alpha Energy	-
	DPF	LPPFusion	5 MW
	CPA	HB11 Energy	-
Hidrogênio- Metal Alcalino	Glow Discharge	Brilliant SunCell	250 kW
	QHe	Clean Planet	2 KW
	Q-Pulse CECR	Brillouin	600W/500KW
	E-Cat	Leonardo Corporation	1 MW

## 5.2. Classificação das Soluções

Nesta etapa as soluções serão classificadas conforme o nível de TRL e MRL, o custo estimado do projeto desenvolvimento/implantação, a possibilidade de miniaturização, a possibilidade de emprego em propulsão naval (portabilidade), doutrina, ou seja, se a tecnologia se adequa as diretrizes e políticas nacionais e o nível de dificuldade tecnológica, lastreado nas possibilidades da indústria nacional em relação ao necessário para a obtenção de cada solução, conforme descrito no item 4.4. A Tabela 11 apresenta o resultado da classificação das tecnologias de reatores de fissão em função da metodologia e critérios definidos.

Tabela 11 – Classificação das tecnologias de reatores de fissão.

Projeto	TRL/MRL	Stage Gate	Custo US\$	Escalável	Portável	Dout.	Passivo Ambiental	Dificuldade Tecnológica
AP1000	8/7	5	14 bi	Sim	Sim	Sim	Alto	Médio
IMSR	3/2	2	4,8 bi	Sim	Sim	Sim	Alto	Alto
HTR-PM	8/7	5	3 bi	Sim	Não	Sim	Alto	Alto
SCWR	1/1	1	-	Sim	Sim	Sim	Alto	Médio
TWR-P	3/2	2	1 bi	Sim	Não	Sim	Alto	Alto
ALLEGRO	1/1	1	-	Sim	Sim	Não	Alto	Alto
BN-800	8/7	5	5,2 bi	Sim	Sim	Não	Alto	Alto
BREST	3/4	2/3	412 mi	Sim	Sim	Não	Alto	Alto

A Tabela 12 apresenta o resultado da classificação das tecnologias de reatores de fusão em função e que ainda estão em desenvolvimento.

Tabela 12 – Classificação das tecnologias de fusão.

Projeto	TRL/MRL	Stage Gate	Custo US\$	Escalável	Portável	Passivo Ambiental	Dificuldade Tecnológica
ITER	3/2	2	25 bi	Não	Sim	Alto	Alto
CFS/SPARC	2/1	2/1	2 bi	Não	Sim	Alto	Alto
Helion Energy Polaris	1/1	1	500 mi	Sim	Sim	Médio	Médio
Lockheed Martin CFR	1/1	1	-	Sim	Sim	Baixo	Médio
Zap Energy	1/1	1	34 mi	Sim	Sim	Baixo	Médio
Tri Alpha Energy	1/1	1	1,2 bi	Sim	Sim	Baixo	Médio
LPPFusion	2/1	1/2	66,7 mi	Sim	Sim	Baixo	Médio
HB11 Energy	1/1	1	-	Sim	Sim	Baixo	Médio
Brilliant SunCell	3/2	2	120 mi	Sim	Sim	Baixo	Médio
Clean Planet	2/1	2/1	-	Sim	Sim	Baixo	Médio
Brillouin	1/1	1	-	Sim	Sim	Baixo	Médio

Leonardo	3/2	3	2,5 mi	Sim	Sim	Baixo	Médio
----------	-----	---	-----------	-----	-----	-------	-------

Conforme mencionado, nos itens miniaturização e portabilidade para emprego naval foram utilizados campo binário booleano e para o item nível de dificuldade tecnológica foram utilizados os fatores de intensidade baixo, médio, alto. O item portabilidade está relacionado com a possibilidade de o projeto poder suportar as inclinações e vibrações de meios navais, gerar uma potência combinada de 50 MW. Importante destacar que em alguns casos, devido ao tamanho reduzido das soluções, foi considerado a utilização de diversos dispositivos em paralelo para alcançar a potência mínima de avaliação.

## 6. DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentadas as discussões, racionais adotados, indicações e prognósticos futuros. Primeiramente serão apresentadas as soluções desencorajadas, posteriormente as soluções consideradas adequadas e por último as soluções que, apesar de não serem adequadas à propulsão naval no momento podem vir a ser no futuro e ainda tendências tecnológicas que podem vir serem uteis a outros projetos, inclusive em projetos já em andamento.

### 6.1. Soluções Desencorajadas

Em virtude da incipiência do estágio de desenvolvimento das propostas de tecnologias de reatores de fusão nuclear, desencoraja-se a adoção de qualquer uma destas tecnologias no momento. Algumas destas tecnologias se vierem a se provarem poderão tornar-se atrativas, estas são indicadas na cessão de tendências. Tendo em conta apenas as soluções de fissão nuclear, na Tabela 13 são apresentadas as tecnológicas consideradas inapropriadas para a propulsão naval e o racional da eliminação.

Tabela 13– Relação das soluções tecnológicas de fissão nuclear analisadas.

	<b>Solução</b>	<b>Racional</b>
<b>U-235</b>	SCWR GIF	Projeto em estágios iniciais de desenvolvimento, o que o torna um projeto de altíssimo risco.
	TWR TerraPower TWR-P	Projeto não consolidado, em estágio de desenvolvimento, o que o torna um projeto de alto risco. Alto gargalo tecnológico em relação ao parque industrial nacional. Não portátil devido ao peso.
	HTR-PM	O projeto não é portátil por conta das dimensões do circuito primário.
<b>Pu-239</b>	GFR Cons. V4G4 ALLEGRO	Projeto inviável quanto à doutrina nacional, devido a escolha do país em se submeter as normas da AEIA e não desenvolver o ciclo do Pu-239.
	SFR Rosatom BN-800	Projeto inviável quanto à doutrina nacional, devido a escolha do país em se submeter as normas da AEIA e não desenvolver o ciclo do Pu-239.
	LFR Rosatom BREST-OD-300	Projeto não consolidado, em estágio final de desenvolvimento, o que o torna um projeto de risco. Projeto inviabilizado frente à doutrina nacional, devido a escolha do país em se submeter as normas da AEIA e não desenvolver o ciclo do Pu-239.

Importante destacar que alguns projetos constantes na Tabela 13, apesar de serem desencorajados como estão, podem servir de inspiração para novos projetos, através da adaptação como comentado na seção 6.3.

## 6.2. Soluções Tecnológicas Adequadas à Propulsão Naval

Em se tratando de propulsão naval um projeto de reator nuclear precisa ser capaz de operar sobre condições adversas de inclinações, joga,

caturro, balanço, vibração e temperatura. Além disso o ciclo do combustível nuclear precisa atender as escolhas em vigência no país, o que limita ainda mais o leque de opções no campo da fissão nuclear. Contudo algumas soluções foram capazes de atender as inúmeras características nacionais, estas soluções são apresentadas na Tabela 14, juntamente com o racional adotado.

Tabela 14 – Relação das soluções tecnológicas de fissão nuclear analisadas.

	<b>Solução</b>	<b>Racional</b>
<b>U-235</b>	PWR Westinghouse AP1000	Projeto consolidado, em operação, realizado por empresa experiente no mercado, apresenta inúmeras inovações tecnológicas, tal como empregado nos reatores S5G e S9G de submarinos nucleares americanos [264][265][266]. Projeto em linha com o desenvolvido atualmente no Brasil, pode servir de exemplo para versões futuras. Trabalha com um teor de enriquecimento aceitável para a política nacional.
	Terrestrial IMSR	Projeto em linha com as necessidades de propulsão naval do país em termos de tamanho, escalabilidade, portabilidade, potência (195 MWe), segurança (Sal de FLiBe mais seguro que o sódio) e características do combustível (enriquecimento de 5%). Além disso possui um custo de 4,8 bi USD que é significativamente menor que o AP1000 (14 bi USD).

Impossível deixar de notar a escassez de alternativas expressa pela Tabela 14, isto em muito se deve ao gargalo tecnológico existente entre o parque industrial nacional e a indústria de países desenvolvidos, às barreiras de acesso a meios, bens e insumos de alta tecnologia e ainda à tratados e escolhas políticas ainda vigentes no país.

### 6.3. Soluções Tecnológicas Promissoras

Sobre o projeto do reator nuclear AP1000, encontra-se diversas características que poderiam ser aproveitadas para um projeto de reator de propulsão naval. O reator nuclear AP1000 foi projetado com múltiplas camadas de proteção que utiliza fenômenos naturais, como a gravidade, a convecção natural e a resistência térmica. Seus projetistas articularam estes recursos para prover segurança à planta, mesmo em emergências. O reator nuclear AP1000 foi pensado para que estes recursos permitam um resfriamento do núcleo mais eficiente, reduzindo os riscos de superaquecimento e, em último caso, a fusão do núcleo. Recursos passivos agregam confiança e robustez ao projeto [267].

A modularidade do projeto do reator nuclear AP1000 também é outra característica que poderia ser aproveitada em um reator de propulsão naval. O reator também foi projetado para ser fabricado em módulos e depois montado no local de emprego.

Sobre o projeto do reator nuclear Terrestrial IMSR, trata-se de um projeto que possui diversas características interessantes para a propulsão naval, dentre elas destaca-se as seguintes:

- Trata-se de um projeto modelo de reator modular nativamente de pequeno porte;



- Utiliza combustível nuclear UO<sub>2</sub> enriquecido a 5%, que é um combustível de total domínio nacional e dentro dos limites de enriquecimento praticados no país;
- Utiliza um fluido refrigerante inerte com a água, diferente de reatores a sódio, elemento que reage explosivamente com a água;
- Por ser modular o IMSR provê versatilidade e segurança nas trocas de combustível, uma vez que não é necessário abrir o núcleo do reator;
- Não demanda vaso de pressão, podendo trabalhar em pressão atmosférica;
- É capaz de se resfriar passivamente em caso de falta de energia;
- A utilização de combustível líquido (dissolvido no sal), elimina os riscos de fusão do combustível, como ocorre em combustíveis sólidos;
- O projeto do reator permite um desligamento rápido em caso de anomalias;
- A reatividade do núcleo diminui com a expansão térmica do combustível, no caso de sobre aquecimento do núcleo;
- Além de moderar os nêutrons rápidos o grafite utilizado no núcleo serve como barreira adicional contra a liberação de radiação; e
- Tem o potencial de produzir menor quantidade de resíduos de longa duração em relação a reatores convencionais.

Portanto o IMSR possui diversas características interessantes para o emprego em propulsão naval, isto coloca o projeto do IMSR da Terrestrial como o reator

mais adequado a propulsão naval analisado neste trabalho. Por conta disso, encoraja-se o estudo e acompanhamento deste projeto como uma linha de desenvolvimento viável para futuros projetos de propulsão naval no país.

Importante ressaltar que existem outros projetos na mesa linha do Terrestrial IMSR, que também podem ser considerados, como o projeto do reator BWRX-300 da GE Hitachi Nuclear Energy, que possui 300 MWt de potência e também é de pequeno porte. Trata-se de um reator do tipo BWR, com combustível de pastilha, tecnologia já bem estabelecida no país o que também torna este projeto interessante para o setor de propulsão naval nacional.

Por último, destaca-se que apesar de haver sido descartado por conta do item doutrina, o reator LFR Rosatom BREST-OD-300 apresenta características muito interessantes para o emprego em propulsão naval. Além disso reatores deste tipo já foram empregados em propulsão naval, como no caso dos submarinos da classe Alfa, conhecidos como Projeto 705 Lira, desenvolvidos na extinta União Soviética. Apenas é inadequado às normas vigentes no país.

Finalizando, alerta-se que a análise de soluções deve servir para a orientação, o discernimento e a inspiração de projetistas nacionais na condução e consecução de projetos similares, inclusive no âmbito da tomada de decisões de investimento. Contudo, mesmo havendo inúmeros bons exemplos de sucesso a servir de inspiração, é patente o fato de que muitas

vezes decisões tenham de ser formatadas pelos moldes do parque industrial nacional que, esmagado pela ação do estado, não muito tem a oferecer de prontidão. Mas, malgrado as dificuldades políticas, normativas e econômicas, também é patente o poder criativo e inovador da indústria nacional e do povo brasileiro que, com o devido incentivo, frequentemente consegue atingir resultados notáveis.

#### 6.4. Tendências Tecnológicas e Prognósticos Futuros

Pelo trabalho em tela, fica evidente as tendências no desenvolvimento tecnológico atual nos diversos campos da ciência de reatores nucleares. No campo da fissão nuclear, nota-se que uma forte tendência é a busca por soluções mais eficientes, robustas e seguras. Muito do êxito que se vem obtendo neste esforço deve-se ao avanço da engenharia de materiais, que vem possibilitando novas soluções que outrora eram inviáveis. Entre estes materiais podemos citar:

- ligas de zircônio como *zircaloy*: comumente utilizado na fabricação de varetas de combustível nuclear, devido à sua baixa seção transversal para a captura de nêutrons e excelente resistência à corrosão;
- aços inoxidáveis austeníticos: amplamente utilizados na indústria nuclear devido à sua excelente resistência à corrosão e resistência mecânica em altas temperaturas;

- aço inoxidável ferrítico/martensítico: utilizado devido à resistência a irradiação a altas temperaturas;
- pirocarbono: usado como uma barreira de retenção de produtos de fissão em partículas de combustível para reatores de alta temperatura, devido a sua estabilidade térmica, resistência à corrosão, e baixo coeficiente de expansão térmica;
- Carbetos de silício (SiC): empregado como barreira de retenção de produtos de fissão, proporciona resistência mecânica em partículas de combustível para reatores de alta temperatura, possui resistência a altas temperaturas, à corrosão e força mecânica
- materiais compósitos de carbono-carbono: possui alta resistência ao calor e baixa erosão sob bombardeio de plasma;
- cerâmicas de carbeto de silício (SiC): possui alta resistência à corrosão e a altas temperaturas, tornando-o ideal para o uso em vários componentes de reatores, incluindo como revestimento de combustível;
- carbeto de tungstênio: utilizado na blindagem de reatores devido à sua alta densidade e alta resistência a danos por radiação; e
- liga de alumínio-lítio: possui resistência à radiação e baixo peso.

Outra tendência é o investimento em reatores de fusão nuclear, apesar de ainda inexistir ao menos uma solução validada, os valores investidos neste setor, a diversidade de projetos e iniciativas privadas existentes e,

principalmente, os resultados e prognósticos de muitas destas empresas para o futuro próximo, tornam o assunto digno de atenção. Uma característica interessante é que com exceção dos reatores tipo tokamak, a maioria são projetos relativamente simples frente a complexidade de um reator de fissão. Embora possuam um potencial de geração de energia maior do que as tecnologias de fissão.

Um ponto que muito chama a atenção é o quantitativo de grandes empresas, pessoas renomadas e grupos de investimentos movendo esforços no que parece ser uma grande corrida pelo mercado de fusão nuclear. No caso de pelo menos uma destas diversas empresas obter êxito, e considerando verdadeiros seus resultados apresentados elas estão muito próximo disso, na próxima uma ou duas décadas, esta tecnologia pode se tornar uma realidade patente. O que mudaria completamente a forma como a humanidade obtém energia. Neste cenário, em virtude do abandono da área pelo exclusivismo estatal, o país estaria completamente fora desta tecnologia. Portanto, torna-se importante, pelo menos, acompanhar os desdobramentos destes esforços de desenvolvimento tecnológico. No que seria mais proveitoso fomentar iniciativas nacionais e de pesquisa neste campo, principalmente se novos resultados forem apresentados, confirmando os cronogramas anunciados pelos desenvolvedores de tais tecnologias.

Neste cenário, destaca-se como promissoras as seguintes tecnologias:

- Clean Planet: apresente artigos publicados e informações do projeto, afirma estar muito adiantada, já possuindo um modelo de engenharia validado e estar atualmente trabalhando em um protótipo de produto final para o mercado, a ser concluído no futuro próximo (5 a dez anos). A empresa transparece idoneidade e seu diretor é um empresário de muito sucesso e idôneo, seus pesquisadores possuem inúmeros artigos publicados, com revisão por pares.
- Leonardo Corporation: Alega possuir um produto comercial, capaz de gerar até 1MWe [255], que foi testado em várias ocasiões pela Universidade de Bologna, na Itália, uma delas por mais de 1 ano [253][254]. Se estas alegações forem verídicas, trata-se do projeto mais maduro já divulgado.
- Brilliant Light Power: apresentam uma robusta base teórica e uma entrega de resultados excepcional com mais de 100 artigos publicados com revisão por pares, mais de 80 patentes registradas mais de 100 outras em processo de registro, além de disponibilizar em seu site diversas publicações e livros do sr Randell L. Mills que trazem todo o embasamento teórico por trás da Brilliant Light Power. Justamente por esta razão esta empresa é apresentada em primeiro lugar, de todas as empresas analisadas esta é a que apresenta maior volume de informações tanto de seus progressos e resultados como da técnica e

teoria envolvida em suas pesquisas, além de inúmeros resultados relevantes.

- HB11 Energy: empresa similar as anteriores, com documentação e inúmeros artigos publicados, possui pesquisadores renomados em time, é transparente na rota de desenvolvimento e demonstra acreditar firmemente na obtenção da eficácia do seu produto.

Dentre as empresas pesquisadas estas se destacam pela clareza do que fazem, do fizeram e dos objetivos que pretendem alcançar. Outras empresas do ramo são difusas e/ou quase nada divulgam. Contudo, ressalta-se que todas merecem certa atenção, uma vez que a não divulgação de informações pode ser a forma que a empresa entende que deva trabalhar. Um exemplo é a Industria Heat LLC que segue captando recursos e produzindo patentes sem anunciar vendas, produtos ou resultados, apenas seus investidores maiores tem este conhecimento.

Por fim ressalta-se novamente a importância de acompanhar de perto este nicho do desenvolvimento tecnológico, sobe o risco de se deixar passar em branco a oportunidade do século, que poderá mudar completamente a forma como a humanidade obtém energia.

## 7. CONCLUSÃO

A pesquisa empreendida no trabalho em tela, entre outras coisas, se presta a apresentar uma diminuta imagem da diversidade, complexidade, vastidão e importância da área concernente à tecnologia nuclear. Com um mercado global que movimentou o valor de US\$ 41,1 bilhões de dólares no ano de 2020, com previsão de crescimento a uma taxa média anual de 3,5% para o período de 2021 a 2030, onde projeta-se alcançar o valor de US\$ 58,4 bilhões no ano de 2030 [268]. Dados estes restritos ao mercado de geração energia núcleo-elétrica, soma-se a eles o mercado mundial de pesquisa e desenvolvimento de iniciativas públicas e privadas que, mesmo sendo muito difícil de ser levantado, pelos montantes apresentados na diminuta janela deste trabalho acredita-se ser possível, minimamente, tatear a dimensão dos esforços despendidos a esta área do conhecimento humano.

Ao findar deste trabalho algumas questões por haverem, de uma forma recorrente, permeado as soluções discutidas aqui recebem seu destaque. A primeira destas questões são os objetivos maiores que tem guiado a pesquisa e o desenvolvimento do setor nuclear: a segurança, o impacto ambiental e a eficiência energética. Destes, os dois primeiros sempre foram uma constante em detrimento do último, mas nota-se que o fator de eficiência energética tem ganhado relevância desta, muito em função do avanço tecnológico da ciência de materiais.



Outra questão de merecido destaque, trata-se do expressivo aumento participação da iniciativa privada no campo de pesquisa e desenvolvimento do setor nuclear que, outrora, era quase que dominado pelo setor público. Tanto investidores individuais e empresas, quanto grupos de investimento tem aportado valores monumentais no campo da pesquisa, desenvolvimento e inovação na busca por soluções inteligentes, ambientalmente sustentáveis e economicamente sustentáveis, o que tenderá reduzir o valor da energia. Isto é excepcionalmente salutar para toda a humanidade. Sem a iniciativa privada isto dificilmente seria obtido, uma vez que a sustentabilidade econômica, e as vezes até a ambiental, são requisitos quase inexistentes na máquina estatal.

Outra quebra de paradigma que a iniciativa privada vem trazendo, e que se mostrará cada vez mais a olhos vistos, são a sua pujança, rapidez e eficácia no desenvolvimento de soluções, que impactará a percepção da sociedade da eficiência do desenvolvimento estatal em relação ao privado. Vide NASA versus Space X, onde as soluções da Space X são cerca de 10 vezes mais baratas e seus projetos excedem o custo inicial em uma taxa 30 vezes menor que a estatal americana [269], neste artigo é defendido o reuso como causa, mas os foguetes reutilizáveis são uma mera consequência da imposição do cálculo econômico que pesa e guia o setor privado (prazo x custo, resume tudo). A grande benesse deste movimento é que a sociedade tenderá a cobrar

por soluções prontificadas em menor tempo, com menor custo e com eficiência.

No cenário nacional, paralisado pelo monopólio estatal, dever-se-ia enviar esforços disponíveis, no mínimo, para o acompanhamento paralelo da verdadeira corrida tecnológica em andamento nestas décadas. Sendo o país fortemente hostil à iniciativa privada, e sendo o setor público incapaz de abarcar um desenvolvimento tão diverso, vasto e complexo, imperativo se torna o investimento em alguma iniciativa nacional sob o risco de se permitir um distanciamento tecnológico de grande proporção.

Por fim, espera-se que este trabalho possa ajudar a movimentar atenções para as novas tendências tecnológicas no campo da fissão nuclear e no campo da fusão nuclear, representada no país apenas pelo projeto TCABR [270].

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1	BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Balanço Energético Nacional 2020: ano base 2019. Rio de Janeiro: EPE, 2020. Disponível em: <a href="https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-2020">https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-2020</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
2	MURPHY, C. D.; SHAKIR, S. S.; SANTOS, J. J. Helium-3: A secure energy supply for the 21st century? <i>Energy Policy</i> , v. 112, p. 331-338, 2018.
3	HAAS, R.; THOMAS, S.; AJANOVIC, A. The historical development of the costs of nuclear power. In: <i>The Technological and Economic Future of Nuclear Power</i> , 2019. p. 97-115. Disponível em: <a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454918303220">https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454918303220</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
4	GU, Z. History review of nuclear reactor safety. <i>Annals of Nuclear Energy</i> , v. 120, p. 682-690, 2018. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.06.023">https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.06.023</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
5	CONGRESSIONAL Research Service. Advanced Nuclear Reactors: Technology Overview and Current Issues. R45706. 17 fev. 2023. Disponível em: <a href="https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R45706">https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R45706</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
6	ARGENTINE National Atomic Energy Commission. CAREM Project. Disponível em: <a href="https://www.cnea.gov.ar/ingles/ciencia/carem.htm">https://www.cnea.gov.ar/ingles/ciencia/carem.htm</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
7	TERRESTRIAL ENERGY. (2021). IMSR Technology. Disponível em: <a href="https://www.terrestrialenergy.com/imsr-technology">https://www.terrestrialenergy.com/imsr-technology</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
8	ROLLS-ROYCE. Small Modular Reactors. Disponível em: <a href="https://www.rolls-royce.com/products-and-services/nuclear/small-modular-reactors.aspx">https://www.rolls-royce.com/products-and-services/nuclear/small-modular-reactors.aspx</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
9	WESTINGHOUSE Electric Company. AP1000 Passive Nuclear Power Plant. 2011. Disponível em: <a href="https://www.westinghousenuclear.com/Portals/0/Users/031/31/31/AP1000%20Nuclear%20Power%20Plant.pdf">https://www.westinghousenuclear.com/Portals/0/Users/031/31/31/AP1000%20Nuclear%20Power%20Plant.pdf</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
10	GE HITACHI Nuclear Energy. ESBWR: Economic Simplified Boiling Water Reactor. Disponível em: <a href="https://nuclear.gepower.com/build-a-plant/new-reactor-technology/esbwr">https://nuclear.gepower.com/build-a-plant/new-reactor-technology/esbwr</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
11	UNITED STATES Nuclear Regulatory Commission. Economic Simplified Boiling Water Reactor (ESBWR) Design Certification Application. Disponível em: <a href="https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/design-cert/esbwr.html">https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/design-cert/esbwr.html</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
12	DUNCAN, J. D. SBWR, a simplified boiling water reactor. <i>Nuclear Engineering and Design</i> , v. 109, n. 1-2, p. 73-77, Sep.-Oct. 1988. Disponível em: <a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0029549388901434">https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0029549388901434</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
13	DELPECH, S.; MERLE, E.; HEUER, D.; SLIM, C. Liquid Fuel for Nuclear Energy: The Molten Salt Fast Reactor (MSFR) Concept. In: <i>Liquid Fuels: Types, Properties and Production</i> , 1 fev. 2012. Disponível em: <a href="https://www.researchgate.net/publication/279511944_OVERVIEW_AND_PERSPECTIVES_OF_THE_MOLTEN_SALT_FAST_REACTOR_MSFR_CONCEPT">https://www.researchgate.net/publication/279511944_OVERVIEW_AND_PERSPECTIVES_OF_THE_MOLTEN_SALT_FAST_REACTOR_MSFR_CONCEPT</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
14	OHASHI, K.; OKAMOTO, F.; HAYAKAWA, H. Modular high temperature reactor (Modular HTR) contributing the global environment protection. <i>Progress in Nuclear Energy</i> , v. 37, n. 1-4, p. 307-312, 2000. ISSN 0149-1970. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1016/S0149-1970(00)00063-9">https://doi.org/10.1016/S0149-1970(00)00063-9</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.

15	FREIRE, L.; ANDRADE, D. Novel Technological Developments with Impacts on Perspectives for Mobile Nuclear Power Plants. <i>World Journal of Nuclear Science and Technology</i> , v. 11, p. 141-158, 2021. DOI: 10.4236/wjnst.2021.114011. Acesso em: 03 mar. de 2023.
16	LERNER, E. J.; HASSAN, S. M.; KARAMITSOS, I.; VON ROESSEL, F. Confined Ion Energy 200 keV and Increased Fusion Yield in a DPF with Monolithic Tungsten Electrodes and Pre-Ionization. <i>Physics of Plasmas</i> , v. 24, p. 102708, 2017. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1063/1.4989859">https://doi.org/10.1063/1.4989859</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
17	SLOUGH, J.T. Method and Apparatus for the Generation, Heating and/or Compression of Plasmoids and/or Recovery of Energy Therefrom. US Patent No. US 20180025792 A1, 2018.
18	HORA, H. et al. Fusion Energy Using Avalanche Increased Boron Reactions for Block-Ignition by Ultrahigh Power Picosecond Laser Pulses. <i>Laser and Particle Beams</i> , v. 33, p. 607-619, 2015. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1017/S0263034615000634">https://doi.org/10.1017/S0263034615000634</a> . Acesso em: 25 nov. 2022.
19	WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. World nuclear power reactors & uranium requirements. Disponível em: <a href="https://world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power.aspx">https://world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power.aspx</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
20	NEA - NUCLEAR ENERGY AGENCY. Projected Costs of Generating Electricity - 2020 Edition. Paris: OECD Publishing, 2020.
21	EUROPEAN COMMISSION. Seventh Framework Programme for Research, Technological Development and Demonstration Activities (2007-2011). Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2007.
22	EUROPEAN COMMISSION. Horizon 2020 Work Programme 2014-2015 - Euratom. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014.
23	CROFFET, G. R.; ROBERTS, J. T.; BURKE, P. J. Plutonium-239 production from neutron capture of uranium-238. <i>Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry</i> , v. 282, n. 3, p. 951-953, 2009.
24	WNA. Reprocessing and Recycling of Spent Nuclear Fuel. World Nuclear Association, [S.l.], mar. 2021. Disponível em: <a href="https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/reprocessing-and-recycling-of-spent-nuclear-fuel.aspx">https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/reprocessing-and-recycling-of-spent-nuclear-fuel.aspx</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
25	MANKINS, J. C. Technology readiness assessments: A retrospective. <i>Acta Astronautica</i> , v. 65, n. 9-10, p. 1216-1223, 2009.
26	DEPARTMENT OF DEFENSE. Manufacturing Readiness Level (MRL) Deskbook. Washington, DC: Office of the Deputy Assistant Secretary of Defense for Manufacturing and Industrial Base Policy (MIBP), 2011.
27	NASA. NASA Systems Engineering Handbook. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, 2017.
28	MANKINS, J. C. Technology readiness levels: A white paper. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, Office of Space Access and Technology, Advanced Concepts Office, 1995.
29	WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. The Nuclear Fuel Cycle. Disponível em: <a href="https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/nuclear-fuel-cycle-overview.aspx">https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/nuclear-fuel-cycle-overview.aspx</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
30	OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY. Uranium 2018: Resources, Production and Demand. Paris: OECD Publishing, 2018.
31	WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Uranium mining overview. Disponível em: <a href="https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/uranium-mining-overview.aspx">https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/uranium-mining-overview.aspx</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
32	DEPARTMENT OF ENERGY (DOE). The Nuclear Fuel Cycle. Disponível em: <a href="https://www.energy.gov/ne/nuclear-fuel-cycle">https://www.energy.gov/ne/nuclear-fuel-cycle</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.

33	WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Conversion and Deconversion. Disponível em: <a href="https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/conversion-and-deconversion.aspx">https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/conversion-and-deconversion.aspx</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
34	INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). Uranium Enrichment. Disponível em: <a href="https://www.iaea.org/topics/uranium-enrichment">https://www.iaea.org/topics/uranium-enrichment</a> . Acesso em: 12 dez. 2022.
35	WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Enrichment. Disponível em: <a href="https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/uranium-enrichment.aspx">https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/uranium-enrichment.aspx</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
36	<a href="https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/uranium-enrichment.aspx">nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/uranium-enrichment.aspx</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
37	KUTTY, K.V.; BENNETT, J.G. Nuclear fuel fabrication. In: Nuclear Engineering and Design, v. 241, n. 12, p. 4454-4468, 2011.
38	WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Radioactive Waste Management. Disponível em: <a href="https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/radioactive-waste-management.aspx">https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/radioactive-waste-management.aspx</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
39	WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Fuel fabrication. Disponível em: <a href="https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/fuel-fabrication.aspx">https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/fuel-fabrication.aspx</a> . Acesso em: 25 jan. 2023.
40	EUROPEAN ATOMIC ENERGY COMMUNITY. Treaty establishing the European Atomic Energy Community (Euratom). Rome: Official Journal of the European Union, 1957.
41	EUROPEAN COMMISSION. Euratom Research and Training Programme 2014-2018. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014.
42	EUROPEAN COMMISSION. Sixth Framework Programme for Research, Technological Development and Demonstration Activities (2002-2006). Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2002.
43	U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA). Updated Capital Cost Estimates for Utility Scale Electricity Generating Plants. Disponível em: <a href="https://www.eia.gov/analysis/studies/powerplants/capitalcost/pdf/capital_cost_addendum.pdf">https://www.eia.gov/analysis/studies/powerplants/capitalcost/pdf/capital_cost_addendum.pdf</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
44	SUTHARSHAN, B.; MUTYALA, M.; VIJUK, R. P.; MISHRA, A. The AP1000TM Reactor: Passive Safety and Modular Design. Energy Procedia, v. 7, p. 293-302, 2011. Disponível em: <a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610211015475">https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610211015475</a> . Acesso em: 5 abr. 2023.
45	SUSILO, J.; PANE, J. S. Fuel Burn-Up Distribution and Transuranic Nuclide Contents Produced at the First Cycle Operation of AP1000. Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega, [S.l.], v.18, n.2, p. 101-112, 30 jun. 2016. DOI: 10.17146/tdm.2016.18.2.2665. Disponível em: <a href="http://dx.doi.org/10.17146/tdm.2016.18.2.2665">http://dx.doi.org/10.17146/tdm.2016.18.2.2665</a> . Acesso em: 5 abr. 2023.
46	LE BLANC, D. (2010). Molten salt reactors: A new beginning for an old idea. Nuclear Engineering and Design, 240(6), 1644-1656.
47	ZHANG, Z., ZHANG, S., ZHOU, X., FENG, M. (2017). Thermal performance analysis of a molten salt reactor based on the supercritical Brayton cycle. Applied Thermal Engineering, 113, 1533-1540.
48	DEWAN, L. C., MASSIE, M., FORBES, R. G., CAMERON, R. E. (2015). Molten salt reactor system and method of use. U.S. Patent No. 9,116,908
49	TERRESTRIAL ENERGY. Terrestrial Energy and Orano Sign Comprehensive Agreement for Nuclear Fuel Supply for IMSR Power Plant. 29 set. 2021. Disponível em:

	<a href="https://www.terrestrialenergy.com/2021/09/terrestrial-energy-and-orano-sign-comprehensive-agreement-for-nuclear-fuel-supply-for-imsr-power-plant/">https://www.terrestrialenergy.com/2021/09/terrestrial-energy-and-orano-sign-comprehensive-agreement-for-nuclear-fuel-supply-for-imsr-power-plant/</a> . Acesso em: 3 mar. 2023.
50	LERNER, E.J.; HASSAN, S.M.; KARAMITSOS-ZIVKOVIC, I. et al. Focus Fusion: Overview of Progress Towards p-B11 Fusion with the Dense Plasma Focus. <i>Journal of Fusion Energy</i> , v. 42, p. 7, 2023. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1007/s10894-023-00345-z">https://doi.org/10.1007/s10894-023-00345-z</a> . Acesso em: 11 mai. 2023.
51	TAE TECHNOLOGIES. TAE Technologies Exceeds Fusion Reactor Performance Goals By 250% As Company Closes \$250 Million Financing Round, Totaling \$1.2 Billion To Date. 2022. Disponível em: <a href="https://tae.com/tae-technologies-exceeds-fusion-reactor-performance-goals-by-250-as-company-closes-250-million-financing-round-totaling-1-2-billion-to-date/">https://tae.com/tae-technologies-exceeds-fusion-reactor-performance-goals-by-250-as-company-closes-250-million-financing-round-totaling-1-2-billion-to-date/</a> . Acesso em: 5 abr. 2023.
52	MAGEE, R. M.; OGAWA, K.; TAJIMA, T. et al. First measurements of p11B fusion in a magnetically confined plasma. <i>Nature Communications</i> , v. 14, n. 955, 2023. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1038/s41467-023-36655-1">https://doi.org/10.1038/s41467-023-36655-1</a> . Acesso em: 5 abr. 2023.
53	LERNER, E. J.; HASSAN, S. M.; KARAMITSOS, I.; VON ROESSEL, F. Confined ion energy >200 keV and increased fusion yield in a DPF with monolithic tungsten electrodes and pre-ionization. <i>Physics of Plasmas</i> , v. 24, n. 10, p. 102708, out. 2017. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1063/1.4989859">https://doi.org/10.1063/1.4989859</a> . Acesso em: 3 mar. 2023.
54	LERNER, E. J.; KRUPAKAR MURALI, S.; HABOUB, A. Theory and Experimental Program for p-B11 Fusion with the Dense Plasma Focus. <i>Journal of Fusion Energy</i> , v. 30, p. 367-376, 2011. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1007/s10894-011-9385-4">https://doi.org/10.1007/s10894-011-9385-4</a> . Acesso em: 5 abr. 2023.
55	LERNER, E. The Big Bang Never Happened-A Reassessment of the Galactic Origin of Light Elements (GOLE) Hypothesis and its Implications. 2022. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21108.63366">https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21108.63366</a> . Acesso em: 5 abr. 2023.
56	LERNER, E. Observations of Large-Scale Structures Contradict the Predictions of the Big Bang Hypothesis But Confirm Plasma Theory. 2022. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26141.79844">https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26141.79844</a> . Acesso em: 5 abr. 2023.
57	LERNER, E. J. The Big Bang Never Happened. 1. ed. Ward & Balkin Agency, Inc., 2012. E-book Kindle. Disponível em: <a href="https://www.amazon.com/dp/B008XNSKE4/">https://www.amazon.com/dp/B008XNSKE4/</a> . Acesso em: 5 abr. 2023.
58	LPPFUSION. Investing In LPPFusion. Disponível em: <a href="https://www.lppfusion.com/investing-in-lppfusion/">https://www.lppfusion.com/investing-in-lppfusion/</a> . Acesso em: 5 abr. 2023.
59	HB11 ENERGY. About. Disponível em: <a href="https://hb11.energy/our-story/">https://hb11.energy/our-story/</a> . Acesso em: 19 jun. 2023.
60	BATANI, D.; MARGARONE, D.; BELLONI, F. Advances in the Study of Laser-Driven Proton-Boron Fusion. <i>Laser and Particle Beams</i> , v. 2023, p. 1-3, 2023. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1155/2023/9824024">https://doi.org/10.1155/2023/9824024</a> . Acesso em: 19 jun. 2023.
61	MEHLHORN, T. A.; LABUN, L.; HEGELICH, B. M.; MARGARONE, D.; GU, M. F.; BATANI, D.; CAMPBELL, E. M.; HU, S. X. Path to Increasing p-B11 Reactivity via ps and ns Lasers. <i>Laser and Particle Beams</i> , v. 2022, p. 1-16, 2022. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1155/2022/2355629">https://doi.org/10.1155/2022/2355629</a> . Acesso em: 19 jun. 2023.
62	HORA, H.; ELIEZER, S.; KIRCHHOFF, G.; NISSIM, N.; WANG, J.; LALOUSIS, P.; KIRCHHOFF, J. Road map to clean energy using laser beam ignition of boron-hydrogen fusion. <i>Laser and Particle Beams</i> , v. 35, n. 4, p. 730-740, 2017. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1017/S0263034617000799">https://doi.org/10.1017/S0263034617000799</a> . Acesso em: 19 jun. 2023.
63	BELLONI, F. Multiplication Processes in High-Density H-11B Fusion Fuel. <i>Laser and Particle Beams</i> , v. 2022, Article ID 3952779, 9 p., 2022. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1155/2022/3952779">https://doi.org/10.1155/2022/3952779</a> . Acesso em: 19 jun. 2023.

64	HORA, H. et al. Fusion energy using avalanche increased boron reactions for block-ignition by ultrahigh power picosecond laser pulses. <i>Laser and Particle Beams</i> , v. 33, n. 4, p. 607-619, 2015. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1017/S0263034615000634">https://doi.org/10.1017/S0263034615000634</a> . Acesso em: 19 jun. 2023.
65	MARGARONE, D. et al. In-Target Proton–Boron Nuclear Fusion Using a PW-Class Laser. <i>Applied Sciences</i> , v. 12, 1444, 2022. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.3390/app12031444">https://doi.org/10.3390/app12031444</a> . Acesso em: 19 jun. 2023.
66	RAHMAN, M. M.; DONGXU, J.; JAHAN, N.; SALVATORES, M.; ZHAO, J. Design concepts of supercritical water-cooled reactor (SCWR) and nuclear marine vessel: A review. <i>Progress in Nuclear Energy</i> , v. 124, p. 103320, 2020. Disponível em: <a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0149197020300779">https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0149197020300779</a> . Acesso em: 5 abr. 2023.
67	GENERATION IV INTERNATIONAL FORUM (GIF). Supercritical Water-Cooled Reactor (SCWR). Disponível em: <a href="https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9269/scwr">https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9269/scwr</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
68	THE GENERATION IV INTERNATIONAL FORUM. Supercritical-Water-Cooled Reactor (SCWR). Set. 2023. Disponível em: <a href="https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_42151/supercritical-water-cooled-reactor-scwr">https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_42151/supercritical-water-cooled-reactor-scwr</a> . Acesso em: 3 mar. 2023.
69	Petroski, R. (2010). Traveling-Wave Reactors: A Truly Sustainable and Full-Scale Resource for Global Energy Needs. <i>Progress in Nuclear Energy</i> , 52(7), 962-966.
70	Weaver, K. D., & Walters, L. C. (2012). Traveling-Wave Reactors: Principles and Design. In <i>Handbook of Nuclear Engineering</i> (pp. 2741-2776). Springer. <a href="https://doi.org/10.1007/978-0-387-98149-9_6">https://doi.org/10.1007/978-0-387-98149-9_6</a>
71	Holl, M. M. (2013). The Traveling Wave Reactor: A Nuclear Technology for the 21st Century. <i>Energy Procedia</i> , 20, 155-164. <a href="https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.03.014">https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.03.014</a>
72	Chang, Y. I., Till, C. E., & Hannum, W. H. (1997). The integral fast reactor - an overview. <i>Progress in Nuclear Energy</i> , 31(1-2), 3-11. <a href="https://doi.org/10.1016/S0149-1970(96)00027-0">https://doi.org/10.1016/S0149-1970(96)00027-0</a>
73	Seifritz, W. (1987). Traveling-Wave Reactors: A New Concept in Fast Reactors. <i>Nuclear Technology</i> , 79(1), 68-71.
74	HEJZLAR, P. et al. Terrapower, LLC Traveling Wave Reactor Development Program Overview. <i>Nuclear Engineering and Technology</i> , v. 45, n. 6, p. 731-744, 2013. Disponível em: <a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1738573315301753">https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1738573315301753</a> . Acesso em: 5 abr. 2023.
75	TERRAPOWER. TerraPower and GE Hitachi Announce Launch of Natrium™ Power Production and Storage System. 2021. Disponível em: <a href="https://terrapower.com/news/terrapower-and-ge-hitachi-announce-launch-of-natrium-power-production-and-storage-system/">https://terrapower.com/news/terrapower-and-ge-hitachi-announce-launch-of-natrium-power-production-and-storage-system/</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
76	U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. DOE Announces \$160 Million in First Awards under Advanced Reactor Demonstration Program. 2020. Disponível em: <a href="https://www.energy.gov/ne/articles/doe-announces-160-million-first-awards-under-advanced-reactor-demonstration-program">https://www.energy.gov/ne/articles/doe-announces-160-million-first-awards-under-advanced-reactor-demonstration-program</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
77	GE HITACHI NUCLEAR ENERGY. Natrium™ Advanced Nuclear Reactor and Energy System. 2021. Disponível em: <a href="https://nuclear.gepower.com/build-a-plant/products/nuclear-power-plants-overview/natrium">https://nuclear.gepower.com/build-a-plant/products/nuclear-power-plants-overview/natrium</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
78	WORLD NUCLEAR NEWS. TerraPower and GE Hitachi unveil sodium fast reactor. 2021. Disponível em: <a href="https://world-nuclear-news.org/Articles/TerraPower-and-GE-Hitachi-unveil-sodium-fast-react">https://world-nuclear-news.org/Articles/TerraPower-and-GE-Hitachi-unveil-sodium-fast-react</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
79	SCHNEIDER, E. A.; EYLES, C. J.; SUTHERLAND, W. A. An evaluation of the plutonium content in reprocessed uranium. <i>Progress in Nuclear Energy</i> , v. 30, n. 2, p. 99-106, 1996.
80	MARTIN, N. M.; VEIGA, L. H. S. Uranium series: A new approach to model uranium migration in geological formations. <i>Journal of Environmental Radioactivity</i> , v. 102, n. 10, p. 926-934, 2011
81	BRUNO, J.; EWING, R.C. Spent Nuclear Fuel. <i>Elements</i> , v. 2, n. 6, p. 343-349, 2006.

82	MORRIS, R. J.; TAYLOR, R. J. The Actinides and Fission Products. In: MORRIS, R. J.; TAYLOR, R. J. (Ed.). Separation Science and Technology. Oxford: Elsevier, 2007. p. 101-132.
83	LEE, J. H.; YIM, M.-S.; CARON, F. Management of Spent Fuel from Nuclear Power
85	WNA. Reprocessing and Recycling of Spent Nuclear Fuel. World Nuclear Association, [S.l.], mar. 2021. Disponível em: <a href="https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/reprocessing-and-recycling-of-spent-nuclear-fuel.aspx">https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/reprocessing-and-recycling-of-spent-nuclear-fuel.aspx</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
86	OECD/NEA. The Economics of the Back End of the Nuclear Fuel Cycle. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, 2013.
87	WNA. Mixed Oxide Fuel (MOX). World Nuclear Association, [S.l.], set. 2021. Disponível em: <a href="https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/mixed-oxide-fuel-mox.aspx">https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/mixed-oxide-fuel-mox.aspx</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
88	YIM, M.-S.; CARON, F. Life cycle and management of carbon-14 from nuclear power generation. Progress in Nuclear Energy, v. 48, n. 1, p. 2-36, 2006.
89	SCHNEIDER, E. A.; DEINERT, M. R.; COGAN, J. Economic modeling of mixed oxide fuel use in LWRs using linear programming. Progress in Nuclear Energy, v. 52, n. 3, p. 341-351, 2010.
90	ZAJAC, R.; HATALA, B.; DARILEK, P. Overview of ALLEGRO project. In: VAJDA, J.; JAMNICKY, I. (Eds.). Proceedings 21 International Conference on Applied Physics of Condensed Matter and of the Scientific Conference Advanced Fast Reactors, p. 400. Slovakia: Slovak University of Technology, Jun 2015. Available at: <a href="https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:49047154">https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:49047154</a> . Accessed on: Apr 5, 2023.
91	Dařílek, P., Zajac, R., Chrebet, T., Keresztúri, A., Temesvári, E., Gren, M., Koszúk, L., & Vasile, A. (2017). ALLEGRO Core Neutron Physics Studies. In: International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17) Programme and Papers (p. v). Vienna: International Atomic Energy Agency (IAEA). Disponível em: <a href="https://media.superevent.com/documents/20170620/fab9bf581a6d095de7cf23ea0813a0ac/fr17-037.pdf">https://media.superevent.com/documents/20170620/fab9bf581a6d095de7cf23ea0813a0ac/fr17-037.pdf</a> . Acesso em: 5 abr. 2023.
92	ANIEL, S.; BERGERON, J.; PUIL, A. Avaliação do conteúdo máximo de um reator de água pressurizada alimentado por MOX versus composição isotópica em relação ao coeficiente de vazão. Viena: International Atomic Energy Agency, 1997. Disponível em: <a href="https://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig_q=RN:28047175">https://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig_q=RN:28047175</a> . Acesso em: 5 abr. 2023.
93	BUNN, M.; HOLDREN, J. P.; VAN DER ZWAN, B. The Economics of Reprocessing vs. Direct Disposal of Spent Nuclear Fuel. Nuclear Technology, v. 150, n. 2, p. 209-230, 2005.
94	INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Generation IV Nuclear Energy Systems. Vienna, 2019. Disponível em: <a href="https://www.iaea.org/topics/technology-development/gen-iv">https://www.iaea.org/topics/technology-development/gen-iv</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
95	GROMADA, M. et al. A comparative study of carbide and oxide fuels for gas-cooled fast reactor. Journal of Nuclear Materials, v. 498, p. 244-254, 2018.
96	KIM, T. K. et al. Transmutation of transuranic elements in gas-cooled fast reactors. Progress in Nuclear Energy, v. 52, n. 7, p. 772-781, 2010.
97	LE BRUN, C. et al. The gas-cooled fast reactor (GFR) – Concept and preliminary design studies. Nuclear Engineering and Design, v. 235, n. 10, p. 1119-1136, 2005
98	INAGAKI, T.; FUJIMOTO, N.; MORIYAMA, K. Thermal hydraulic analysis of the gas turbine high temperature gas-cooled reactor. Nuclear Engineering and Design, v. 235, n. 10, p. 1143-1153, 2005.



99	WILLIAMS, A. Gas-cooled fast reactor: Current status and R&D activities. IAEA-CN-164-4S01, International Atomic Energy Agency, 2010.
100	POPE, M. A. et al. Overview of gas-cooled reactor passive safety features. Progress in Nuclear Energy, v. 50, n. 2-6, p. 229-234, 2008.
101	ZAJAC, R.; HATALA, B.; DARILEK, P. Overview of ALLEGRO project. In: VAJDA, J.; JAMNICKY, I. (Eds.). Proceedings 21 International Conference on Applied Physics of Condensed Matter and of the Scientific Conference Advanced Fast Reactors, p. 400. Slovakia: Slovak University of Technology, Jun 2015. Available at: <a href="https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:49047154">https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:49047154</a> . Accessed on: Apr 5, 2023.
102	CHANG, Y. I.; KIM, T. K. Sodium-cooled fast reactor technology. Progress in Nuclear Energy, v. 47, n. 1-4, p. 50-63, 2005
103	ZHANG, J.; LI, N. Research and development progress of Gen-IV sodium-cooled fast reactor in China. Nuclear Engineering and Design, v. 290, p. 30-40, 2015.
104	TODREAS, N. E.; KAZIMI, M. S. Nuclear Systems Volume I: Thermal Hydraulic Fundamentals, Second Edition. CRC Press, 2012.
105	LOYALKKA, S. et al. Overview of sodium-cooled fast reactor structures, systems, and components. Nuclear Engineering and Design, v. 241, n. 11, p. 4416-4426, 2011.
106	INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Sodium-Cooled Fast Reactors (SFRs) and Their Application for Actinide Transmutation. Vienna, 2014. Disponível em: <a href="https://www.iaea.org/publications/10171/sodium-cooled-fast-reactors-sfrs-and-their-application-for-actinide-transmutation">https://www.iaea.org/publications/10171/sodium-cooled-fast-reactors-sfrs-and-their-application-for-actinide-transmutation</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
107	WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Nuclear Power in Russia. Disponível em: <a href="https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/russia-nuclear-power.aspx">https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/russia-nuclear-power.aspx</a> . Acesso em: 23 abr. 2023
108	ANISIMOV, A. M. et al. Electromagnetic pumps for BN-800. Atomic Energy, v. 112, n. 6, p. 443, 2012. Disponível em: <a href="https://search.proquest.com/openview/c15bff51b0d78741b11ac0ab1ae13e76/1?pq-origsite=gscholar&amp;cbl=54011">https://search.proquest.com/openview/c15bff51b0d78741b11ac0ab1ae13e76/1?pq-origsite=gscholar&amp;cbl=54011</a> . Acesso em: 5 abr. 2023.
109	KÜTT, Moritz; FRIEB, Friederike; ENGLERT, Matthias. Plutonium Disposition in the BN-800 Fast Reactor: An Assessment of Plutonium Isotopics and Breeding. Science & Global Security, v. 22, n. 3, p. 188-208, 2014. DOI: 10.1080/08929882.2014.952578.
110	ALEKSEEV, P. N. et al. BN-800 as a prototype of the next generation sodium-cooled fast reactors. International Journal of Nuclear Energy Science and Technology, v. 7, n. 3, p. 207-216, 2012.
111	WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Nuclear Power in Russia. Disponível em: <a href="https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/russia-nuclear-power.aspx">https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/russia-nuclear-power.aspx</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
112	GEN-IV INTERNATIONAL FORUM. Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems. 2014. Disponível em: <a href="https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2014-03/gif-tru2014.pdf">https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2014-03/gif-tru2014.pdf</a> . Acesso em: 23 abr. 2023.
113	LOEWEN, E. P. et al. Overview of the Lead-Cooled Fast Reactor Technology. Proceedings of ICAPP 2011, Nice, France, May 2-5, 2011.
114	TACCOGNA, N.; AIELLO, A. Lead and lead-alloy coolants in nuclear technology. Progress in Nuclear Energy, v. 78, p. 273-286, 2014.
115	CINOTTI, L.; FRAZER, K.; MANSANI, L. Design and safety features of the European Lead Fast Reactor. Nuclear Engineering and Design, v. 241, n. 9, p. 3507-3516, 2011

116	BORIO DI TIGLIOLE, A. et al. The European Lead Fast Reactor Strategy and the Roadmap for the Demonstrator ALFRED. <i>Energy Procedia</i> , v. 66, p. 313-323, 2015.
117	SMITH, C. F. et al. Safety and core design of large liquid-metal cooled fast reactors. <i>Nuclear Engineering and Design</i> , v. 241, n. 9, p. 3479-3488, 2011.
118	ROSATOM. BREST-OD-300 Lead-cooled fast reactor. Disponível em: <a href="https://rosatom.ru/en/rosatom-group/innovations/nuclear-technology-breakthrough/brest-od-300/">https://rosatom.ru/en/rosatom-group/innovations/nuclear-technology-breakthrough/brest-od-300/</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
119	SHADRIN, A. Yu et al. PH process as a technology for reprocessing mixed uranium–plutonium fuel from BREST-OD-300 reactor. <i>Radiochemistry</i> , v. 58, n. 3, p. 271-279, 2016. Disponível em: <a href="https://link.springer.com/article/10.1134/S1066362216030085">https://link.springer.com/article/10.1134/S1066362216030085</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
120	SHADRIN, A. Yu et al. Hydrometallurgical Reprocessing of BREST-OD-300 Mixed Uranium-plutonium Nuclear Fuel. <i>Procedia Chemistry</i> , v. 21, p. 148-155, 2016. Disponível em: <a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876619616300638">https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876619616300638</a> . Acesso em: 05 abr. de 2023.
121	WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Russia awards contract to build BREST reactor. 05 dez. 2019. Disponível em: <a href="https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Russia-awards-contract-to-build-BREST-reactor">https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Russia-awards-contract-to-build-BREST-reactor</a> . Acesso em: 5 abr. 2023.
122	KAZIMI, M. Thorium Fuel for Nuclear Energy. <i>American Scientist</i> , v. 91, n. 5, p. 408-415, 2003.
123	HARGRAVES, R.; HEILEN, R. The Liquid-Fluoride Thorium Reactor: How to Make Nuclear Weapons Obsolete. American Security Project, 2012. Disponível em: <a href="https://www.americansecurityproject.org/wp-content/uploads/2012/09/The-Liquid-Fluoride-Thorium-Reactor.pdf">https://www.americansecurityproject.org/wp-content/uploads/2012/09/The-Liquid-Fluoride-Thorium-Reactor.pdf</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
124	LE BLANC, D. Molten Salt Reactors: A New Beginning for an Old Idea. <i>Nuclear Engineering and Design</i> , v. 240, n. 6, p. 1644-1656, 2010.
125	GALPERIN, A.; SEVASTYANOV, Y. G.; TOSHINSKY, G. I. Thorium Fuel in Pressurized Water Reactors. <i>Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science</i> , v. 2, n. 4, 2016.
126	LOCHBAUM, D. A.; LYMAN, E. S.; STRANAHAN, S. Q. Nuclear Power Plant Safety and Security: Lessons from Fukushima and Beyond. Cambridge, MA: Union of Concerned Scientists, 2012.
127	SUTER, C. R. The U-232/U-233 High Gamma System: A Potential Drawback of Thorium Nuclear Fuel. <i>Journal of Science and Technology of the Arts</i> , v. 6, n. 1, p. 57-62, 2014.
128	OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY. Molten Salt Reactor Experiment. Disponível em: <a href="https://www.ornl.gov/content/molten-salt-reactor-experiment">https://www.ornl.gov/content/molten-salt-reactor-experiment</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
129	KAZIMI, M. Thorium Fuel for Nuclear Energy. <i>American Scientist</i> , v. 91, n. 5, p. 408-415, 2003.
130	LOCATELLI, G.; BOARIN, S.; PIACENTINO, A.; RICOTTI, M. E. Load following with Small Modular Reactors (SMR): A real options analysis. <i>Energy</i> , v. 80, p. 41-54, 2015.
131	HORE-LACY, I. Nuclear Energy in the 21st Century. 2nd ed. Burlington, MA: Elsevier, 2010.
132	US NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. Backgrounder on the Three Mile Island Accident. Disponível em: <a href="https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.html">https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.html</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
133	EPRI - ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. Advanced Nuclear Technology: New Nuclear Power Plant Information Handover Guide. Palo Alto, CA: EPRI, 2016.
134	LAWSON, J. D. Some criteria for a power producing thermonuclear reactor. <i>Proceedings of the Physical Society. Section B</i> , v. 70, n. 1, p. 6-10, 1957.
135	GLASSTONE, S.; LOVBERG, R. H. Controlled Thermonuclear Reactions: An Introduction to Theory and Experiment. Princeton, NJ: Van Nostrand, 1960.
136	KAMMASH, T. Fusion Energy: An Introduction to the Concepts and Technology of Harnessing Fusion Power. New York, NY: Wiley, 1995.

137	FRIEDLANDER, G.; KENNEDY, J. W.; MILLER, J. M. Nuclear and Radiochemistry (3rd ed.). New York, NY: Wiley, 1981.
138	RIDER, T. H. A general critique of inertial-electrostatic confinement fusion systems. <i>Physics of Plasmas</i> , v. 2, n. 6, p. 1853-1872, 1995.
139	NOCERA, D. G. The artificial leaf. <i>Accounts of Chemical Research</i> , v. 45, n. 5, p. 767-776, 2012.
140	HOLL, M. M. B.; SIMON, S. L. The biokinetics of tritium in the human body for short and long-term exposures. <i>Radiation and Environmental Biophysics</i> , v. 45, n. 1, p. 23-38, 2006.
141	ZINKLE, S. J.; WAS, G. S. Materials challenges in nuclear energy. <i>Acta Materialia</i> , v. 61, n. 3, p. 735-758, 2013.
142	MAMYRIN, B. A.; TOLSTIKHIN, I. N. Helium isotopes in nature. Amsterdam: Elsevier, 1984.
143	EERKENS, J. W.; EERKENS, J. Fractional distillation of water. <i>Analytical Chemistry</i> , v. 77, n. 19, p. 6303-6306, 2005.
144	LEWIS, G. N.; MACDONALD, R. T. Concentration of H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> and HDO by electrolysis. <i>Journal of the American Chemical Society</i> , v. 55, n. 1, p. 205-218, 1933.
145	UREY, H. C.; HUFFMAN, J. R.; THODE, H. G. Concentration of N <sup>15</sup> by chemical methods. <i>Journal of Chemical Physics</i> , v. 19, n. 7, p. 902-904, 1951.
146	HOLL, M. M. B.; SIMON, S. L. The biokinetics of tritium in the human body for short and long-term exposures. <i>Radiation and Environmental Biophysics</i> , v. 45, n. 1, p. 23-38, 2006.
147	GLASSTONE, S.; LOVBERG, R. H. Controlled Thermonuclear Reactions: An Introduction to Theory and Experiment. Princeton, NJ: Van Nostrand, 1960.
148	STOTT, P. E.; WILLIAMS, P. A. Tritium production by accelerator-based methods. <i>Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Physical and Engineering Sciences</i> , v. 341, n. 1661, p. 49-59, 1992.
149	ITER ORGANIZATION. What is ITER? Disponível em: <a href="https://www.iter.org/proj/inafewlines">https://www.iter.org/proj/inafewlines</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
150	MIT PLASMA SCIENCE & FUSION CENTER. SPARC. Disponível em: <a href="https://www.psfc.mit.edu/sparc">https://www.psfc.mit.edu/sparc</a> . Acesso em: 3 mar. 2023.
151	ITER ORGANIZATION. The Tokamak and its Plant Systems. Disponível em: <a href="https://www.iter.org/mach">https://www.iter.org/mach</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
152	ITER ORGANIZATION. How ITER Works. Disponível em: <a href="https://www.iter.org/mach/howiterworks">https://www.iter.org/mach/howiterworks</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
153	ITER ORGANIZATION. Achieving Fusion. Disponível em: <a href="https://www.iter.org/sci/whatisfusion">https://www.iter.org/sci/whatisfusion</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
154	ITER ORGANIZATION. ITER Timeline. Disponível em: <a href="https://www.iter.org/proj/itermilestones">https://www.iter.org/proj/itermilestones</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
155	ITER. Fuel Cycle. Disponível em: <a href="https://www.iter.org/mach/FuelCycle">https://www.iter.org/mach/FuelCycle</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
156	GLUGLA, M. et al. ITER fuel cycle R&D: Consequences for the design. <i>Fusion Engineering and Design</i> , v. 81, n. 1-7, p. 733-744, 2006. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2005.07.038">https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2005.07.038</a> . Acesso em: 30 ago. 2023.
157	ITER ORGANIZATION. Completion to First Plasma. Disponível em: <a href="https://www.iter.org/construction/construction">https://www.iter.org/construction/construction</a> . Acesso em: 28 fev. 2023.
158	CLERY, D. ITER fusion project to take at least 6 years longer than planned. In: <i>SCIENCE</i> . 2016. Disponível em: <a href="https://www.sciencemag.org/news/2016/07/iter-fusion-project-take-least-6-years-longer-planned">https://www.sciencemag.org/news/2016/07/iter-fusion-project-take-least-6-years-longer-planned</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.

159	ALCOCK, L. How much will ITER cost? In: NATURE. 2007. Disponível em: <a href="https://www.nature.com/articles/450330a">https://www.nature.com/articles/450330a</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
160	HOLTKAMP, N. An overview of the ITER project. Fusion Engineering and Design, v. 82, n. 5-14, p. 427-434, 2007. ISSN 0920-3796. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2007.03.029">https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2007.03.029</a> . Acesso em: 30 ago. 2023.
161	FREIRE, L.; ANDRADE, D. Novel Technological Developments with Impacts on Perspectives for Mobile Nuclear Power Plants. World Journal of Nuclear Science and Technology, v. 11, p. 141-158, 2021. doi: 10.4236/wjnst.2021.114011.
162	COMMONWEALTH FUSION SYSTEMS. About Us. Disponível em: <a href="https://www.cfs.energy/about">https://www.cfs.energy/about</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
163	CREELY, A. J. et al. The high-temperature superconducting cable for the SPARC tokamak. In: SUPERCONDUCTOR SCIENCE AND TECHNOLOGY. 2020, vol. 33, no 10. Disponível em: <a href="https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6668/ab9b1d">https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6668/ab9b1d</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
164	WHYATT, T. et al. Overview of the SPARC tokamak. In: JOURNAL OF PLASMA PHYSICS. 2020, vol. 86, no 5. Disponível em: <a href="https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-plasma-physics/article/abs/overview-of-the-sparc-tokamak/1E0E92C706D9BB5C9F5A5E5ECB0E5C3">https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-plasma-physics/article/abs/overview-of-the-sparc-tokamak/1E0E92C706D9BB5C9F5A5E5ECB0E5C3</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
165	KASTING, G. et al. Commercial fusion power plant study—ARC. In: FUSION ENGINEERING AND DESIGN. 2021, vol. 166. Disponível em: <a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092037962030380X">https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092037962030380X</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
166	KASTING, G. et al. Commercial fusion power plant study—ARC. In: FUSION ENGINEERING AND DESIGN. 2021, vol. 166. Disponível em: <a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092037962030380X">https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092037962030380X</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
167	COMMONWEALTH FUSION SYSTEMS. Commonwealth Fusion Systems Opens Fusion Energy Campus on the Fastest Path to Bring Clean Fusion Energy to the World. 10 fev. 2023. Disponível em: <a href="https://www.cfs.energy/news-and-media/cfs-opens-fusion-energy-campus">https://www.cfs.energy/news-and-media/cfs-opens-fusion-energy-campus</a> . Acesso em: 03 mar. 2023.
168	MIT NEWS. MIT and CFS make major leap on the path to fusion power. 2020. Disponível em: <a href="https://news.mit.edu/2020/MIT-CFS-major-advance-toward-fusion-power-0831">https://news.mit.edu/2020/MIT-CFS-major-advance-toward-fusion-power-0831</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
169	COMMONWEALTH FUSION SYSTEMS. Commonwealth Fusion Systems Wins Two DoE INFUSE Awards to Accelerate Fusion Energy Development. 19 jan. 2023. Disponível em: <a href="https://www.cfs.energy/news-and-media/cfs-wins-two-new-infuse-awards">https://www.cfs.energy/news-and-media/cfs-wins-two-new-infuse-awards</a> . Acesso em: 03 mar. 2023.
170	MOLINA, P.; REYES, S.; MARTÍNEZ-VAL, J. M. Aneutronic fusion reactions. Fusion Engineering and Design, v. 51-52, p. 755-760, 2000.
171	HARMS, A. A.; SCHULTZ, K. R.; MAUK, K. H. Principles of Fusion Energy: An Introduction to Fusion Energy for Students of Science and Engineering. Singapore: World Scientific, 2000.
172	ONGENA, J.; VAN OOST, G. Energy for future centuries. Progress in Fusion and Plasma Physics. European Physical Journal - Web of Conferences, v. 157, 2017.
173	MURPHY, C. D.; SHAKIR, S. S.; SANTOS, J. J. Helium-3: A secure energy supply for the 21st century? Energy Policy, v. 112, p. 331-338, 2018.
174	CHU, Y.; XIAO, C.; WANG, X. Numerical study on the ignition conditions of D- <sup>3</sup> He and D-T fusion fuel. Journal of Fusion Energy, v. 30, n. 3, p. 215-218, 2011.
175	KULCINSKI, G. L.; EMMERT, G. A.; GLOECKLER, G.; HORI, A.; LOGAN, B. G.; SANTARIUS, J. F. Advanced fuel fusion: status and prospects. Fusion Technology, v. 30, n. 3, p. 386-400, 1996.

176	HELION ENERGY. Fusion Engine. Disponível em: <a href="https://www.helionenergy.com/technology">https://www.helionenergy.com/technology</a> . Acesso em: 3 mar. 2023.
177	KIRTLEY, D. et al. The Fusion Engine: A Fully Driven, High-Gain, Magnetized Target Fusion Reactor. In: IEEE Transactions on Plasma Science. 2014, vol. 42. Disponível em: <a href="https://ieeexplore.ieee.org/document/6752679">https://ieeexplore.ieee.org/document/6752679</a> . Acesso em: 3 mar. 2023.
178	NATIONAL IGNITION FACILITY. Inertial Confinement Fusion. Disponível em: <a href="https://lasers.llnl.gov/science/icf">https://lasers.llnl.gov/science/icf</a> . Acesso em: 23 abr. 2023.
179	TAE Technologies. Field-Reversed Configuration. Disponível em: <a href="https://tae.com/technology/field-reversed-configuration/">https://tae.com/technology/field-reversed-configuration/</a> . Acesso em: 3 mar. 2023.
180	HORTON, W. Drift waves and transport. In: Reviews of Modern Physics. 1999, vol. 71. Disponível em: <a href="https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.71.735">https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.71.735</a> . Acesso em: 3 mar. 2023
181	GUO, H.Y. et al. Formation of a Stable Field Reversed Configuration through Merging. In: Physical Review Letters. 2012, vol. 108. Disponível em: <a href="https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.108.065001">https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.108.065001</a> . Acesso em: 3 mar. 2023.
182	MÖLLER, C. et al. Status of the Field-Reversed Configuration Research at the University of Washington. In: Fusion Science and Technology. 2004, vol. 45. Disponível em: <a href="https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.13182/FST45-5-654">https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.13182/FST45-5-654</a> . Acesso em: 3 mar. 2023.
183	"Helion Energy will supply Microsoft with Fusion Energy". Power Electronics News. Disponível em: <a href="https://www.powerelectronicsnews.com/helion-energy-will-supply-microsoft-with-fusion-energy/">https://www.powerelectronicsnews.com/helion-energy-will-supply-microsoft-with-fusion-energy/</a> . Publicado em: 16 jun. 2023. Acesso em: 27 jun. 2023.
184	HELION ENERGY. Fuel. Disponível em: <a href="https://www.helionenergy.com/fuel">https://www.helionenergy.com/fuel</a> . Acesso em: 3 mar. 2023
185	YOUTUBE. A New Way to Achieve Nuclear Fusion: Helion. Disponível em: <a href="https://www.youtube.com/watch?v=_bDXXWQxK38">https://www.youtube.com/watch?v=_bDXXWQxK38</a> . Publicado em: dez. 2022. Acesso em: 3 mar. 2023.
186	HELION ENERGY. Clean Energy. Disponível em: <a href="https://www.helionenergy.com/clean-energy">https://www.helionenergy.com/clean-energy</a> . Acesso em: 3 mar. 2023.
187	HELION ENERGY. Helion Energy Raises Over \$500 Million in Series E Funding to Advance Fusion Technology. Disponível em: <a href="https://www.helionenergy.com/uploads/press-releases/2021-09-15-Press-Release-Helion-Energy-Series-E.pdf">https://www.helionenergy.com/uploads/press-releases/2021-09-15-Press-Release-Helion-Energy-Series-E.pdf</a> . Acesso em: 3 mar. 2023.
188	HEJZLAR, P. et al. Terrapower, LLC Traveling Wave Reactor Development Program Overview. Nuclear Engineering and Technology, v. 45, n. 6, p. 731-744, 2013. Disponível em: <a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1738573315301753">https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1738573315301753</a> . Acesso em: 5 abr. 2023.
189	TERRAPOWER. TerraPower and GE Hitachi Announce Launch of Natrium™ Power Production and Storage System. 2021. Disponível em: <a href="https://terrapower.com/news/terrapower-and-ge-hitachi-announce-launch-of-natrium-power-production-and-storage-system/">https://terrapower.com/news/terrapower-and-ge-hitachi-announce-launch-of-natrium-power-production-and-storage-system/</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
190	U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. DOE Announces \$160 Million in First Awards under Advanced Reactor Demonstration Program. 2020. Disponível em: <a href="https://www.energy.gov/ne/articles/doe-announces-160-million-first-awards-under-advanced-reactor-demonstration-program">https://www.energy.gov/ne/articles/doe-announces-160-million-first-awards-under-advanced-reactor-demonstration-program</a> . Acesso em: 03 mar. de 2023.
191	LOCKHEED MARTIN. Compact Fusion. Disponível em: <a href="https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/compact-fusion.html">https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/compact-fusion.html</a> . Acesso em: 3 mar. 2023.
192	SKUNK, Martin. Lockheed Martin's 100 MW Compact Fusion Nuclear Reactor. Maryland, USA: Direct Industry. Disponível em: <a href="https://projects.directindustry.com/project-179.html">https://projects.directindustry.com/project-179.html</a> . Acesso em: 3 mar. 2023.
193	MCGUIRE, T. et al. High Beta Nuclear Fusion Reactor. U.S. Patent 9,249,254 B2, 2 fev. 2016. Disponível em: <a href="https://patents.google.com/patent/US9249254B2/en">https://patents.google.com/patent/US9249254B2/en</a> . Acesso em: 3 mar. 2023.

194	GUNN, J. P. et al. Plasma confinement in a magnetic cusp configuration. In: Physics of Plasmas. 1997, vol. 4. Disponível em: <a href="https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.872327">https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.872327</a> . Acesso em: 3 mar. 2023.
195	LOCKHEED MARTIN. Lockheed Martin's Compact Fusion Reactor. Disponível em: <a href="https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed-martin/eo/documents/energy/cfr-white-paper.pdf">https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed-martin/eo/documents/energy/cfr-white-paper.pdf</a> . Acesso em: 3 mar. 2023.
196	MCGUIRE, T. Compact Fusion Reactor. Disponível em: <a href="https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed/data/corporate/documents/LM-White-Paper-Thomas-McGuire.pdf">https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed/data/corporate/documents/LM-White-Paper-Thomas-McGuire.pdf</a> . Acesso em: 3 mar. 2023.
197	ZAP ENERGY. Technology. Disponível em: <a href="https://www.zapenergyinc.com/technology">https://www.zapenergyinc.com/technology</a> . Acesso em: 3 mar. 2023.
198	SHUMAKER, D.E. et al. Sustained Neutron Production from a Sheared-Flow Stabilized Z Pinch. Physical Review Letters, v. 114, n. 2, 025001, 2015. DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.025001.
199	SHUMAKER, D.E. et al. Fusion energy output greater than the kinetic energy of an imploding shell in a Z-pinch driven fusion target. Nature Communications, v. 12, n. 1, 2447, 2021. DOI: 10.1038/s41467-021-22781-3.
200	U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. ARPA-E Announces Funding for Innovative Technologies. Disponível em: <a href="https://arpa-e.energy.gov/news-and-media/press-releases/arpa-e-announces-funding-innovative-technologies">https://arpa-e.energy.gov/news-and-media/press-releases/arpa-e-announces-funding-innovative-technologies</a> . Acesso em: 3 mar. 2023.
201	ELIEZER, S. et al. Avalanche proton-boron fusion based on elastic nuclear collisions. Physics of Plasmas, v. 23, n. 5, 050704, maio 2016. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1063/1.4950824">https://doi.org/10.1063/1.4950824</a> . Acesso em: 30 ago. 2023.
202	TAE TECHNOLOGIES. TAE Technologies Exceeds Fusion Reactor Performance Goals By 250% As Company Closes \$250 Million Financing Round, Totaling \$1.2 Billion To Date. 2022. Disponível em: <a href="https://tae.com/tae-technologies-exceeds-fusion-reactor-performance-goals-by-250-as-company-closes-250-million-financing-round-totaling-1-2-billion-to-date/">https://tae.com/tae-technologies-exceeds-fusion-reactor-performance-goals-by-250-as-company-closes-250-million-financing-round-totaling-1-2-billion-to-date/</a> . Acesso em: 5 abr. 2023.
203	ROMERO, J. A.; DETTRICK, S. A.; GRANSTEDT, E. et al. Inference of field reversed configuration topology and dynamics during Alfvénic transients. Nature Communications, v. 9, n. 691, 2018. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1038/s41467-018-03110-5">https://doi.org/10.1038/s41467-018-03110-5</a> . Acesso em: 5 abr. 2023.
204	MAGEE, R. M.; OGAWA, K.; TAJIMA, T. et al. First measurements of p11B fusion in a magnetically confined plasma. Nature Communications, v. 14, n. 955, 2023. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1038/s41467-023-36655-1">https://doi.org/10.1038/s41467-023-36655-1</a> . Acesso em: 5 abr. 2023.
205	MAGEE, R.M.; NECAS, A.; CLARY, R. et al. Direct observation of ion acceleration from a beam-driven wave in a magnetic fusion experiment. Nat. Phys., v. 15, p. 281-286, 2019. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1038/s41567-018-0389-0">https://doi.org/10.1038/s41567-018-0389-0</a> . Acesso em: 3 ago. 2023.
206	LPPFUSION. About LPPFusion. Disponível em: <a href="https://www.lppfusion.com/about-lppfusion/">https://www.lppfusion.com/about-lppfusion/</a> . Acesso em: 5 abr. 2023.
207	LERNER, E. J. The Big Bang Never Happened. 1. ed. Ward & Balkin Agency, Inc., 2012. E-book Kindle. Disponível em: <a href="https://www.amazon.com/dp/B008XNSKE4/">https://www.amazon.com/dp/B008XNSKE4/</a> . Acesso em: 5 abr. 2023.
208	LERNER, E. The Big Bang Never Happened-A Reassessment of the Galactic Origin of Light Elements (GOLE) Hypothesis and its Implications. 2022. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21108.63366">https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21108.63366</a> . Acesso em: 5 abr. 2023.
209	LERNER, E. Observations of Large-Scale Structures Contradict the Predictions of the Big Bang Hypothesis But Confirm Plasma Theory. 2022. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26141.79844">https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26141.79844</a> . Acesso em: 5 abr. 2023.

210	LERNER, E. J.; KRUPAKAR MURALI, S.; HABOUB, A. Theory and Experimental Program for p-B11 Fusion with the Dense Plasma Focus. <i>Journal of Fusion Energy</i> , v. 30, p. 367-376, 2011. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1007/s10894-011-9385-4">https://doi.org/10.1007/s10894-011-9385-4</a> . Acesso em: 5 abr. 2023.
211	LERNER, E.J.; HASSAN, S.M.; KARAMITSOS-ZIVKOVIC, I. et al. Focus Fusion: Overview of Progress Towards p-B11 Fusion with the Dense Plasma Focus. <i>Journal of Fusion Energy</i> , v. 42, p. 7, 2023. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1007/s10894-023-00345-z">https://doi.org/10.1007/s10894-023-00345-z</a> . Acesso em: 11 mai. 2023.
212	LERNER, E. J.; HASSAN, S. M.; KARAMITSOS, I.; VON ROESSEL, F. Confined ion energy >200 keV and increased fusion yield in a DPF with monolithic tungsten electrodes and pre-ionization. <i>Physics of Plasmas</i> , v. 24, n. 10, p. 102708, out. 2017. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1063/1.4989859">https://doi.org/10.1063/1.4989859</a> . Acesso em: 3 mar. 2023.
213	LPPFUSION. Investing In LPPFusion. Disponível em: <a href="https://www.lppfusion.com/investing-in-lppfusion/">https://www.lppfusion.com/investing-in-lppfusion/</a> . Acesso em: 5 abr. 2023.
214	BATANI, D.; MARGARONE, D.; BELLONI, F. Advances in the Study of Laser-Driven Proton-Boron Fusion. <i>Laser and Particle Beams</i> , v. 2023, p. 1-3, 2023. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1155/2023/9824024">https://doi.org/10.1155/2023/9824024</a> . Acesso em: 19 jun. 2023.
215	HB11 ENERGY. About. Disponível em: <a href="https://hb11.energy/our-story/">https://hb11.energy/our-story/</a> . Acesso em: 19 jun. 2023.
216	MEHLHORN, T. A.; LABUN, L.; HEGELICH, B. M.; MARGARONE, D.; GU, M. F.; BATANI, D.; CAMPBELL, E. M.; HU, S. X. Path to Increasing p-B11 Reactivity via ps and ns Lasers. <i>Laser and Particle Beams</i> , v. 2022, p. 1-16, 2022. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1155/2022/2355629">https://doi.org/10.1155/2022/2355629</a> . Acesso em: 19 jun. 2023.
217	HORA, H.; ELIEZER, S.; KIRCHHOFF, G.; NISSIM, N.; WANG, J.; LALOUSIS, P.; KIRCHHOFF, J. Road map to clean energy using laser beam ignition of boron-hydrogen fusion. <i>Laser and Particle Beams</i> , v. 35, n. 4, p. 730-740, 2017. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1017/S0263034617000799">https://doi.org/10.1017/S0263034617000799</a> . Acesso em: 19 jun. 2023.
218	BELLONI, F. Multiplication Processes in High-Density H-11B Fusion Fuel. <i>Laser and Particle Beams</i> , v. 2022, Article ID 3952779, 9 p., 2022. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1155/2022/3952779">https://doi.org/10.1155/2022/3952779</a> . Acesso em: 19 jun. 2023.
219	HORA, H. et al. Fusion energy using avalanche increased boron reactions for block-ignition by ultrahigh power picosecond laser pulses. <i>Laser and Particle Beams</i> , v. 33, n. 4, p. 607-619, 2015. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1017/S0263034615000634">https://doi.org/10.1017/S0263034615000634</a> . Acesso em: 19 jun. 2023.
220	MARGARONE, D. et al. In-Target Proton-Boron Nuclear Fusion Using a PW-Class Laser. <i>Applied Sciences</i> , v. 12, 1444, 2022. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.3390/app12031444">https://doi.org/10.3390/app12031444</a> . Acesso em: 19 jun. 2023.
221	UNSW NEWSROOM. Pioneering technology promises unlimited, clean and safe energy. Disponível em: <a href="https://newsroom.unsw.edu.au/news/science-tech/pioneering-technology-promises-unlimited-clean-and-safe-energy?utm_source=miragenews&amp;utm_medium=miragenews&amp;utm_campaign=news">https://newsroom.unsw.edu.au/news/science-tech/pioneering-technology-promises-unlimited-clean-and-safe-energy?utm_source=miragenews&amp;utm_medium=miragenews&amp;utm_campaign=news</a> . Publicado em 24 de fevereiro de 2020. Acesso em: 19 jun. 2023.
222	HB11 ENERGY. HB11 Energy awarded \$20M project as part of building the largest recycling and clean energy advanced manufacturing ecosystem in Australia. Disponível em: <a href="https://hb11.energy/2022/09/30/hb11-energy-awarded-20m-project-as-part-of-building-the-largest-recycling-and-clean-energy-advanced-manufacturing-ecosystem-in-australia/">https://hb11.energy/2022/09/30/hb11-energy-awarded-20m-project-as-part-of-building-the-largest-recycling-and-clean-energy-advanced-manufacturing-ecosystem-in-australia/</a> . Publicado em 30 de setembro de 2022. Acesso em: 19 jun. 2023.
223	RIDER, T. H. A general critique of inertial-electrostatic confinement fusion systems. <i>Physics of Plasmas</i> , v. 2, n. 6, p. 1853-1872, 1995.
224	CHU, Y.; HORA, H. Minimum ignition temperatures for fusion energy with protons reacting on lithium, boron, and helium. <i>Fusion Technology</i> , v. 27, n. 1, p. 59-62, 1995.

225	PARK, J. K. et al. Catalyzed D-D fusion in a levitated dipole. <i>Journal of Fusion Energy</i> , v. 26, n. 1-2, p. 99-103, 2007.
226	BALDUINO, G. W.; FREIRE, L. O.; PEASE, D.; DE ANDRADE, D. A. Critical Survey on Cold Fusion: Aneutronic Chain Reactions or Collective Effects? Disponível em: <a href="https://ssrn.com/abstract=4174104">https://ssrn.com/abstract=4174104</a>
227	FREIRE, L. O.; DE ANDRADE, D. A. Preliminary survey on cold fusion: It's not pathological science and may require revision of nuclear theory. <i>Journal of Electroanalytical Chemistry</i> , v. 903, p. 115871, 2021. ISSN 1572-6657. doi: 10.1016/j.jelechem.2021.115871.
228	MILLS, R.; LU, Y.; FRAZER, R. Power determination and hydrino product characterization of ultra-low field ignition of hydrated silver shots. <i>Chinese Journal of Physics</i> , v. 56, n. 4, p. 1667-1717, 2018. Disponível em: <a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0577907317316088">https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0577907317316088</a> . Acesso em: 25 jun. 2023. DOI: <a href="https://doi.org/10.1016/j.cjph.2018.04.015">https://doi.org/10.1016/j.cjph.2018.04.015</a> .
229	MILLS, R. L. The hydrogen atom revisited. <i>International Journal of Hydrogen Energy</i> , v. 25, n. 12, p. 1171-1183, 2000. ISSN 0360-3199. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1016/S0360-3199(00)00035-5">https://doi.org/10.1016/S0360-3199(00)00035-5</a> . Acesso em: 30 ago. 2023.
230	CONRADS, H.; MILLS, R.; WRUBEL, Th. Emission in the Deep Vacuum Ultraviolet from a Plasma Formed by Incandescently Heating Hydrogen Gas with Trace Amounts of Potassium Carbonate. <i>Plasma Sources Science and Technology</i> , v. 12, p. 389-395, 2003. Acesso em: 25 jun. 2023.
231	MILLS, R.; YU, X.; LU, Y.; CHU, G.; HE, J.; LOTOSKI, J. Catalyst induced hydrino transition (CIHT) electrochemical cell. <i>International Journal of Energy Research</i> , v. 37, n. 13, p. 1743-1754, 2013. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1002/er.3142">https://doi.org/10.1002/er.3142</a> . Acesso em: 25 jun. 2023.
232	AKHTAR, K.; SCHARER, J.; MILLS, R. L. Substantial Doppler Broadening of Atomic Hydrogen Lines in DC and Capacitively Coupled RF Plasmas. <i>Journal of Physics D: Applied Physics</i> , v. 42, n. 13, 135207, 2009. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/13/135207">https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/13/135207</a> . Acesso em: 25 jun. 2023.
233	MILLS, R. L.; AKHTAR, K. Tests of Features of Field-Acceleration Models for the Extraordinary Selective H Balmer $\gamma$ Broadening in Certain Hydrogen Mixed Plasmas. <i>International Journal of Hydrogen Energy</i> , v. 34, n. 22, p. 6465-6477, 2009. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.09.080">https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.09.080</a> . Acesso em: 25 jun. 2023.
234	MILLS, R. L.; BOOKER, R.; LU, Y. Soft X-ray Continuum Radiation from Low-Energy Pinch Discharges of Hydrogen. <i>Journal of Plasma Physics</i> , v. 79, n. 2, p. 489-507, 2013. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1017/S0022377812001109">https://doi.org/10.1017/S0022377812001109</a> . Acesso em: 25 jun. 2023.
235	MILLS, R.; LOTOSKI, J.; GOOD, W.; HE, J. Solid Fuels that Form HOH Catalyst. <i>International Journal of Hydrogen Energy</i> , v. 39, n. 23, p. 11930-11944, 2014. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.05.170">https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.05.170</a> . Acesso em: 27 jun. 2023.
236	BRILLIANT LIGHT POWER". SUNCELL Steam Boiler. Disponível em: <a href="https://brilliantlightpower.com/suncell-steam-boiler-2/">https://brilliantlightpower.com/suncell-steam-boiler-2/</a> . Acesso em: 27 jun. 2023.
237	BRILLIANT LIGHT POWER. SunCell®. 2023. Disponível em: <a href="https://brilliantlightpower.com/suncell/">https://brilliantlightpower.com/suncell/</a> . Acesso em: 27 jun. 2023.
238	BRILLIANT LIGHT POWER. Apresentações de Negócios. 2023. Apresentação (PDF). Disponível em: <a href="https://brilliantlightpower.com/business/">https://brilliantlightpower.com/business/</a> . Acesso em: 27 jun. 2023.
239	CLEAN PLANET INC. QHe's heat density. [S. d.]. Disponível em: <a href="https://www.cleanplanet.co.jp/technology/">https://www.cleanplanet.co.jp/technology/</a> . Acesso em: 19 jun. 2023.
240	SAITO, M.; ITOH, T.; IWAMURA, Y.; MURAKAMI, S.; KASAGI, J. Elemental Analysis for Elucidation of the Anomalous Heat Generation Phenomena. In: 20th Meeting of Japan CF Research Society, JCF20,



	December 13-14, 2019. Fukuoka, Japan: [s.n.], 2019. p.74-85. Disponível em: <a href="https://www.cleanplanet.co.jp/technology/">https://www.cleanplanet.co.jp/technology/</a> . Acesso em: 19 jun. 2023.
241	ITOH, T.; SHIBASAKI, Y.; KASAGI, J.; MURAKAMI, S.; SAITO, M.; IWAMURA, Y. Optical Observation on Anomalous Heat Generation from Nano-sized Metal Composite. In: PROCEEDINGS OF THE 21ST MEETING OF JAPAN CF RESEARCH SOCIETY, JCF21, 11-12 dez. 2020. p. 15-25. Disponível em: <a href="https://www.cleanplanet.co.jp/technology/">https://www.cleanplanet.co.jp/technology/</a> . Acesso em: 19 jun. 2023.
242	IWAMURA, Y.; KASAGI, J.; ITOH, T.; TAKAHASHI, T.; SAITO, M.; SHIBASAKI, Y.; MURAKAMI, S. Progress in Energy Generation Research Using Nano-Metal With Hydrogen/Deuterium Gas. Journal of Condensed Matter Nuclear Science, [s.l.], v. 36, p. 285-301, 2022. Disponível em: <a href="https://www.cleanplanet.co.jp/technology/">https://www.cleanplanet.co.jp/technology/</a> . Acesso em: 19 jun. 2023.
243	IWAMURA, Y.; ITOH, T.; TAKAHASHI, T.; YAMAUCHI, S.; SAITO, M.; MURAKAMI, S.; KASAGI, J. Energy Generation using Nano-sized Multilayer Metal Composites with Hydrogen Gas; Intentional Induction of Heat Burst Phenomenon. In: 22nd Meeting of Japan CF Research Society, JCF22, March 5, 2022. [S.l.]: [s.n.], 2022. p.27-39. Disponível em: <a href="https://www.cleanplanet.co.jp/technology/">https://www.cleanplanet.co.jp/technology/</a> . Acesso em: 20 jun. 2023.
244	GODES, Robert George. Control of low energy nuclear reactions, hydrides, and autonomous heat. United States: US20140055106A1, 27 de fevereiro de 2014. Available at: <a href="https://patents.google.com/patent/US20140055106A1/">https://patents.google.com/patent/US20140055106A1/</a> . Acesso em: 20 jun. 2023.
245	BRILLOUIN ENERGY. Science & Technology. 2022. Disponível em: <a href="https://brillouinenergy.com/science-technology">https://brillouinenergy.com/science-technology</a> . Acesso em: 20 jun. 2023.
246	MOSIER-BOSS, P. A. et al. Condensed matter nuclear reaction products observed in Pd/D co-deposition experiments. Current Science, v. 108, n. 4, p. 656, 25 Feb. 2015.
247	BRILLOUIN ENERGY. Opportunity. 2022. Disponível em: <a href="https://brillouinenergy.com/opportunity">https://brillouinenergy.com/opportunity</a> . Acesso em: 20 jun. 2023.
248	BRILLOUIN ENERGY. Test Results. 2020. Disponível em: <a href="https://brillouinenergy.com/test-results">https://brillouinenergy.com/test-results</a> . Acesso em: 20 jun. 2023.
249	SARGOYTCHEV, Stoyan. Nickel-Hydrogen Cold Fusion by Intermediate Rydberg State of Hydrogen: Selection of the Isotopes for Energy Optimization and Radioactive Waste Minimization. The General Science Journal, [s. l.], v. 5, 25 jan. 2014. DOI: 10.46687/jsar.v5i1.106. Acesso em: 01 ago. 2023.
250	ROSSI, Andrea. E-Cat SK and long-range particle interactions. [S. l.], 24 jan. 2019. DOI: 10.13140/RG.2.2.28382.48966/11. Acesso em: 01 ago. 2023.
251	ROSSI, A. Method and apparatus for carrying out nickel and hydrogen exothermal reactions. U.S. Patent US20110005506A1. 2010. Disponível em: <a href="https://patents.google.com/patent/US20110005506A1/en">https://patents.google.com/patent/US20110005506A1/en</a> . Acesso em on: 01 ago, 2023.
252	BETTINI, G. How can 30% of nickel in Rossi's reactor be transmuted into copper? Journal of Nuclear Physics, [s.l.], 4 abr. 2011. Disponível em: <a href="https://www.journal-of-nuclear-physics.com/?p=473">https://www.journal-of-nuclear-physics.com/?p=473</a> . Acesso em: 01 ago. 2023.
253	LEVI, G.; FOSCHI, E.; HARTMAN, T.; HÖISTAD, B.; PETERSSON, R.; TEGNÉR, L.; ESSÉN, H. Indication of anomalous heat energy production in a reactor device containing hydrogen loaded nickel powder. Bologna: Bologna University, Uppsala: Uppsala University, Stockholm: Royal Institute of Technology, 2014. Disponível em: <a href="https://www.ecat.tech/sites/default/files/node-files/60/hot_cat_validation_report.pdf">https://www.ecat.tech/sites/default/files/node-files/60/hot_cat_validation_report.pdf</a> . Acesso em: 01 ago. 2023.
254	LEVI, G.; BIANCHINI; VILLA. Report on heat production during preliminary tests on the Rossi "Ni-H" reactor. 2011. Disponível em: <a href="https://www.ecat.tech/sites/default/files/node-files/60/levi_bianchini_and_villa_reports.pdf">https://www.ecat.tech/sites/default/files/node-files/60/levi_bianchini_and_villa_reports.pdf</a> . Acesso em: 01 ago. 2023.

255	ORDER ECAT PRODUCTS. Pre-Order E-Cat Products. 2023. Disponível em: <a href="https://ecatorders.com/pre-order-e-cat-products/">https://ecatorders.com/pre-order-e-cat-products/</a> . Acesso em: 1 ago. 2023.
256	FINANCIAL TIMES. The long-shot science that attracted Brad Pitt and Neil Woodford. Disponível em: <a href="https://www.ft.com/content/024cfc4a-8df6-11e9-a1c1-51bf8f989972">https://www.ft.com/content/024cfc4a-8df6-11e9-a1c1-51bf8f989972</a> . Acesso em: 1 ago. 2023. Publicado em: 14 jun. 2019.
257	OPEN CORPORATES. Industrial Heat, LLC. Disponível em: <a href="https://opencorporates.com/companies/us_de/5232221">https://opencorporates.com/companies/us_de/5232221</a> . Publicado em: 15 jun. 2022. Acesso em: 2 ago. 2023.
258	KRIVIT, Steven B. Andrea Rossi's E-Cat: Exposé of a Claimed Cold Fusion Device. New Energy Times, 8 de julho de 2016. Disponível em: < <a href="http://www.newenergytimes.com/v2/sr/RossiECat/Andrea-Rossi-Energy-Catalyzer-Investigation-Index.shtml">www.newenergytimes.com/v2/sr/RossiECat/Andrea-Rossi-Energy-Catalyzer-Investigation-Index.shtml</a> >. Acesso em: 2 ago. 2023.
259	FINANCIAL TIMES. The long-shot science that attracted Brad Pitt and Neil Woodford. Disponível em: <a href="https://www.ft.com/content/024cfc4a-8df6-11e9-a1c1-51bf8f989972">https://www.ft.com/content/024cfc4a-8df6-11e9-a1c1-51bf8f989972</a> . Acesso em: 1 ago. 2023. Publicado em: 14 jun. 2019.
260	KRIVIT, Steven B. Hacking the Atom: Explorations in Nuclear Research. Vol. 1. New Energy Times, 2016.
261	INDUSTRIAL HEAT, LLC patent filings. Disponível em: <a href="https://uspto.report/company/Industrial-Heat-L-L-C/patents">https://uspto.report/company/Industrial-Heat-L-L-C/patents</a> . Acesso em: 3 ago. 2023.
262	DAMERON, Thomas Barker; ROSSI, Andrea. Energy-producing reaction devices, systems, and related methods. United States: Industrial Heat, LLC, 2016. Patent application number 14/627828. Requerida em 20 fev. 2015. Disponível em: <a href="https://uspto.report/patent/app/20160051957">https://uspto.report/patent/app/20160051957</a> . Acesso em: 3 ago. 2023.
263	CRAVENS, Dennis. Methods for enhanced electrolytic loading of hydrogen. United States: Industrial Heat, LLC, 2022. Patente número 11,268,202. Protocolado em 8 de setembro de 2020, concedida em 8 de março de 2022. Disponível em: <a href="https://uspto.report/patent/grant/11,268,202">https://uspto.report/patent/grant/11,268,202</a> . Acesso em: 3 ago. 2023.
264	RAGHEB, Magdi. Nuclear marine propulsion. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2012. Disponível em: <a href="https://www.academia.edu/download/32853271/Nuclear_Marine_Propulsion.pdf">https://www.academia.edu/download/32853271/Nuclear_Marine_Propulsion.pdf</a> . Acesso em: 1 ago. 2023.
265	RAGHEB, Magdi. Nuclear naval propulsion. In: Nuclear Power-Deployment, Operation and Sustainability. IntechOpen, 2011. Disponível em: <a href="https://www.intechopen.com/chapters/19667">https://www.intechopen.com/chapters/19667</a> . Acesso em: 1 ago. 2023.
266	RAHMAN, Mohammad Mizanur et al. Design concepts of supercritical water-cooled reactor (SCWR) and nuclear marine vessel: A review. Progress in Nuclear Energy, v. 124, p. 103320, 2020. Disponível em: <a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0149197020300779">https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0149197020300779</a> . Acesso em: 29 jun. 2023.
267	SUTHARSHAN, B.; MUTYALA, M.; VIJUK, R. P.; MISHRA, A. The AP1000TM Reactor: Passive Safety and Modular Design. Energy Procedia, v. 7, p. 293-302, 2011. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.06.038. Acesso em: 29 jun. 2023
268	ALLIED MARKET RESEARCH. Nuclear Power Plant and Equipment Market Size, Share: Analysis 2030. 2023. Disponível em: <a href="https://www.alliedmarketresearch.com/nuclear-power-plant-and-equipment-market">https://www.alliedmarketresearch.com/nuclear-power-plant-and-equipment-market</a> . Acesso em: 3 ago. 2023.
269	MEDIUM. SpaceX vs. NASA: Cost. Disponível em: <a href="https://medium.com/geekculture/spacex-vs-nasa-cost-4fae454823ac">https://medium.com/geekculture/spacex-vs-nasa-cost-4fae454823ac</a> . Publicado em: 29 jul. 2022. Acesso em: 3 ago. 2023.
270	IFUSP - INSTITUTO DE FÍSICA DA USP. TCABR Tokamak Picture. Disponível em: <a href="http://www.fap.if.usp.br/~vannucci/TCABR.html">http://www.fap.if.usp.br/~vannucci/TCABR.html</a> . Acesso em: 3 ago. 2023.

---

---

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**  
Diretoria de Pesquisa, Desenvolvimento e Ensino  
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária CEP: 05508-000  
Fone/Fax(0XX11) 3133-8908  
SÃO PAULO – São Paulo – Brasil  
<http://www.ipen.br>

O IPEN é uma Autarquia vinculada à Secretaria de Desenvolvimento, associada à Universidade de São Paulo e gerida técnica e administrativamente pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, órgão do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações.

---

---