U.PORTO

FEP FACULDADE DE ECONOMIA UNIVERSIDADE DO PORTO

O potencial do tório como combustível nuclear na União Europeia: comparação com as tecnologias existentes dos aspetos económicos, ambientais e sociais

Eduardo Leite Pereira

Dissertação

Mestrado em Economia e Gestão do Ambiente

Orientado por

Susana Maria Almeida da Silva

Setembro 2026

Agradecimentos

Quem me conhece bem sabe que sou uma pessoa bastante cética, mas ao escrever este texto não consigo deixar de pensar na ironia do destino do tema que escolhi. Cresci como um rapaz das ciências e fascinado por Física, mas acabei por me licenciar em Línguas e Relações Internacionais e agora estou mais próximo do que nunca em obter um mestrado na área da Economia. Cruzam-se aqui as temáticas escolares e académicas que me moldaram na pessoa que sou hoje.

Queria começar por agradecer profusamente à professora Susana, por aceitar orientar-me neste processo, por ser paciente comigo e por me auxiliar sempre que necessitava.

Queria agradecer à minha mãe Cristina e ao meu pai Paulo por me terem dado as ferramentas necessárias para chegar onde cheguei academicamente, mas também por me amarem muito, por estarem sempre aqui para mim e por nunca me julgarem nas minhas escolhas. Sinto me privilegiado por ser vosso filho. Menciono também aqui o meu avô Joaquim que faleceu antes de ter começado a minha aventura académica, mas que sempre teve e terá um lugar especial no meu coração.

Presto agradecimentos aos membros da família que escolhi e que me escolheu. Obrigado ao Armando, ao Pedro, ao Simão e ao Tomás, e em especial ao Diogo e ao Nicolas com quem experienciei vividamente o secundário. Graças a vocês, consegui superar os momentos menos bons e celebrar os melhores, tanto dentro da minha vida escolar como fora dela.

Aproveito para agradecer também a todos os meus colegas do ensino básico, do secundário, da licenciatura e do mestrado, bem como alguns professores. Acredito que cada pessoa é a soma de toda as suas interações, e por isso aprecio cada conversa, cada debate, cada memória e cada experiência que me trouxeram a este preciso instante e a este desfecho da minha vida de estudante.

Resumo

O combate às alterações climáticas e ao aumento da temperatura global são de extrema importância para a Humanidade, sendo então vital eliminar as emissões de gases de efeito de estufa, especialmente na indústria da energia, responsável por mais de dois terços das emissões totais em 2024. Como o principal culpado destas emissões são os combustíveis fósseis, é importante descarbonizar e investirem em energia renovável geradora de eletricidade, sendo possível incluir a energia nuclear na transição energética. Contudo, esta energia tem uma má imagem pública devido aos acidentes históricos, ao armamento nuclear e aos resíduos nucleares.

Assim, procurou-se investigar o tório como alternativa ao urânio, e compreender as possíveis vantagens e desvantagens que este combustível nuclear traria a nível económico, ambiental e social dentro da União Europeia, de modo a compreender se poderá a longo prazo superar a tecnologia nuclear tradicional.

Neste trabalho, foi analisado o mix energético, os objetivos ambientais e o posicionamento da UE em relação à energia nuclear, de modo a compreender a visão europeia sobre a transição e segurança energéticas. De seguida, realizou-se um apreciamento do ciclo de urânio e ao reator mais predominante, e do ciclo de tório e a nova tecnologia nuclear mais adequada. Por último, realizou-se a comparação das duas.

Depois de analisada a literatura, conclui-se que o tório e os novos reatores têm em conjunto o potencial de melhorar substancialmente a sustentabilidade, a segurança e a competitividade da energia nuclear, e também a resistência à proliferação, apesar de existirem potenciais compromissos dentro deste tópico. Apesar de existirem barreiras associadas ao desenvolvimento, existem benefícios para a União Europeia investir e se desenvolver nesta tecnologia a longo prazo, considerando a importância de ter uma fonte de eletricidade que não seja intermitente e já que pode tanto substituir quanto criar sinergias com os reatores nucleares existentes.

Palavras-chave: Tório; Reatores a Sal Fundido; Transição Energética, União Europeia

Abstract

The fight against climate change and rising global temperature is of utmost importance for Humanity, so it is vital to eliminate greenhouse-gas emissions, especially in the energy industry, which accounted for more than two-thirds of total emissions in 2024. Since the main culprit of these emissions is the burning of fossil fuels, it is important to decarbonize and invest in electricity generated from renewable energy, with nuclear power being included in the energy transition. However, this energy has a bad public image due to historical accidents, nuclear weapons and nuclear waste.

Therefore, the aim was to investigate thorium as an alternative to uranium, and to understand the possible advantages and disadvantages that this new nuclear fuel would bring at an economic, environmental and social scale within the European Union, in order to understand whether it can surpass traditional nuclear technology in the long term.

In this work, the energy mix, environmental objectives and the EU's position on nuclear energy were analysed to comprehend the European vision on energy transition and security. Then, there was an appreciation of the uranium cycle and the most predominant reactor, and of the thorium cycle and the new nuclear technology most suitable for it. Finally, the comparison between the two was made.

After reviewing the literature, it was concluded that thorium and new reactors together have the potential to improve substantially the sustainability, safety and competitiveness of nuclear energy, as well as proliferation resistance, although there are potential associated trade-offs within this topic. Although there are barriers associated with development, there are benefits for the European Union to invest and develop in this technology in the long run, considering the importance of having a source of electric that is not intermittent and since it can both replace and synergise with existing nuclear reactors.

Keywords: Thorium; Molten Salt Reactors; Energy Transition; European Union

Índice

1. Introdução 1

1.1. Objetivos e Estrutura 3

2. Transição e Segurança Energéticas na União Europeia 5

2.1 Mix energético da União Europeia 6

2.2. Metas para a Transição Energética na União Europeia 7

2.3. Segurança Energética na União Europeia 9

2.4. Enquadramento da Energia Nuclear nos Objetivos da União Europeia 11

3. Ciclos e Tecnologias Nucleares 14

3.1. Classificação de Reatores e Ciclos de Combustível 14

3.2. Reação Nuclear do Combustível de Urânio 16

3.3. Urânio e a Tecnologia Nuclear Dominante 18

3.4. Reação Nuclear do Combustível de Tório 20

3.5. Tório e a Tecnologia Nuclear Experimental mais Adequada 21

4. Comparação dos Ciclos e Tecnologias Nucleares a nível Económico, Ambiental e Social 29

4.1. Mineração do Combustível 29

4.2. Conversão, Enriquecimento e Fabricação do Combustível 31

4.3. No Reator 32

4.3.1. Eficiência do Combustível 32

4.3.1.1. Temperatura, Eficiência Térmica e Aplicações do Calor 34

4.3.2. Segurança do Reator 35

4.3.2.1. Segurança no Reatore de Água Pressurizada 35

4.3.2.2. Segurança no Reator de Fluoreto de Tório Líquido 36

4.4. Minimização, Reprocessamento e Armazenamento dos Resíduos Nucleares 39

4.5. Proliferação Nuclear 43

4.6. Custo Normalizado da Eletricidade 44

5. Conclusão 47

Índice de figuras

Figura 1 - Transmutação de 238U em 239Pu (radioactivity.eu.com, 2020)……...…17

Figura 2 - Reator Shippingport a ser instalado (WNA, 2026d)……...19

Figura 3 - Diagrama de um PWR (Belyakov, 2019)……...19

Figura 4 - Transmutação de 232Th em 233U (Lee, 2018)……...21

Figura 5 - Diagrama da categorização dos MSR (IAEA, 2023)…….……..…….25

Figura 6 - Ilustração de um MSR de combustível líquido e moderado por grafite (U. S. Nuclear Energy Research Advisory Committee & Generation IV International Forum, 2002)……26

Figura 7 - Comparação da extração energética entre urânio num LWR e tório num LFTR (Juhasz, 2014, p. 28)……..……....32

Figura 8 - Comparação da produção de produtos de fissão entre um LWR e um LFTR (Hargraves & Moir, 2010)……40

Acrónimos e Siglas

ANP – *Aircraft Nuclear Propulsion*

EEA – Agência de Energia Europeia

GIF – *Generation IV International Forum*

IAEA – Agência Internacional de Energia Atómica

LCOE – Custo Normalizado da Eletricidade

LFTR – Reator de Fluoreto de Tório Líquido

LWR – Reator de Água Leve

MSR – Reator a Sal Fundido

MSRE – *Molten Salt Reactor Experiment*

Mtoe – Milhão de Toneladas de Petróleo equivalente

ORNL – Laboratório Nacional de Oak Ridge

Pa – Protactínio

Pu – Plutónio

PWR – Reator de Água Pressurizada

SMR – Reator Modular Pequeno

Th – Tório

U – Urânio

UE – União Europeia

UNEP – *United Nations Environment Programme*

UNFCCC – *United Nations Framework Convention on Climate Change*

WNA – *World Nuclear Association*

1. Introdução

A luta contra as alterações climáticas é um dos maiores desafios que a Humanidade tem vindo a enfrentar este século e concebivelmente em toda a sua existência. De modo a ser eficaz nesse combate, é necessário diminuir drasticamente a emissão de gases de efeito de estufa (GEE), especialmente na indústria da energia. 2024 foi um ano recorde para a quantidade de emissões de GEE, onde 57.7 Gt de CO_2e foram emitidas para a atmosfera, sendo que cerca de 69% dessas emissões estão associadas à indústria da energia, ainda bastante dominada pelo uso da principal fonte emissoras de GEE: os combustíveis fosseis (United Nations Environment Programme [UNEP], 2025).

Para este efeito, vários Estados-Nações estipularam objetivos ambientais de modo a reduzir e eliminar as emissões de GEE geradas pela atividade humana, a causa principal por detrás do desastre climático que a Humanidade está a moldar desde o início da Revolução Industrial.

No Acordo de Paris, divulgado em 2015 e assinado e ratificado em 2016, os países signatários concordaram em manter o aumento da temperatura global abaixo dos 2ºC abaixo dos níveis pré-industriais, além de continuar com os esforços para sustentar a temperatura mundial abaixo dos 1.5 °C em relação aos mesmos (United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC], 2015; United Nations Treaty Collection, s.d.).

A nível da União Europeia (UE), em 2019, foi apresentado o Pacto Ecológico Europeu, que visa ajudar no cumprimento dos alvos estabelecidos no acordo de Paris, ao delinear uma estratégia de crescimento verde que procura atingir zero emissões líquidas de GEE até 2050, isto é, atingir neutralidade carbónica (Comissão Europeia, 2019).

De modo a reverter o impacto negativo causado pelas emissões, é vital atingir os objetivos ambientais delineados pelos vários esforços multilateralistas. Por essa razão, é estritamente obrigatório revolucionar a maneira como a nossa sociedade está estruturada, especialmente no que toca ao consumo energético. Assim sendo, é fundamental descarbonizar, através da redução ou eliminação do uso de carvão, petróleo e gás natural (dependendo dos setores e das indústrias) e aumentando significativamente a geração, consumo e uso de eletricidade oriunda das restantes fontes de energia. É neste aspeto que a energia nuclear pode vir a ter um papel fundamental.

Fontes de energia renováveis, devido ao aumento do investimento e desenvolvimento nestas tecnologias, têm vindo a crescer substancialmente nas últimas décadas e os seus preços de energia têm se tornado cada vez mais competitivos com os das energias não renováveis. Porém, com a energia nuclear tal não é o caso, apesar de ser a fonte de energia que menos CO_2eq emite, além de ser também a segunda fonte de energia com menos mortes de acidentes e poluição do ar (Ritchie, 2020).

Sendo que a segurança energética e a transição energética são dois objetivos da UE que a indústria nuclear poderá ajudar a alcançar, ao assegurar a independência energética e uma fonte estável e não intermitente de produção de eletricidade, pode-se argumentar que revitalizar a indústria de energia nuclear é vital para assegurar a transição energética (Comissão Europeia, 2025, p.3). Segundo a Comissão Europeia (2022, p.2) a energia nuclear, apesar de não ser uma fonte de energia renovável, foi definido que, sob determinadas condições, contribui para a mitigação das alterações climáticas, visto que é quase livre de emissões de carbono, além de ter grande potencial para contribuir para a descarbonização da economia e para atingir os objetivos ambientais da UE.

No entanto, a má imagem publica da energia nuclear, devido principalmente aos desastres das centrais nucleares de Chernobil, em 1986, e Fukushima I, em 2011, mas também do armazenamento do lixo nuclear e da ameaça da produção e propagação de mais armamento nuclear, atrasou, parou ou até reverteu o crescimento e a expansão da indústria nuclear em muitos países.

Devido a este motivo, é importante investigar o desenvolvimento de alternativas dentro da esfera da energia nuclear que desafiem e alterem a perceção pública da energia nuclear. Os combustíveis nucleares predominantes são baseados em urânio (U). Esta utilização do urânio representa uma causa significativa dos variados desafios e aspetos negativos associados à indústria da energia nuclear. Porém, estes obstáculos podem ser mitigados ou ultrapassados como a utilização de outro elemento radioativo pouco explorado, o tório.

Identificado em 1829 pelo químico sueco Jöns Jacob Berzelius e denominado em honra ao deus nórdico do trovão, Thor, o tório (Th) é um elemento químico radioativo e metálico, que pertence ao grupo dos actinídeos (Marshal & Marshal, 2001). Segundo a Agência Internacional de Energia Atómica (em inglês *International Atomic Energy Agency*, IAEA) (2005),

este é 3 a 4 vezes mais abundante do que urânio; encontra-se amplamente distribuído pela natureza, sendo também a sua extração mais fácil; o lixo nuclear obtido tem uma radiotoxicidade baixa, além de potencialmente tais resíduos poderem ser reprocessados mais facilmente e apresenta maior resistência à proliferação nuclear (isto é, existe uma maior dificuldade em disseminar e desenvolver armas nucleares desenvolvidas com o ciclo de combustível de tório do que com o de urânio), maior taxa de combustão e ciclos de combustível mais longos.

1.1. Objetivos e Estrutura

Esta dissertação tem como propósito geral analisar a tecnologia nuclear baseada em tório com mais promessa, como uma alternativa ou complemento aos de urânio no setor nuclear, ao avaliar a sua viabilidade económica, como impacta o ambiente e como pode interagir a num nível social. Isto de modo a compreender o seu potencial em alcançar os objetivos da UE no que toca à descarbonização, eletrificação e segurança energética.

O objetivo principal será, de uma forma introdutória, entender como a tecnologia nuclear mais adequada para o ciclo de combustível de tório poderá impactar os pilares económico, ambiental e social, no contexto das necessidades da UE a longo prazo, comparativamente aos reatores nucleares mais comuns na UE.

A questão de investigação que então se coloca é: "*Quais as vantagens e desvantagens a nível económico, ambiental e social da implementação de reatores nucleares a tório na UE, em comparação com outras tecnologias nucleares?*"

Para procurar responder a esta questão, é necessário avaliar os impactos que todas as etapas do ciclo do combustível de tório terão e todas as etapas do ciclo de urânio têm, quer da sua exploração e mineração, quer na produção de energia, quer na cadeia de distribuição, etc, de modo a corretamente averiguar se tal fonte de energia poderá ter um papel significativo na descarbonização, transição energética e na mitigação da dependência energética da UE, de modo a comparar de modo eficaz com os reatores e geradores já existentes e a ser construídos.

Posto isto, a metodologia empregada foi a investigação exploratória descritiva, visto que não existe uma possibilidade de obter dados primários devido à natureza do tema, e a tese foi estruturada da seguinte forma:

- O capítulo 1 serve como o capítulo introdutório à temática da dissertação, aos objetivos desta e a sua estruturação.
- No capítulo 2, expõem-se o perfil do consumo energético e as metas ambientais para a descarbonização e eletrificação da UE, além da vulnerabilidade do sistema atual energético europeu. Discute-se ainda o enquadramento atual da energia nuclear na UE, ao enumerar as vantagens da energia nuclear para a transição e segurança energéticas europeia e a exibir a ótica dos decisores políticos sobre esta fonte de energia;
- O capítulo 3 É sobre os ciclos e tecnologias nucleares a ser comparados. Será descrita a história, a categorização e o funcionamento de cada reator, em conjunção com uma descrição básica da reação ao nível partículas que compõem o combustível utilizados nesses reatores;
- No capítulo 4 abrange a comparação económica, ambiental e social dos ciclos de combustível e das respetivas tecnologias nucleares. Será analisado as etapas da mineração e fabricação do combustível, os níveis de eficiência e de segurança de cada reator, a gestão dos resíduos nucleares obtidos, a resistência à proliferação e os custos associados ao ciclo de vida de cada central nuclear;
- O capítulo 5 contem a conclusão da dissertação.

2. Transição e Segurança Energéticas na União Europeia

Como dito anteriormente, a luta contra as alterações climáticas constitui uma emergência que obriga a um esforço entre todos os governos mundiais, incluindo os membros da União Europeia. Este fenómeno da mudança dos padrões climáticos atribui-se diretamente ao crescimento acelerado da temperatura global, causado por atividades humanas. A forma mais eficiente de combate ao aquecimento global é através da redução e a captação das emissões de GEE, como o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O), ao ponto de chegarem a, pelo menos, zero emissões líquidas, efetivamente eliminando as emissões de GEE e os seus impactos no ambiente. Além disso, o uso de energia é historicamente responsável pela maior porção das emissões de GEE. A nível mundial, em 2024, cerca de 69% das emissões de GEE advieram do setor da energia. (UNEP, 2025), e na UE, em 2023, o uso de combustíveis nos transportes teve o maior *share* de emissões de GEE, rondando os 30%. Quando combinado com o uso de combustíveis por utilizadores fora do setor dos transportes (26%) e com o setor das indústrias produtoras de energia (24%), estas atividades são responsáveis por cerca de 80% das emissões (Eurostat, 2026).

Exposta esta informação, fica aparente a necessidade de descarbonizar, ao reduzir drasticamente o uso de combustíveis fosseis que são a principal fonte de emissões, e eletrificar o sistema energético, de modo a permitir o uso generalizado de eletricidade proveniente de fontes de baixo carbono, como as renováveis e a energia nuclear.

Nesse intuito, este capítulo serve para primeiramente compreender o mix energético atual da EU, através da análise da:

- energia primária, produção de energia dentro dos territórios do bloco europeu e das importações energéticas;
- energia final, os tipos de energia consumidos e a geração de eletricidade por fonte de energia.

Após averiguar-se o panorama atual da energia, analisam-se os objetivos ambientais, já anunciados pelos decisores e órgãos políticos da EU, que se alinham com a descarbonização o setor de energia na UE e eletrificação da sociedade europeia. Ademais, será analisada a dependência energética da EU.

Por fim, explora-se como a energia nuclear se poderá enquadrar no futuro do sistema energético europeu, ao enumerar as vantagens únicas da energia nuclear, no contexto da transição energética e na segurança energética, e como os órgãos políticos europeus se posicionam atualmente em relação ao papel da energia nuclear em alcançar estes dois objetivos políticos da UE.

2.1 Mix energético da União Europeia

A energia primária representa a energia necessária para satisfazer as necessidades de um país ou região, dentro do seu território, e calcula-se ao somar a produção de energia com as importações e as mudanças nos *stocks*, excluindo as exportações e os *bunkers* internacionais marítimos e de aviação. Segundo o Eurostat (2026), em 2024, o consumo de energia primária na UE atingiu um total de 1193.7 milhões de toneladas de petróleo equivalentes (Mtoe), sendo que o petróleo bruto e os produtos de petróleo representaram cerca de 38% do *share* do consumo de energia primária, o gás natural outros 21% seguido das fontes de energias renováveis com 20%, o calor gerado pela energia nuclear com 12% e os combustíveis sólidos, como o carvão, a turfa e produtos à base de turfa com 10%.

Na estrita averiguação da produção de energia dentro do território da UE, as energias renováveis foram as fontes que mais contribuíram para a produção energética dentro do território, com uma percentagem de 48.1%. A energia produzida nas centrais nucleares são a segunda maior fonte de produção energética no território da União, com 28.2%, seguida dos combustíveis sólidos, gás natural e petróleo bruto com 15.2%, 5.1% e 3.3%, respetivamente.

A energia final reflete a energia que, depois de transformada, é usada pelos consumidores finais, como o uso doméstico, as indústrias e os transportes. No cálculo exclui-se da energia primária total as perdas na transformação e distribuição, além do consumo do próprio setor de energia. A produção de energia final na UE, em 2024, atingiu um total de 900.4 Mtoe (Eurostat, 2026). No ano de 2024, cerca de 66% da energia primária foi consumida pelos consumidores finais, sendo que os restantes 34% foram usados durante os processos de produção de energia, perdidos durante a transformação e distribuição de energia ou consumidos para usos não energéticos, como a produção de asfalto. Dentro desses 66%, os produtos de petróleo representaram cerca de 37% do consumo de energia final, a eletricidade

representou 23%, o gás natural ou gás manufaturado 20%, o uso direto de renováveis (não transformadas em eletricidade) 12%, o calor derivado 5% e os combustíveis sólidos 2% (Eurostat, 2026).

Em relação aos 23% de eletricidade, cerca de 48% advieram de fontes renováveis, 28.2% de combustíveis fósseis e das centrais nucleares 23.3%. Entre as fontes renováveis, o maior *share* de eletricidade tem origem eólica com 17.5%, seguido de energia hidríca (13.2%), energia solar (11%) e biocombustíveis (5.6%). Outras fontes renováveis não mencionadas representaram 1.1% (Eurostat, 2026).

Em relação aos consumos de energia final dos diferentes setores da economia da UE, o setor dos transportes, em 2024, representou 31% do consumido de energia final, com o transporte rodoviário (principalmente carros e vans) representando quase toda o *share*. Para os restantes setores, o setor doméstico verificou-se em 27% do consumo da energia final, o da indústria em 25%, o dos serviços comerciais e públicos e 13% e por fim o da agricultura, silvicultura e pesca em 3% (Eurostat, 2026).

2.2. Metas para a Transição Energética na União Europeia

Descarbonização define-se como o processo de reduzir ou parar a emissão de GEE, principalmente o CO_2, para a atmosfera**.** Assim sendo, os planos de descarbonização na UE focam-se no controlo destas emissões, através de certas medidas, leis e instrumentos ambientais e energéticos.

As metas ambientais são fundamentais para a transição energética, visto que atuam como o objetivo a ser alcançado. Sob o artigo 3º do Acordo de Paris, já mencionado no capítulo introdutório, os países signatários comprometeram-se a desenvolver e comunicar as suas próprias metas para redução de emissões de GEE, denominadas de contribuições determinadas nacionalmente (CDN). No caso da UE, a meta escolhida como CDN foi a redução das emissões em pelo menos 40% até 2030. (UNFCCC, 2015). Em dezembro de 2020, a CDN europeia foi atualizada, com um novo compromisso em reduzir as emissões em pelo menos 55%, em vez dos 40% determinados 4 anos antes, que foi vinculado legalmente em outubro de 2023 com o pacote legislativo '*Fit for 55'* (Erbach, 2025). Mais recentemente, em novembro de 2025, a CDN foi atualizada mais uma vez, ao introduzir uma contribuição indicativa de uma redução de emissões entre 66.25% e 72.5% até 2035. Este

intervalo foi baseado em trajetórias lineares dos objetivos ambientais europeus para 2030, 2040 e 2050. Os objetivos de 2040 foram decididos numa emenda à Lei Climática Europeia ocorrida em julho de 2025, onde se definiu uma meta obrigatória de redução dos GEE em pelo menos 90% até 2040. Por fim, os objetivos de 2050 são baseados no *net-zero* do Pacote Ecológico Europeu, já mencionado no capítulo introdutório desta dissertação. Todas as metas de redução de emissões de GEE mencionadas têm como valor comparativo os níveis de emissões de GEE em 1990 (UNFCCC, 2025).

Porém, para garantir uma transição energética com sucesso, é necessário implementar outras medidas além da vinculação de objetivos ambientais na lei da UE. Por exemplo, instrumentos ambientais, como o *European Union Emission Trading System* (EU-ETS), um sistema de *carbon pricing* onde empresas podem comprar e vender entre si licenças que representam a emissão de 1 tonelada de CO_2, e o *Carbon Border Adjustment Mechanism* (CBAM), para combater a realocação das emissões da indústria europeia para fora do território da UE, contribuem significativamente para a mitigação das alterações climáticas, para atingir as metas climáticas e para a produção limpa na UE. Projeções dos Estados-Membros indicam que a reduções de emissões de GEE, nos setores abrangidos pelo EU-ETS, representa atualmente o principal fator contribuidor para a realização das metas climáticas da UE para 2030 (European Energy Agency [EEA], 2026a).

Ademais, políticas energéticas são igualmente importantes para atingir os objetivos ambientais ambiciosos da UE, ao reduzir a pressão ambiental correlacionada com as atividades associadas ao setor da energia. A Diretiva de Eficiência Energética Europeia, originalmente criada em 2012, foi revista em 2023 de modo a alinhar a antiga meta de redução do consumo energético com o novo quadro de políticas climáticas da UE. Na nova Diretiva, tem-se como um alvo energético indicativo de consumo de energia primária de 992.5 Mtoe e um alvo energético obrigatório do consumo de energia final de 763 Mtoe, ambos para 2030 (EEA, 2026b). Em 2024, os valores da energia primária e da energia final foram, respetivamente, 1193.7 e 990.4 Mtoe. De modo a atingir os valores de 2030, é necessário um decréscimo do consumo energético primário de 201.2 Mtoe e um decréscimo do consumo energético final de 227.4 Mtoe. Em termos percentuais, isto equivale a um decréscimo de cerca de 16,85% para a energia primária e um decréscimo de cerca de 22,96% para a energia final. Segundo a Agência de Energia Europeia (EEA) (2026b), se não houver uma mudança

significativa nos padrões de consumo energético, não se atingirão os objetivos de consumo energético propostos para 2030.

Juntamente com a descarbonização, a eletrificação é central na transição energética. A eletrificação pode ser definida como o processo de substituição de tecnologias e processos industriais baseados em combustíveis fósseis por outros que utilizem eletricidade gerada por fontes de energia de baixo carbono, as renováveis e a nuclear. De uma certa forma, representa um aumento dos *shares* das fontes de baixo carbono no consumo da energia primária e da eletricidade no consumo de energia final. Neste sentido, foi apresentado em julho de 2026 o Plano de Ação de Eletrificação pela Comissão Europeia, que visa tornar a Europa no primeiro continente alimentado maioritariamente por eletricidade. Foi proposto um novo objetivo não vinculativo: pretende-se que a eletricidade atinga um *share* de 46% no consumo de energia final, até 2040. Para esse efeito, a Comissão pretende tornar a eletricidade uma fonte mais atraente de energia para indústrias e famílias, ao tornar os preços de eletricidade competitivos com os do gás natural e outros combustíveis fósseis (Comissão Europeia, 2026).

Para atingir estas metas ambientais e energéticas específicos à UE, é vital assegurar não só a descarbonização do setor de energia, ao diminuir o uso de combustíveis fosseis e ao aumentar o uso de fontes energéticas de baixo carbono, como também assegurar a eletrificação da economia e da sociedade, ao diminuir uso direto de combustíveis e ao aumentar a geração de eletricidade e calor proveniente de fontes renováveis e energia nuclear.

2.3. Segurança Energética na União Europeia

No subcapítulo anterior foram sobretudo analisadas a descarbonização e a eletrificação do sistema energético da UE. No entanto, estes dois processos centrais para a transição energética da UE, além de trazerem benefícios ambientais e energéticos, também contribuem fortemente para a segurança energética da região.

A EEA define segurança energética como a disponibilidade permanente de energia diversificada, em quantidades suficientes e a preços acessíveis e razoáveis (Szydło, 2025, p.4). No entanto, a UE encontra-se energeticamente dependente de países fora do território da união. A dependência energética calcula-se ao dividir as importações líquidas (a diferença entre as importações e exportações brutas) com a oferta total de energia primária, que

representa a quantidade de energia capaz de satisfazer as necessidades energéticas de um país ou região. Este rácio reflete o nível de dependência das importações no que toca ao consumo energético. Historicamente, a UE tem apresentado uma tendência crescente da dependência energética. Segundo o Eurostat (2025a), entre 1990 e 2005 a dependência energética da região aumentou de 50% para cerca de 57%, e entre 2005 e 2023 esse nível tem se mantido entre 56% e 60%, sendo que no ano de 2023 58.4% da energia consumida no território europeu foi importada. Em 2024, a UE importou 57% da sua energia, dos quais as principais importações foram petróleo bruto e produtos de petróleo (67%) e gás natural (24%) (Eurostat, 2026). Esta fragilidade energética veio a ser acentuada com a invasão da Ucrânia pela Rússia, em 2022, que impactou os preços do gás natural e a nova crise no Médio Oriente que afetou o preço do petróleo e produtos derivados.

Esta dependência em combustíveis fósseis por parte da UE é considerada não só uma questão de urgência ambiental, como também uma questão de soberania. Desta forma, torna-se vital desenvolver de forma radical a procura de energia eletrificada, habilitado pela geração de energia limpa e acessível e por ganhos de eficiência energética (Comissão Europeia, 2026). É nesta vertente que as energias renováveis se tornam essenciais, sendo que estão associados baixos níveis de emissão de GEE ao seu ciclo de vida e permitem os maiores ganhos de eficiência na produção de eletricidade.

A indústria da energia nuclear poderá também ajudar a alcançar os objetivos da segurança energética, da descarbonização e da eletrificação, ao auxiliar no alívio da dependência energética (Comissão Europeia, 2025), ao ter um impacto positivo e significativo na redução das emissões de GEE (Wojciechowski et. al, 2023) e ao ser uma fonte estável de eletricidade. Contudo, no que toca ao urânio utilizado nas centrais nucleares, a UE também tem uma grande independência das suas importações. Apesar da energia nuclear utilizada pelos países da UE serem produzidas internamente, como é o caso da França, o urânio utilizado nestas centrais nucleares tem origem exterior. Em 2025, nenhum do urânio utilizado pelos países da UE teve origem interna, sendo que os quatro países com maior percentagem do urânio importado foram o Canadá (com 36.68%), o Cazaquistão (com 20.31%), a Rússia (com 15.98%) e o Uzbequistão (com 10.37%) (Euratom Supply Agency, 2026). De facto, isto representa uma nova falha da segurança energética, mesmo que não seja tão impactante como a dependência dos combustíveis fósseis.

2.4. Enquadramento da Energia Nuclear nos Objetivos da União Europeia

A energia nuclear, utilizada para gerar eletricidade ou calor, não só é a fonte de energia que menos GEE emite (6 toneladas de CO_2e por GWh ao longo do ciclo de vida de uma central de energia) (Ritchie, 2020), como também é a que tem a segunda menor quantidade de acidentes e mortes, por unidade de eletricidade gerada, atrás da energia solar, mesmo quando incluindo as mortes dos desastres nucleares de Chernobil e Fukushima I (Ritchie, 2020). A energia nuclear apresenta o menor rácio entre eletricidade gerada e terreno usado entre todas as fontes energéticas, ou seja, para a mesma área, a energia gerada nas centrais nucleares é superior em quantidade (Ritchie, 2022). A alta densidade energética dos combustíveis nucleares é significativamente superior em comparação com as restantes fontes de energia, tornando o seu transporte mais fácil e mais barato. Só 1 quilograma de urânio natural contêm cerca de 20 mil vezes mais energia que 1 quilograma de carvão (World Nuclear Association [WNA], 2026a). Algo que também torna as centrais nucleares ideias para gerar energia é a sua elevada capacidade produtiva, em relação às restantes fontes de energia. A *Nuclear Regulatory Comission* (2021) define a capacidade produtiva como o rácio entre a eletricidade produzida num certo espaço de tempo, usualmente 1 ano, e o máximo teórico de energia elétrica gerada no mesmo espaço temporal. Desde 2000, a capacidade produtiva das centrais nucleares ronda os 80% a nível mundial (WNA, 2025a). Por si só, estas características tornam a indústria nuclear mais atrativa para investidores e decisores políticos, sendo sinergéticas com os objetivos de soberania energética, da neutralidade carbónica e da diversificação de fontes de energia na UE (Comissão Europeia, 2025). Porém, a vantagem mais essencial associada à geração da energia nuclear é a sua não-intermitência, quando comparada com as fontes renováveis. A produção de eletricidade independente das condições meteorológicas e da altura do dia é importante para um futuro eletrificado, sendo importante como uma energia de carga de base (Pioro, 2020). Estes benefícios da energia nuclear têm sido considerados pelos órgãos políticos da UE, já que nos últimos anos se tem observado uma mudança da perspetiva da energia nuclear dentro da esfera política europeia.

No Regulamento Delegado (UE) 2022/1214, a energia nuclear, apesar de não ser uma fonte de energia renovável, pode ser considerada sustentável, sob determinados critérios estritos, por ter quase zero emissões de GEE ao longo do ciclo de vida da atividade nuclear, tendo sido reconhecido o seu potencial para a descarbonização da economia e para os objetivos da mitigação das alterações climáticas. Ademais, foi reconhecido que a energia nuclear facilita a

implantação das fontes renováveis intermitentes, não prejudicando o seu desenvolvimento, ao proporcionar abastecimento de energia de carga de base estável, reduzindo a dependência de fontes externas de energia e diversificando o mix energético (Comissão Europeia, 2022, pp. 2-3). Foi demonstrado também um interesse em novos tipos de reatores nucleares (reatores de Geração IV) que, além de potencialmente contribuírem para o objetivo de descarbonização, minimizariam a produção de resíduos radioativos (Comissão Europeia, 2022, p. 3). Esta decisão foi tomada poucos meses depois do início da invasão da Ucrânia por parte da Federação Russa em 2022, um evento que fragilizou bastante o cenário energético na Europa. Por essa razão, a UE passou a reconhecer mais explicitamente o papel da energia nuclear na sua estratégia de autonomia energética.

No entanto, esta classificação da energia nuclear como sustentável tem um precedente ao início da guerra Russo-Ucrânia. O *Joint Research Centre* (JRC) em 2021 publicou a sua investigação da energia nuclear em relação ao cumprimento dos objetivos impostos pela Taxonomia da UE. Segundo o JRC, as atividades económicas relacionadas com a energia nuclear cumprem os objetivos ambientais da Taxonomia Europeia (Abousahl et. al, 2021). De acordo com o Regulamento UE 2020/852, conhecido como o Regulamento da Taxonomia, que estabeleceu o quadro legal que determina quais atividades económicas podem ser consideradas ambientalmente sustentáveis, tal atividade económica tem de cumprir os critérios definidos no capítulo II, artigo 3º, sendo os mais importantes (Comissão Europeia, 2020, p.15):

a) contribuir substancialmente para um ou mais dos seis objetivos ambientais;
b) não prejudicar significativamente (DNSH, *do no significant harm*) nenhum dos objetivos ambientais estabelecidos.

Os objetivos ambientais referidos encontram-se enumerados no capítulo II, artigo 9º, e são aqui enumerados (Comissão Europeia, 2020, p. 17).

a) A mitigação das alterações climáticas;
b) A adaptação às alterações climáticas;
c) A utilização sustentável e proteção dos recursos hídricos e marinhos;
d) A transição para uma economia circular;
e) A prevenção e o controlo da poluição;
f) A proteção e o restauro da biodiversidade e dos ecossistemas.

No relatório do JRC foi concluído que a energia nuclear cumpre todos os objetivos ambientais, de acordo com o critério DNSH. Em relação ao critério a), cumpre pelo menos o objetivo de "mitigação das alterações climáticas" de forma substancial, ao funcionar como uma tecnologia de carga de base, representando uma forte sinergia com as fontes de energias renováveis intermitentes. Este relatório foi posteriormente revisto pelo *Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks* (SCHEER), a pedido da Comissão Europeia, para obter uma opinião independente sobre as conclusões obtidas e recomendações sugeridas no relatório do JRC, tendo reconhecido que estas são geralmente abrangentes, no que toca ao critério de DNSH (Abousahl et. al, 2021; SCHEER, 2021).

Num relatório do Parlamento Europeu de 2025, foi discutido que o desenvolvimento da energia nuclear continua a ser uma prerrogativa nacional no quadro legal da UE, sendo que vários Estados-Membros têm demonstrado crescente interesse e empenho em desenvolver a sua indústria nuclear para satisfazer as suas necessidades energéticas. Além disso, foi comunicado que o papel da energia nuclear tem de ser reavaliado, sendo que tem um papel importante num sistema energético onde as *shares* de renováveis no mix energético estão a aumentar, ao funcionar com uma fonte de energia de carga de base e ao diversificar as fontes de geração de eletricidade (Szydło, 2025).

Porém, foi também salientado que vários Estados-Membros creem necessário o desenvolvimento e implementação de ambas as tecnologias nucleares existentes e as em fases experimentais, para garantir competitividade tecnológica e autonomia estratégica na EU. Ademais, enfatizou-se uma dependência em exportadores estrangeiros para o abastecimento de urânio natural na UE, havendo uma necessidade em diversificar não só as fontes de urânio, como a de outros combustíveis nucleares (Szydło, 2025).

É certo que existe interesse em novas tecnologias e ciclos de combustíveis nucleares na UE. Por estes motivos, será realizada no próximo capítulo uma análise do tório e da tecnologia nuclear mais adjacente ao seu ciclo nuclear, juntamente com o ciclo de urânio e os reatores nucleares mais dominantes na UE.

3. Ciclos e Tecnologias Nucleares

No capítulo anterior, foram mencionadas as vantagens da energia nuclear. Todavia, também tem pontos de contenção, desde a longevidade e radiotoxicidade do lixo nuclear, aos acidentes nucleares e à proliferação nuclear. É nesta vertente que o tório pode ter um papel importante em atenuar ou ultrapassar estas barreiras associadas à energia nuclear na atualidade. Assim sendo, neste capítulo irei realçar as reações do combustível e as tecnologias nucleares associados ao urânio e ao tório, respetivamente, de modo a poder fazer a comparação a nível económico, ambiental e social no capítulo 4.

3.1. Classificação de Reatores e Ciclos de Combustível

A energia nuclear é a energia libertada através de reações nos núcleos de átomos, sendo que pode originar de dois processos diferente. Tal energia pode ser obtida através da fissão nuclear, onde um átomo instável e pesado é atingido por um neutrão e dividido em elementos mais pequenos, libertando uma grande quantidade de energia, ou através do processo de fusão nuclear, onde dois átomos pequenos, como hidrogénio, se unem, criando átomos mais pesados e libertando ainda mais energia. Este é o processo que ocorre constantemente no Sol e em outras estrelas. Atualmente, todos os reatores em operação são reatores de fissão. Com isto em mente, todos os conceitos e ideias analisados daqui para a frente são sempre no contexto dos reatores de fissão nuclear.

Dependendo do seu propósito, reatores podem ser categorizados como de potência ou de pesquisa. Os reatores de potência têm como objetivo principal a geração de eletricidade, mas também podem ser usados para propósitos, como a geração de calor ou água quente para aquecimento urbano. Os reatores de pesquisa servem para gerar neutrões para diversos objetivos, como estudos científicos, testes de materiais e equipamentos medicinais (Belyakov, 2019). Dependem também do modo de operação, mais especificamente da velocidade dos neutrões quando são absorvidos pelo material físsil. Se forem reatores térmicos (ou lentos), os neutrões são lentos e foram abrandados por um moderador. Se forem reatores rápidos, não existe moderador, sendo que os neutrões nunca são artificialmente desacelerados. Os reatores podem também ser epitérmicos (ou intermédios), quando os neutrões têm a sua velocidade reduzida a níveis intermédios aos térmicos e rápidos (Belyakov, 2019). Reatores também são classificados pela forma que o combustível está organizado e distribuído em relação ao moderador ou fluido de refrigeração. Reatores são considerados homogéneos

quando o combustível está disperso no moderador ou fluido de refrigeração, e são considerados heterogéneos quando o combustível não se encontra misturado dentro do moderador e/ou fluido de refrigeração (Belyakov, 2019; IAEA, 2023).

Os reatores também podem ser divididos entre as suas gerações de desenvolvimento. Contemporaneamente, são consideradas 4 gerações de reatores. *Generation I* (GEN I) foram desenvolvidos entre 1950 e 1960, sendo que o último foi encerrado em 2015. Eram os protótipos iniciais e usavam sobretudo urânio natural como combustível e grafite como moderador, e tinham baixas capacidades, por volta dos 50 MW (Belyakov, 2019; WNA, 2026c). *Generation II* (GEN II) são reatores de potência comerciais que rondam as centenas de megawatts de potencia, e podem chegar a 1.2 GWe. Usam tipicamente urânio enriquecido como combustível e, na sua maioria, água para arrefecimento e moderação. Estes reatores foram desenvolvidos entre 1970 e 1990, e construídos para estarem operacionais durante 30 a 40 anos, mas com possibilidade de extensão de vida. A maioria dos reatores ainda operacionais a nível mundial pertencem a esta geração (Belyakov, 2019; WNA, 2026c). Os reatores da *Generation III* (GEN III) resultaram da evolução dos reatores da GEN II, especialmente das tecnologias de Reator de Água Leve (em inglês, *Light Water Reactor*, LWR), tendo a sua vida útil estendida e o seu desempenho melhorado. Foram desenvolvidos e implementados entre 1990 e 2010, com melhores desempenhos, segurança mais avançada e uma vida útil maior que os da geração anterior, sendo que não há uma distinção evidente entre estas duas gerações de reatores (Belyakov, 2019; WNA, 2026c). A *Generation IV* (GEN IV) representa todos os novos *designs* de reatores inovadores, desenhados de forma a terem até 60 anos de vida útil, e com foco em melhorar ainda mais os sistemas de segurança existentes, em resistir à proliferação nuclear e minimizar a produção e o nível de radiação dos resíduos nucleares (Belyakov, 2019). Por isso, a maioria destes reatores tendem a ter ciclos fechados para poder consumir mais do combustível usado e irradiado, deixando só os produtos de fissão como os resíduos de alto nível (WNA, 2026c).

Os vários tipos de reatores em comercialização, excluindo-se os da GEN IV, são (Belyakov, 2019; WNA, 2026c):

- *Light Water Reactor* (LWR):
    - *Presurized Water Reactor* (PWR)
    - *Boiling Water Reactor* (BWR)
    - *Light Water cooled, Graphite-moderated Reactor* (LWGR)

- *Pressurized Heavy Water Reactor* (PHWR)
- *Gas-Cooled Reactor/Advanced Gas-cooled Reactor* (CGR/AGR)
- *Fast Breeder Reactor/Fast Neutron Reactor* (FBR/FNR)

O ciclo de combustível nuclear, também conhecido como cadeia do combustível nuclear, pode ser diferenciado entre ciclo aberto e ciclo fechado. Num ciclo aberto (ou *once-through*), o combustível, depois de utilizado, é logo considerado resíduo nuclear e é armazenado provisoriamente e futuramente descartado, em locais geologicamente estáveis, onde ficaram permanentemente e de forma segura guardados. Quando tal combustível é reciclado, temos um ciclo fechado. Primeiramente, o combustível é reprocessado, separando os isótopos úteis de tório, urânio ou plutónio, dos restantes actinídeos e dos produtos de fissão. De seguida, o material reprocessado é reintegrado e reutilizado como novo combustível (Netter, 2012).

O *front-end* do ciclo é a fase inicial, antes da irradiação. Durante esta fase, prepara-se o combustível para ser usado no reator nuclear, com as etapas da mineração e da moagem, da conversão, do enriquecimento e da fabricação do combustível. O *back-end* é a fase final do ciclo, depois da irradiação do combustível. Nesta fase maneja-se o combustível utilizado, estando incluídas as etapas do armazenamento temporário do combustível irradiado, do reprocessamento e reciclagem (no caso do ciclo fechado) e por fim o armazenamento permanentemente dos resíduos nucleares (WNA, 2025c).

3.2. Reação Nuclear do Combustível de Urânio

O urânio (U) é o elemento químico e radioativo que possui 92 protões, o determinante do número atómico na tabela periódica. Na natureza, pode-se encontrar três isótopos diferentes de U. Isótopos são elementos que contêm o mesmo número de protões no núcleo do átomo (mesmo número atómico), mas têm um número diferente de neutrões no núcleo (massa atómica diferente). A abundância isotópica do U natural encontra-se distribuída da seguinte forma (Meija et. al, 2016):

- 99,3% é ^{238}U;
- 0,7% é ^{235}U;
- 0,005% é ^{234}U.

No contexto da geração de energia nuclear comercial, só os isótopos de ^{235}U e ^{238}U interessam. Para iniciar o processo de fissão, é necessário um núcleo físsil capaz de sustentar uma reação em cadeia depois de absorver principalmente neutrões térmicos/lentos (Nuclear Regulatory Comission, 2026b). Dos isótopos naturais de U, só o ^{235}U é um nuclídeo físsil.

O processo de fissão de ^{235}U começa com a absorção de um neutrão termal pelo núcleo do átomo, tornando-se num novo isótopo: ^{236}U. O átomo de ^{236}U fissiona e separa-se em produtos de fissão (geralmente dois elementos mais leves) e libertando no processo 2 ou 3 neutrões (dependendo dos elementos obtidos pós-fissão) e energia em forma de radiação gama. Devido à baixa abundância de ^{235}U, durante a preparação do combustível nuclear é necessário enriquecer o urânio. O processo de enriquecimento é, fundamentalmente, a separação de isótopos com o objetivo de concentrar mais do isótopo desejado em relação aos restantes. A maioria dos reatores comerciais precisam de uma concentração de ^{235}U entre 3 a 5%, sendo a restante percentagem correspondente a ^{238}U. Urânio a este nível de concentração é denominado de urânio fracamente enriquecido (*low-enriched uranium* em inglês, LEU).

No entanto, os restantes 95 a 97% do combustível correspondente a ^{238}U tem ainda um papel na transmutação de urânio em plutónio (Pu), denominada do ciclo de *breeding* U-Pu. O ^{238}U, apesar de não poder entrar em fissão com neutrões térmicos, pode ser convertido em um material físsil ao ser irradiado num reator visto que é um material fértil (Nuclear Regulatory Comission, 2026a).

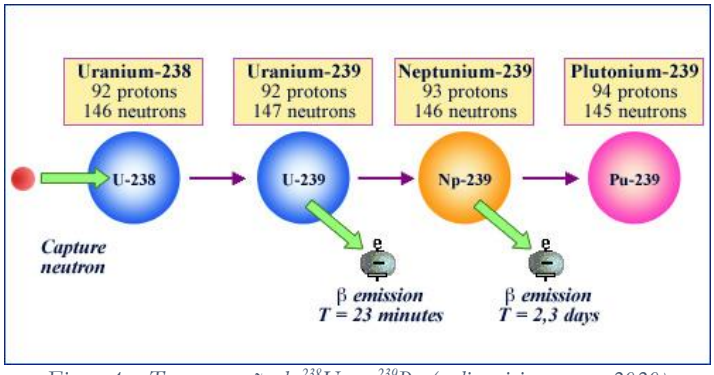


Figura 1 – Transmutação de ^{238}U em ^{239}Pu (radioactivity.eu.com, 2020)

Como pode ser observado na imagem em cima, o ^{238}U ao absorver um neutrão (n) torna-se em ^{239}U. O ^{239}U rapidamente sofre uma radiação beta-menos (β^-)[1] num espaço de 23 minutos,

[1] β^-: radiação ou decaimento beta-menos é a transformação de um neutrão num protão, ocorrendo a emissão de um eletrão e antineutrino.

tornando-se em Neptúnio-239 (^{239}Np) e passado 2.3 dias sofre outra radiação beta-menos, transformando-se em ^{239}Pu. Este nuclídeo já é físsil, e ao entrar em fissão gera produtos de fissão, energia e liberta cerca de 2 ou 3 neutrões (radioactivity.eu.com, 2020). É de notar que T representa a meia-vida[2] do isótopo.

Num reator nuclear tradicional, ambos os isótopos de urânio podem ser atingidos por neutrões. Quando o ^{235}U é atingido, ocorre fissão, gerando energia nuclear e os produtos de fissão. Por uma grande quantidade do combustível nuclear ser ^{238}U, a transmutação para ^{239}Pu como *by-product* ocorre frequentemente no reator. Após a transmutação, ^{239}Pu acaba por também sofrer fissão, gerando energia nuclear e obtendo produtos de fissão. A energia libertada entre os dois isótopos fissionados são semelhantes, porém um terço da energia produzida no reator tem origem no ^{239}Pu (WNA, 2026h). Ambos o ^{235}U e ^{238}U nunca são consumidos por completo no reator, podendo ser reprocessados e reciclados para uso futuro, no caso de um ciclo fechado. O ^{239}Pu obtido do ciclo U-Pu também não é queimado na sua totalidade, sendo que cerca de 65% do ^{239}Pu que sobra pode ser recuperado do reator para ser misturado com urânio empobrecido, a antítese do urânio enriquecido.

3.3. Urânio e a Tecnologia Nuclear Dominante

Os Reatores de Água Pressurizada (em inglês *Pressurized Water Reactors,* PWR) são um tipo de LWR. Estes, de modo simples, usam água leve (H_2O) nos seus processos de arrefecimento e de moderação. Os PWRs não são exceção.

O desenvolvimento dos PWRs começou em 1946 com o Programa de Propulsão Nuclear Naval dos Estados Unidos da América, no Laboratório Nacional de Oak Ridge, em Tennessee, com o objetivo de desenvolver propulsão nuclear submarina. Em 1953, sob a direção do almirante Hyman Rickover, o primeiro protótipo de um reator naval, o Mark 1, foi desenvolvido e testado em Idaho, sendo que no ano seguinte foi lançado o primeiro submarino nuclear, o USS Nautilus (WNA, 2026d) Ainda em 1953, após o desenvolvimento bem-sucedido dos reatores submarinos, o design foi adaptado para a geração de eletricidade para uso civil, com a construção do reator de demonstração Shippingport, na Pensilvânia, com uma potência de 60MW, sendo que começou a operar em 1957. Este reator não era representativo dos PWRs comerciais que surgiram futuramente. Em 1960, ainda nos EUA,

[2] T: Meia-vida é o tempo necessário para a transmutação de metade da massa do radioisótopo

a mandato de Rickover, a empresa americana Westinghouse desenhou o primeiro PWR totalmente comercial em 1960, chamado de Yankee Rowe. Este reator foi construído em e começou a operar em 1960 até 1992, com uma potência de 250 MWe (megawatt elétrico) (WNA, 2026d)

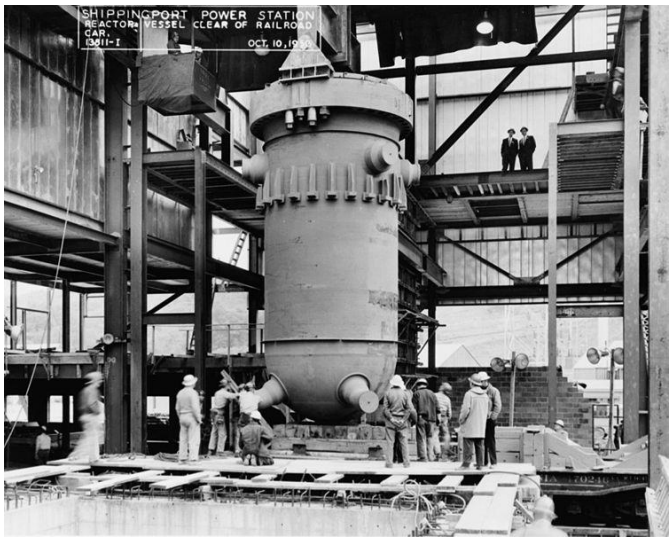


Figura 2 – Reator Shippingport a ser instalado (WNA, 2026d)

Devido à sua relativa simplicidade, hoje em dia o tipo de reator mais comum a nível mundial é o PWR, sendo que mais de 70% dos reatores em operação são PWRs e nos últimos 10 anos, 55 dos 59 reatores a entrar em serviço foram PWRs (Belyakov, 2019; WNA, 2026f). Na União Europeia, os PWRs também são o design de reator mais comum. (Eurostat, 2025b). Nestes reatores são utilizados como combustível urânio fracamente enriquecido ou óxidos mistos (MOX) (Belyakov, 2019).

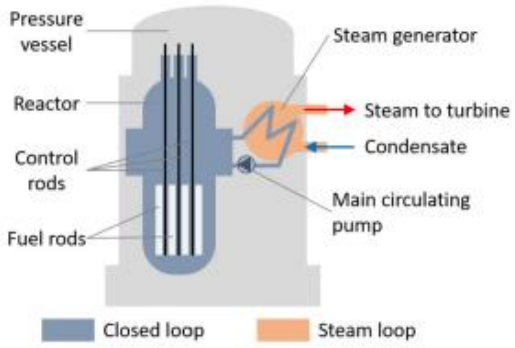


Figura 3 – Diagrama de um PWR (Belyakov, 2019)

Como se pode observar na Figura 3, o PWR consiste de um reator inserido numa blindagem de aço, onde estão inseridas verticalmente barras que contêm *pellets* de dióxido de urânio (UO_2), a forma mais comum de combustível nuclear (Belyakov, 2019; Oettingen, 2019).

Num PWR de grandes dimensões, existe entre 150 e 250 conjuntos de barras de combustível com um peso de 80 a 100 toneladas de urânio, sendo que em cada conjunto estão agrupadas 200 a 300 barras (WNA, 2026c). Na blindagem também estão contidas barras de controlo, que servem para controlar a reação. Estas barras de controlo são feitas de um material com grande capacidade de absorção de neutrões, sendo utilizadas para controlar a velocidade da fissão a ocorrer nos *pellets* ao controlar o número de neutrões existentes. Num PWR existem dois circuitos de água que nunca se cruzam e com funções distintas (Belyakov, 2019).

No circuito principal, H_2O é canalizada pela blindagem, onde é exposta ao calor libertado pela fissão do combustível no reator, absorvendo energia térmica. Neste circuito, a água funciona como moderador ao manter os neutrões com velocidades térmicas e como fluido de refrigeração ao arrefecer constantemente o reator (Belyakov, 2019). Nos PWRs, a água no reator chega a atingir os 325ºC. Destarte, a pressão necessária para impedir que a água não evapore ronda os 15 milhões de Pa, um valor cerca de 150 superiores à pressão atmosférica (WNA, 2026c). A água do circuito principal flui para um gerador de vapor de água, onde ocorre a transferência de calor para o segundo circuito de água. Depois desta transferência térmica, a água deste circuito arrefece e é bombeada de volta para o reator, recomeçando o ciclo (Belyakov, 2019). No segundo reator a água não se encontra sob a mesma pressão. Depois desta água aquecer no gerador de vapor, ela evapora e é dirigida para as turbinas que produzem a eletricidade. No fim, a água é condensada e é bombardeada novamente em direção ao gerador de vapor (Belyakov, 2019).

3.4. Reação Nuclear do Combustível de Tório

Na natureza, só existem dois isótopos de tório (Th) (Meija et. al, 2016):

- 99,999% ^{232}Th;
- 0,001% ^{230}Th.

Na produção de energia nuclear com o tório só há interesse no ^{232}Th pois é através da transmutação deste que se cria ^{233}U, um isótopo de urânio que demonstra uma melhor economia de neutrões. Ao contrário do combustível urânio, não é necessário qualquer tipo de enriquecimento, visto que o isótopo desejado é o mais abundante, e ainda mais abundante que ^{238}U em relação a ^{235}U (Haas et.al, 2015). Apesar de ambos os isótopos de tório serem férteis, só há interesse no ^{232}Th pois é através da transmutação deste que se cria U_{233}, um isótopo de urânio que demonstra uma melhor economia de neutrões.

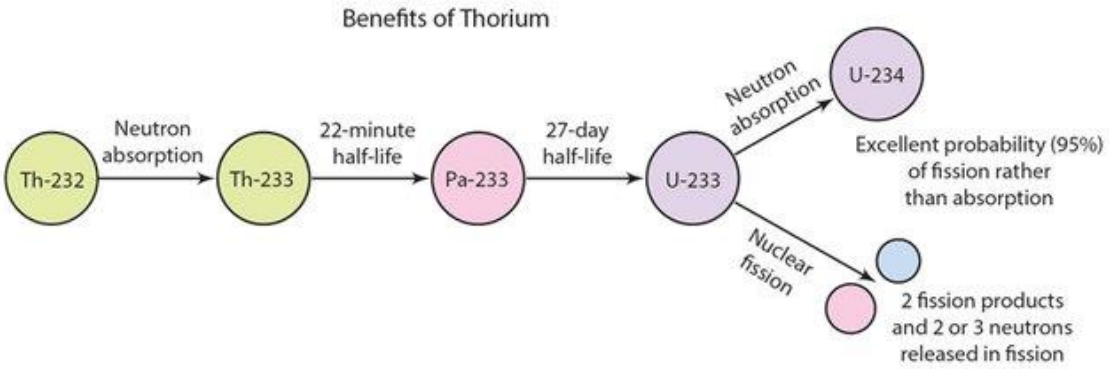


Figura 4 – Transmutação de ^{232}Th em ^{233}U (Lee, 2018)

Este ciclo de Th-U é descrito na imagem em cima. Através da absorção inicial de neutrões por parte dos átomos de ^{232}Th, este torna-se num novo isótopo: o ^{233}Th. Passado cerca de 22 minutos, metade dos átomos de ^{233}Th ter-se-ão transformado em Protactínio-233 (^{233}Pa), através de decaimento beta-menos. De seguida, depois de 27 dias, metade dos átomos de ^{233}Pa transformam-se em ^{233}U com outro decaimento beta-menos, o isótopo desejado. A partir daqui estes radioisótopos entram em fissão, separando-se em produtos de fissão, libertando energia que será capturado pelo reator e gerando entre 2 a 3 neutrões que servirão para atingir os átomos de ^{232}Th, recomeçando ciclo Th-U. No entanto, é importante de notar que, para este ciclo de *breeding* começar, é necessário fornecer neutrões que iniciem o processo, neutrões que são usualmente fornecidos por material físsil, como ^{235}U ou ^{239}Pu (Serp et. al, 2014).

3.5. Tório e a Tecnologia Nuclear Experimental mais Adequada

Os Reatores a Sal Fundido (em inglês *Molten Salt Reactors,* MSR) são um tipo de reator de quarta geração, são definidos como qualquer reator em que um sal fundido tenha um papel importante no funcionamento do reator, quer seja como solvente do combustível, fluido de

refrigeração e/ou moderador (GIF, s.d.; IAEA, 2023). A conceptualização dos reatores desta geração ocorreu com a criação do *Generation IV International Forum* (GIF) em julho de 2001, com o propósito da partilha de informações e pesquisa para o desenvolvimento destes reatores, sendo os seus membros a Argentina, a Austrália, a África do Sul, o Brasil, a China, o Canadá, a Coreia do Sul, os Estados Unidos da América, a França, o Japão, o Reino Unido, a Suíça, a Rússia e a UE, através da Euratom. O GIF estabeleceu os seguintes objetivos como os seus pilares de desenvolvimento da tecnologia, sendo estes a sustentabilidade, a competitividade económica, a segurança e a resistência à proliferação (Kelly, 2014), objetivos que se alinham com a questão desta dissertação.

De um modo geral, enquanto que nos PWRs o combustível são óxidos, nos MSRs o material nuclear é dissolvido diretamente numa mistura líquida de sais, simplificando a fabricação do combustível. O estado da arte sugere fortemente que os MSRs de combustível líquido são frequentemente associados ao ciclo de transmutação de ^{233}Th para ^{235}U (Serp et. al, 2014). A utilização de sais fundidos num reator desbloqueia altos pontos de ebulição, baixa pressão de vapor e grande capacidade térmica, sendo por isso um dos designs de reator da GEN IV mais promissor (Wang et. al, 2024).

Segundo a IAEA (2023), o interesse em reatores que utilizassem combustíveis nucleares em forma líquida cresceu em 1943, apesar deste conceito originado pouco depois da descoberta da fissão nuclear em 1938. Para os finais de 1949, o Laboratório Nacional de Oak Ridge (ORNL), liderado por A.M. Weinberg, foi escolhido pela Comissão de Energia Atómica dos Estados Unidos da América para investigar a aptidão de reatores nucleares para aviação, num programa do Força Aérea chamado de *Aircraft Nuclear Propulsion* (ANP). Em 1953, estudantes da *Oak Ridge School of Reactor Technology* propuseram um reator baseado em sais de fluoreto e no ciclo de Th-U. Este foi o antecessor ao *Molten Salt Fast Reactor*. Durante o início dos anos 50, o programa ANP cresceu consideravelmente, levando à criação do *Aircraft Reactor Experiment* em 1954, o primeiro MSR. Para o fim dos anos 50, o ANP chegou ao fim, sendo que o foco veio desviado da aviação para a geração de eletricidade para a rede elétrica civil. Para esse propósito, em 1960 procedeu-se à conceção do reator utilizado na *Molten Salt Reactor Experiment* (MSRE), sendo que a construção começou dois anos depois. Atingiu criticidade em 1965. A operação deste reator foi considerada um grande sucesso. Porém, em 1972, um relatório apresentado pela Comissão de Energia Atómica destacou que algumas barreiras tecnológicas existiam, além de que outros problemas como falta de conhecimento dos

produtos de fissão e de técnicas de manutenção. Só quando ultrapassadas estas barreiras, seria esta tecnologia nuclear considerada pronta para desenvolvimento. Ademais, o relatório também mencionou que os MSRs não eram considerados uma prioridade alta para o governo americano, não havendo uma garantia de que os recursos necessários para o desenvolvimento desta tecnologia seriam alocados. Na década de 70 a questão da proliferação nuclear virou um tema política importante, que levou a uma diretiva de leis com o objetivo de acelerar a pesquisa sobre os reatores e combustíveis nucleares alternativos que impediam acesso direto ao material usado em armas nucleares. No entanto, o programa dos MSRs nunca obteve os recursos necessários para continuar a sua pesquisa em grande escala, tendo sido encerrado em 1977.

Atualmente, tem havido um ressurgimento do I&D desta tecnologia, principalmente na China e na Índia, dois países que cada vez mais aumentam as suas necessidades energéticas, mas que possuem enormes depósitos de tório dentro do seu território. Na China, o reator experimental TMSR-LF1 atingiu criticidade em outubro de 2023 (Krepel, 2025). Em junho de 2024 foi operado pela primeira vez em potência total e em outubro do mesmo ano *breeding* ocorreu com sucesso, visto que foi detetado ^{233}Pa (Krepel, 2025). Em 2025, foi anunciado que o reator chinês reintroduziu combustível ao reator sem o desligar (Nuclear Engineering International, 2025), sendo que também completou a transmutação de ^{232}Th em ^{233}U (World Nuclear News, 2025). Na Índia, em abril de 2026, o seu *Prototype Fast Breeder Reactor* (PFBR) atingiu criticidade (Department of Atomic Energy, 2026). Na UE, a experimentação com as tecnologias de MSR começou em 2004, coordenada pelo *Joint Research Centre* (JRC) da Comissão Europeia (IAEA, 2023). Os projetos de I&D já desenvolvidos e completados pelo JRC foram, em ordem cronológica, o MOST, o ALISIA, o EVOL, o SAMOFAR e o SAMOSAFER. Atualmente, os projetos MIMOSA e ENDURANCE ainda estão a ser financiados (Jenet et. al, 2025). Instituições governamentais e de ensino superior e ainda empresas privadas da França, Dinamarca, Chéquia, Países Baixos e Itália também contribuem para o I&D (IAEA, 2023).

Segundo o relatório "*Status of Molten Salt Reactor Technology*" da IAEA (2023), existe uma grande variedade de conceitos para MSRs, sendo que daí surgiu a necessidade de desenvolver uma forma de categorizar os diferentes designs de reatores que já existiam e pudessem vir a surgir. A taxonomia apresentada neste relatório deixa primeiramente aparente que todos os conceitos de MSRs existentes utilizam ou sais de fluoreto ou sais de cloreto, que a grafite é

o único moderador sólido quimicamente compatível com os sais de fluoreto e neutrões térmicos e que ambos o ^{232}Th, o ^{235}U e o ^{238}U podem funcionar, dependendo do reator. A classificação dos MSRs tem três camadas: classes, famílias e tipos. Existem quatro famílias:

- Classe I: MSRs baseados em grafite. Os reatores desta classe são os únicos que usam grafite no núcleo como moderador, usando exclusivamente sais de fluoreto e neutrões térmicos.
- Classe II: MSRs homogéneos. Categorizados pela falta de materiais estruturais no núcleo que separem o combustível de um moderador ou de um fluido de refrigeração, ou seja, o núcleo é preenchido exclusivamente pelo sal de combustível. São também categorizados pelo uso do espetro térmico de neutrões.
- Classe III: MSRs heterogéneos. Categorizados pela presença de materiais estruturais no núcleo que separem o combustível de um moderador ou de um fluido de refrigeração.
- Classe IV: Outros MSRs. Todos os reatores que não encaixam nas outras categorias. São tipicamente *designs* históricos ou descontinuados.

A segunda camada da taxonomia refere-se às famílias, sendo dividida em seis:

- Família 1: MSRs arrefecidos por sais de fluoreto, pertencente à classe I.
- Família 2: MSRs moderados por grafite, pertencente à classe I.
- Família 3: MSRs homogéneos rápidos de fluoreto, pertencente à classe II.
- Família 4: MSRs homogéneos rápidos de cloreto, pertencente à classe II.
- Família 5: MSRs não moderados por grafite, pertencente à classe III.
- Família 6: MSRs heterogéneos rápidos de cloreto, pertencente à classe III.

A classe I tem o nível mais alto de prontidão tecnológica devido sobretudo à operação bem-sucedida do MSRE, da qual a maior parte destes reatores são baseados. A classe II é a segunda mais perta de obter prontidão tecnológica e depende principalmente do combustível em utilização, estando mais pertos dessa prontidão se tal combustível for semelhante ao usados no MSRE. A prontidão tecnológica dos reatores da classe III depende, além do combustível, do material separador, sendo que é normalmente mais baixa por estes materiais ainda não resistirem à corrosão e irradiação. Como os reatores da classe IV são na sua maioria antigos, têm a menor prontidão tecnológica. Em relação às famílias, os MSRs moderados por grafite

são os reatores mais desenvolvidos, sendo que de seguida os reatores mais próximos de comercialização são os MSRs homogéneos rápidos de fluoreto.

A terceira camada da taxonomia refere-se aos tipos de reatores, que estão apresentados no seguinte diagrama que engloba a da taxonomia total dos MSRs.

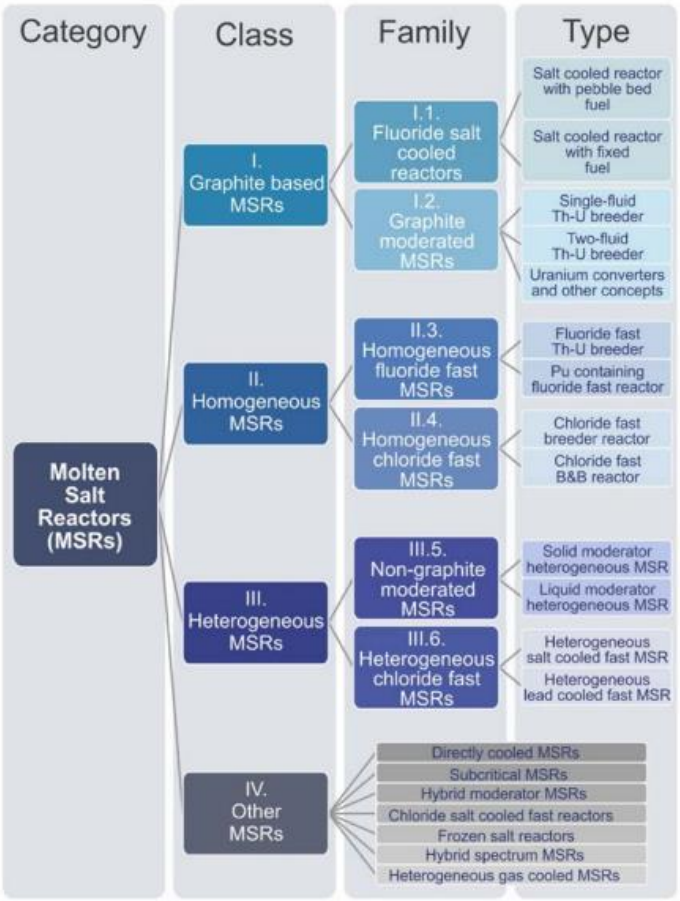


Figura 5 – Diagrama da categorização dos MSR (IAEA, 2023)

Conclui-se que os reatores mais próximos de desenvolvimento comercial são os da classe I e da família 2. Como é possível observar na figura, estes reatores moderados por grafite utilizam combustível líquido de sais de fluoreto misturado com tório (no ciclo fechado de Th-U), urânio enriquecido ou transurânicos. Os neutrões utilizados para a fissão nuclear são do espetro térmico e, dependendo do rácio de conversão (C)[3] do combustível, estes reatores podem servir como um *breeder*[4], um *converter*[5] ou um *burner*[6]. Por último, o fluido de

[3] Rácio entre a produção de núcleos atómicos físseis e o consumo de núcleos atómicos (Bodansky, 2005)
[4] Reator onde C>1 (Bodansky, 2005).
[5] Reator onde 0.7<C<1 (Bodansky, 2005). Maioria dos reatores convencionais.
[6] Reator onde C<0.7 (Bodansky, 2005). Concebido para a redução dos resíduos nucleares.

refrigeração também é composto de fluoretos, sendo que a transferência de calor no reator ocorre fora do núcleo do reator.

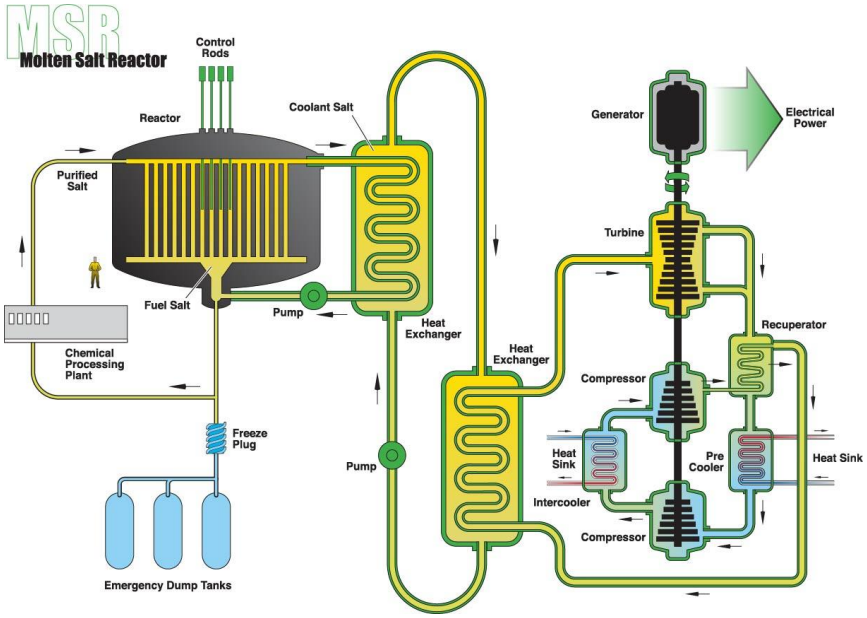


Figura 6 – Ilustração de um MSR de combustível líquido e moderado por grafite (U. S. Nuclear Energy Research Advisory Committee & Generation IV International Forum, 2002)

Na figura 6 está demonstrada a esquemática de um MSR, moderado por grafite. Dentro do núcleo do reator, os sais do combustível, que inicialmente se encontram a rondar os 650ºC, absorvem a energia libertada pela reação em cadeia sob forma de calor, aquecendo para temperaturas entre os 700 e 800º e operando a pressões tipicamente abaixo dos 0.5 Mpa, um valor só 5 vez superior à pressão atmosférica (Caciuffo et. al, 2020; Wang et. al, 2024). De seguida, circulam para uma câmara do permutador de calor. Neste circuito intermédio, o combustível líquido que se encontra extremamente quente transfere essa temperatura para o trocador de calor que contêm os sais que agem como fluido de refrigeração (Wang et. al, 2024). Por fim, ocorre uma nova transferência de temperatura numa segunda câmara para um novo circuito que contêm água que será evaporada para gerar eletricidade numa turbina (Wang et. al, 2024). Como os ciclos de combustível nos MSRs são tipicamente circuitos fechados, a remoção dos produtos de fissão e reciclagem do ^{233}U gerado pelo ciclo de Th-U ocorre numa planta de reprocessamento químico (Caciuffo et. al, 2020). Além disso, estes reatores possuem um sistema de segurança inerente e passiva que permite drenar o combustível líquido simplesmente com a força da gravidade, em caso de a temperatura do reator subir anormalmente ou se a energia fornecida ao sistema elétrico da central se desligar. Os *freeze plugs* que podem ser observados na imagem são feitos de sais sólidos e constituem

esta sistema de segurança passiva (Noori-kalkhoran, 2026). Na primeira instância, se o reator sobreaquecer, estas secções simplesmente derreteriam, levando o combustível a arrefecer e solidificar em tanques de emergência. No segundo caso, se a central ficar sem eletricidade, as *freeze plugs* descongelam uma vez que o sistema que mantinha a temperatura baixa o suficiente para solidificar os sais deixar de funcionar, drenando o combustível.

Esta tecnologia nuclear é considerada a mais adequada ao uso de tório como combustível porque estes reatores têm ótima sinergia com os ciclos de *breeding*, como é o caso do ciclo Th-U. O uso de combustível líquido de tório num MSR permite a remoção dos produtos de fissão e o isolamento de ^{233}Pa, materiais notórios por terem níveis parasíticos de absorção de neutrões, através de técnicas químicas e eletroquímicas, além do reabastecimento do material fértil no reator, o que possibilita um ciclo operacional contínuo e longo e torna o processo de fissão mais eficiente. (Hargraves & Moir, 2010; IAEA, 2023).

Apesar de não existirem falhas fundamentais nos reatores de MSRs que preveniriam estes de serem considerados como uma solução energética segura e exequível, ainda é preciso superar diversos desafios ante de se escalar esta tecnologia (IAEA, 2023). Estes desafios podem ser diferenciados por serem de natureza tecnológica ou não. As barreiras tecnológicas precisam de ser ultrapassadas para permitirem aos MSRs obterem uma vida útil suficiente para poderem ser competitivos no mercado (IAEA, 2023). Uma das principais barreiras tecnológicas consiste na degradação dos componentes causada pela corrosão e irradiação por parte dos sais fundidos e dos produtos de fissão e actinídeos, respetivamente. Para mitigar tal degradação, é fundamental identificar, desenvolver e qualificar as combinações adequadas de sais e materiais usados nos componentes. Existem também problemas que requerem soluções de engenharia, no que toca à conceção e manufaturação de componentes que possam operar em ambientes de temperatura extrema. Ainda há uma necessidade em criar software de simulação e de modelação, juntamente com bases de dados das propriedades termofísicas dos sais (IAEA, 2023). Esforços colaborativos entre entidades públicas e privadas são necessárias para avançar no desenvolvimento e implementação desta tecnologia, esforços que podem ser verificados em artigos como Delagnes et. al (2026) e Luca et. al (2026). As restantes barreiras não são de natureza tecnológica, e incluem a cadeia de suprimentos, o fornecimento de combustível, o quadro regulatório, o descarte de resíduos de sal de combustível, salvaguardas e segurança e operação e manutenção (IAEA, 2023). Não obstante a estas questões, é bastante expectável que, com financiamento suficiente, estes

reatores de sais fundidos possam começar a gerar eletricidade ou calor para a rede elétrica ou para os agregados familiares e distritos urbanos ou ainda possivelmente rurais (IAEA, 2023).

Na literatura, um reator que é especificamente feito para o uso do ciclo de tório e para o uso de fluoretos líquidos é chamado de Reator de Fluoreto de Tório Líquido (em inglês *Liquid Fluoride Thorium Reactor*, LFTR) (LeBlanc, 2010). Este conceito de reator é o que mais interesse gera quando se fala do ciclo de Th-U, sendo que a partir desta parte da dissertação, irei me focar sobretudo no LFTR.

4. Comparação dos Ciclos e Tecnologias Nucleares a nível Económico, Ambiental e Social

Neste capítulo, será efetuada a análise comparativa sobre as vantagens que o uso do ciclo de Th-U num LFTR possa ou não possuir em relação ao ciclo de U-Pu nos reatores convencionais, com o intuito de compreender se é vantajoso à União Europeia adotar no futuro esta nova tecnologia, em relação aos 3 pilares da sustentabilidade. Em relação ao pilar económico, o aspeto mais importante passa por comparar a acessibilidade de preço, principalmente através da redução dos custos associados a cada tecnologia nuclear e ciclo de combustível associado. Em relação ao pilar ambiental, o foco estará em compreender os impactos ecológicos de cada operação, desde a mineração do urânio ou tório, até ao armazenamento permanente dos resíduos nucleares gerados. Por fim, o impacto social refere-se sobretudo à segurança, quer seja da segurança dos reatores associada aos possíveis acidentes nucleares e à temática da proliferação nuclear. É de notar que haverá sobreposição sobre certas temáticas, como é o caso da reciclagem do combustível nuclear usado, que engloba impactos a nível ambiental e social, mas também a nível económico.

4.1. Mineração do Combustível

Como já determinado anteriormente, nos LWRs e por extensão nos PWRs é sobretudo usado U235 para a produção de energia nuclear, enquanto que nos LFTRs é usado Th232. Para ambos os casos, para obter estes materiais radioativos é necessário minerá-los. No entanto, existem diferenças significativas nas operações de mineração destes.

O tório é bastante mais abundante que urânio, sendo estimado cerca de 3 a 4 vezes mais segundo a IAEA (2005) e é quase inteiramente obtido como *by-product* da extração de terras-raras ou da produção de titânio ou zircónio (Humphrey & Khandaker, 2018). Tal é o caso devido á baixa procura e exploração de tório, sendo considerado por muito países resíduos de mineração, e por essa mesma razão existem bastantes incertezas sobre as reservas totais mundiais (Ashley et. al, 2015, Humphrey & Khandaker, 2018). A abundância de tório é tão significativa que, num cenário menos otimístico, a quantidade de tório existente poderia fornecer eletricidade para o mundo inteiro durante 900 anos, e no cenário mais otimístico 2000 anos. De facto, existem enormes quantidades de tório já minerado, com nenhuma utilidade presentemente, que são suficientes para gerar enormes quantidades de energia sem

custos adicionais de extração de matéria-prima (Emblemsvåg, 2022). Esta alta disponibilidade, juntamente com a extração relativamente fácil do tório, quando comparado com a extração do urânio, representa um incentivo para a utilização de tório como combustível nuclear por si só (Humphrey & Khandaker, 2018).

Além disso, certas terras-raras, como neodímio e disprósio, são necessárias para a produção de veículos elétricos, que por sua vez são necessários para a eletrificação da sociedade. Estas matérias-primas, como já estabelecido, são mineradas ao mesmo tempo que tório. Tório que poderá gerar eletricidade necessária para alimentar os veículos elétricos. O facto de que a produção de eletricidade com origem no tório serve como fonte de energia para estes veículos representa uma sinergia do tório como *by-product* da mineração de terra-raras (Kamei & Hakami, 2011). Ao usar veículo elétricos, conseguimos reduzir o consumo de combustíveis fosseis no setor dos transportes, um dos setores com maiores emissões de GEE. Num futuro onde se abrirão cada vez mais minas (que têm o seu impacto negativo no ambiente) para obter estas terras-raras, o facto de se obter tório (que possibilita o estabelecimento de uma nova fonte de energia elétrica mais limpa, segura e competitiva) ao mesmo tempo, serve para compensar parcialmente o impacto negativo que estas minas terão no ambiente e ao nível social.

Segundo um estudo de Ahsley et. al (2015), as etapas de mineração e moagem de urânio foram determinadas como as maiores fontes de emissões para os sistemas nucleares. No entanto, para o tório, como este é obtido como *by-product*, as únicas emissões associadas à extração de ThO2 (o minério de tório) são as emissões relacionadas com o processamento das terras-raras e outros elementos. De facto, neste estudo foi concluído que a extração de ThO_2 tem emissões globais menores que as restantes operações de mineração de urânio, para a mesma quantidade de material. No entanto, é necessário ter em conta que os resultados obtidos dependeram de suposições, devido à falta de conhecimento sobre as reservas de tório.

Ault et. al (2017) também estabeleceu o facto de que os resíduos gerados na etapa da mineração englobam quase todos os resíduos gerados ao longo de todo o ciclo dos sistemas nucleares, que incluem os resíduos radioativos. Um ciclo aberto de U-Pu, associado aos PWRs, obteve-se cerca de 1 milhão de mais volume de resíduos de mineração do que o ciclo fechado de Th-U, associado ao LFTR. Esta diferença astronómica deve-se ao menor consumo de recursos naturais de um ciclo fechado de Th-U, devido à reciclagem e

reprocessamento que ocorre do combustível usado, e à eficiência do combustível, que será analisado mais à frente neste capítulo.

4.2. Conversão, Enriquecimento e Fabricação do Combustível

Enquanto que o minério de urânio já moído, conhecido como *yellowcake*, precisa de ser convertido de U_3O_8 sólido para hexafluoreto de urânio (UF_6) gasoso, o tório não precisa de ser nem convertido nem enriquecido.

Os únicos dois processos de enriquecimento de urânio que foram utilizados comercialmente são a difusão gasosa e a centrifugação a gás, sendo que esta última é a única que é utilizada atualmente (Ashley et. al, 2015; WNA, 2026g). No processo de centrifugação, os diferentes isótopos são separados pelo seu peso em tubo em vácuo, onde o isótopo mais pesado concentra-se na borda externa do tubo e o mais leve concentra-se no centro do cilindro (WNA, 2026g). Ambos a conversão química e o enriquecimento são etapas que implicam custos de capital para as instalações e equipamentos necessários, custos de energia, custos de operação e manutenção, custos dos trabalhadores, etc. O tório simplesmente não precisa de conversão e nem de enriquecimento para ser utilizado como combustível nuclear (Ashley et. al, 2015). Simplesmente necessita de ser liquidificado nos sais utilizados, enquanto que o urânio ainda terá de ser convertido novamente para a forma sólida como UO_2, e ainda terá de sinterização do pó de UO_2 em *pellets* de cerâmica, de modo a tornarem-se sólidas e resistentes (Ashley et. al, 2015).

Assim sendo, torna-se evidente que isto representa uma vantagem a nível económico para o ciclo de Th-U (quando o ^{232}Th é usado como combustível líquido, o que é sempre o caso nos LFTRs), uma vez que não há qualquer envolvimento de processos que requerem instalações que são caras, tornando a fabricação do combustível de Th mais rápido e mais segura do que de U. Além disso, o uso de químicos na conversão de U e a uso energético inevitável no enriquecimento do mesmo, representam um ganho ambiental do ciclo de Th-U.

4.3. No Reator

O urânio e o tório, depois de terem sido minerados e transformados em combustível próprio para utilização nos seus respetivos reatores, irão entrar em fissão dentro do reator, quer seja de forma direta ou da produção de material físsil a partir de material fértil. A energia libertada pela quebra destes átomos pesados é consideravelmente superior à energia de qualquer quebra de moléculas. É isso que torna a energia nuclear tão atrativa a nível energético, mas também é a razão que a tornou mal compreendida para a população geral, devido aos acidentes de Chernobyl e Fukushima I.

Neste subcapítulo, irei então comparar os níveis de eficiência energética do combustível de ^{235}U num PWR e de ^{233}U num LFTR, juntamente com as propriedades e sistemas de segurança existentes em cada tipo de reator.

4.3.1. Eficiência do Combustível

Para a mesma geração de eletricidade é preciso quantidades vastamente diferentes de U235 para uso nos PWRs e Th232 para uso nos LFTRs. Segundo Juhasz et. al (2009), pode-se obter cerca de 300 vezes mais energia elétrica por unidade de massa de minério de Th natural do que U natural.

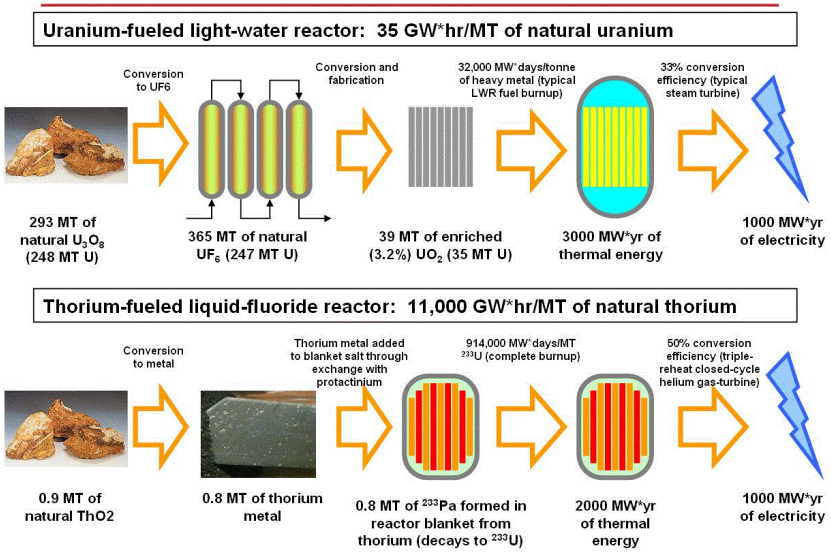


Figura 7 – Comparação da extração energética entre urânio num LWR e tório num LFTR (Juhasz, 2014, p. 28)

Na figura 7 está ilustrada o pressuposto da análise de Juhasz et. al, que assume que um LFTR alimentado a tório num ciclo fechado pode extrair aproximadamente 11.000 GW h de energia elétrica equivalente a uma tonelada de tório natural, em comparação com aproximadamente

35 GWh por uma tonelada de urânio natural para um reator convencional alimentado a urânio. Esta discrepância deve-se a dois fatores.

O primeiro é a abundância natural dos isótopos. Enquanto que o Th232 tem uma abundância natural de quase 100%, o ^{235}U tem uma abundância de 0.7%. Por essa razão, é necessário minerar e converter quase 300 toneladas de minérios de urânio para enriquecer e fabricar cerca de 40 toneladas de combustível de urânio, enquanto que para o combustível de tório basta 1 tonelada de tório natural que não precisa de ser enriquecido. Nesta vertente, o uso de urânio nos PWRs representa uma deficiência a nível de eficiência na fabricação do combustível, visto que do urânio natural, só 0.7% é pretendido ser usado e para uma reação em cadeia se autossustentar, cerca de 3 a 5% do combustível nuclear tem de ser composto de ^{235}U. Isso significa que, ao enriquecer o urânio destinado ao reator, uma parte considerável do peso de ^{238}U tem de ser descartada (Caciuffo et. al, 2020), e durante a sua utilização num PWR, só 5% do combustível é usado antes das *pellets* de urânio terem de ser substituídas devido ao dano causado pela radiação (Greaves et. al, 2012) (*apud* Emblemsvåg, 2022). Pelo contrário, o ^{232}Th é aproveitado na sua totalidade e pode continuar a circular no LFTR, devido à ótima estabilidade química dos sais que não podem ser irradiados, até ser necessário trocar o moderador de grafite (Emblemsvåg, 2022).

O segundo fator está relacionado com a eficiência térmica. Enquanto que a conversão de energia térmica gerada no reator para eletricidade nos LWRs e PWRs são entre 33 e 35%, para os LFTRs rondam os 45-50%. Estes valores de eficiência térmica são baseados no MSR do ORNL de 1970, sendo que vários investigadores acreditam que este valor ainda poderá aumentar para 55-60% (Peterson, 2003) (*apud* Emblemsvåg, 2022).

Isto significa que os LFTRs são mais eficientes em converter Th em energia que os reatores tradicionais com U. Então, segundo Juhasz (2009), em termos energéticos, cerca de 0.8 toneladas de Th na forma de combustível num LFTR equivale a cerca de 39 toneladas de U na forma de combustível num PWR. Ao mesmo tempo que menos tório é preciso, há uma diminuição proporcional dos sais necessários.

Assim sendo, para a mesma quantidade de energia usa-se consideravelmente menos minério de tório do que de urânio, podendo-se concluir que a implementação do ciclo fechado de Th-U num LFTR traduz-se em ganhos económicos, visto que passa a gastar menos recursos financeiros na obtenção do combustível, diminuindo os custos, e traduz-se também em

benefícios ambientais, uma vez que os impactos ambientais da mineração são minimizados, por virtude de uma menor quantidade de minérios serem necessários por cada unidade de energia.

4.3.1.1. Temperatura, Eficiência Térmica e Aplicações do Calor

As temperaturas em que cada reator opera é um aspeto importante para ser analisado, devido ao aumento da eficiência térmica já mencionada, e às aplicações que podem ser aproveitadas com a maior energia térmica obtida nos MSRs e LFTRs.

Como já estabelecido, num PWR, a eficiência térmica é entre 33-35% e num LFTR é 45-50%. Esta alta eficiência térmica é obtida graças às altas temperaturas que podem ser atingidas num MSRs, e por extensão, num LFTR e às ótimas propriedades termofísicas dos sais fundidos. Os sais utilizados como fluido de refrigeração, sem estarem sob pressão, tornam-se líquidos aos 500°C e só começam a evaporar a partir dos 1400°C (WNA, 2025b). Assim sendo, facilitam uma conversão de energia térmica para energia elétrica mais eficiente através de um ciclo de termodinâmica avançada, distinto dos PWRs que operam por volta dos 325 e 350ºC e sob alta pressão (Caciuffo et. al, 2025; WNA, 2026c).

Estas temperaturas bastante elevadas que são obtidas nos LFTRs, desbloqueiam várias aplicações de calor a alta temperatura que os reatores nucleares convencionais nunca conseguiriam. A energia térmica dos LFTRs, se usada diretamente, será útil para as indústrias metalúrgicas e químicas, que são responsáveis por uma grande parte da emissão de GEE, sendo que também será útil para a produção em larga escala de hidrogênio por eletrólise a alta temperatura ou reforma a vapor é permitida. Destarte, a energia térmica produzida num LFTR tem a possibilidade de diminuir a emissões de carbono de certas indústrias e a possibilidade de criar hidrogénio, que serve de uma alternativa não poluente aos combustíveis fósseis, em indústrias e utilizações cuja a eletricidade não pode substituir, contribuindo ainda mais para a diminuição das emissões de GEE para a atmosfera. Além disso, o uso direto do calor na dessalinização da água salgada é viável, tendo impactos ambientais positivos e sociais em zonas áridas ou sujeitas a secas, caso tenham acesso a água do mar. A produção de certos combustíveis sintéticos a partir de água e CO_2 para motores também se torna possível. (Caciuffo et. al, 2025; Hargraves & Moir, 2010; Juhasz et. al, 2009; Luca et. al, 2026).

4.3.2. Segurança do Reator

Esta temática é bastante importante de analisar devido ao peso que os acidente nucleares têm na consciência pública. Desde sempre que a segurança dos reatores é um foco no desenvolvimento das tecnologias nucleares. E é seguro assumir que, os MSRs e LFTRs sendo reatores de quarta geração, serão bastante mais seguros que os LWRs e PWRs de segunda e terceira geração. Para demonstrar os diferentes níveis e sistemas de segurança de ambos os tipos de reator, irei primeiramente expor os PWR no contexto da segurança, e de seguida irei enumerar e explicar as melhorias de segurança nos LFTRs, em relação aos reatores convencionais.

4.3.2.1. Segurança no Reatore de Água Pressurizada

A principal falha de segurança num PWR está relacionada com a alta pressão necessária para manter a água na forma líquida nestes reatores. Em casos de despressurização dos tubos que carregam a água usada para arrefecer o reator, acontecerá que levem a um acidente de perda de fluido de refrigeração. Existem sistemas de emergência incluídos nos *designs* destes reatores, como sistemas de arrefecimento central de emergência, que servem para compensar qualquer perda de fluido e para remover temperatura do núcleo, ou ainda as barras de controlo que param a reação em cadeia (Buttery, 2012).

No entanto, a maioria dos sistemas de segurança num PWR são de segurança ativa, que podem ser ativados automaticamente por um sistema da central nuclear ou podem ser operados por um operário da central. No entanto, os sistemas de segurança ativa terão sempre maiores riscos de falhar do que sistemas de segurança passiva, mesmo que sejam extremamente seguros, uma vez que são vulneráveis a falhas mecânicas ou a falhas elétricas, além de ser mais caros. (Belyakov, 2019).

Um mecanismo de segurança passivo dos PWRs é o facto de que, ao ocorrer uma de despressurização e perda de água no circuito principal, os neutrões no reator deixam de ser térmicos e aceleram, passando a ser neutrões rápidos, terminando com a reação em cadeia da fissão (Buttery, 2012; WNA, 2026b). No entanto, mesmo que a reação tenha terminado, se não se conseguir arrefecer o núcleo superaquecido a tempo, este irá entrar em *meltdown*, algo que se quer impedir a todo o custo. Senão, produtos de fissão altamente radioativos serão libertados. Como já estabelecido, existem sistemas para impedir este acidente, e

sistemas redundantes que servem como back-up aos sistemas de segurança principais caso estes falhem, reduzindo significativamente as probabilidades de um acidente ocorrer. Existe também uma diversidade de vários sistemas para assegurar da melhor forma possível que acidentes não ocorram. A redundância e a diversidade dos sistemas de segurança são fundamentais num PWR (Belyakov, 2019; Buttery, 2012).

Em qualquer reator nuclear, existem uma série de camadas e barreiras de defesa que evitam acidentes e maximizam o confinamento da radioatividade, caso um acidente aconteça. A isto chama-se o princípio da defesa em profundidade ((Belyakov, 2019; Buttery, 2012; Wang et. al, 2024). Nos PWRs, a literatura considera 4 níveis de defesa em profundidade:

1. *Pellets* cerâmicas de combustível nuclear, para reter a maioria dos radionuclídeos;
2. Revestimento especial das barras de combustível, normalmente com ligas de zircónio;
3. Blindagem de pressão feito com aço especial e o sistema de arrefecimento primário;
4. Edifício de contenção do reator.

Este edifício tem de ser grande o suficiente para captar todo o vapor que escaparia do sistema de refrigeração, vapor que de certeza conteria material radioativo. Tem de resistir a explosões, terremotos, inundações, furacões, colisão com um avião comercial e outros possíveis desastres. Também é projetado para conter todos os radionuclídeos que escapam através do sistema de refrigeração ou do recipiente sob pressão.

Todos estes diferentes níveis de seguranças ativos são bastante complexos e dispendiosos.

4.3.2.2. Segurança no Reator de Fluoreto de Tório Líquido

Os MSRs e LFTRs têm muitas diferenças com os PWRs, no que toca às barreiras de segurança. Segundo (Moir & Teller, 2018) (*apud* Wang et. al, 2024), a defesa em profundidade para um MSR terá 7 níveis de barreiras. No entanto, o conjunto de barreiras que constituiriam a defesa em profundidade nos MSRs ainda não está estabelecida na literatura, e por essa razão não irei debruçar-me nesta parte.

Mesmo assim, existem mecanismos e sistemas de defesa que se encontram na série considerada por Moir e Teller (2018) (*apud* Wang et. al, 2024), e que são extensivamente

referidos no estado-da-arte. Tal é o caso do coeficiente de temperatura negativo da reatividade.

O coeficiente de temperatura negativo da reatividade é uma propriedade de segurança passiva que faz a reatividade do reator diminuir quando a temperatura do núcleo do reator aumenta. Em ambos os MSRs e os PWRs, este coeficiente existe (Hargraves & Moir, 2010), no entanto para o reator com os sais o coeficiente é mais forte. Quando a reatividade do reator diminui, significa que a taxa de fissão nuclear diminui (Humphrey & Khandaker, 2018). Isto acontece porque com o aumento da temperatura, o combustível nuclear em sal líquido expande, reduzindo a sua densidade, desacelerando a reação em cadeia, que por sua vez faz com que a temperatura decresça. É um mecanismo autorregulador.

O exemplo de segurança passiva mais importante para a identidade e atratividade dos MSRs e LFTRs é a baixa pressão de operação. Como já dito várias vezes, estes reatores podem operar a temperaturas bastante elevadas, sendo que o sal de fluoreto só evapora a partir dos 1400ºC, e a níveis de pressão quase atmosféricas. Esta funcionalidade efetivamente elimina o perigo causado pelas falhas de pressão da tubagem ou da blindagem à volta do reator, ao mesmo tempo que permite *designs* mais simples, económicos e mais seguros que os PWRs. Em caso de rutura, o sal simplesmente vazaria, onde seria coletado num recipiente próprio, onde depois passivamente arrefeceria e solidificaria (Hargraves & Moir, 2010). Além disso, o número de falhas graves diminui, em relação aos sistemas pressurizados dos PWRs (de Freitas Neto et al., 2021; Wang et. al, 2024).

Outro aspeto importante relacionado com a segurança do reator está relacionado com o estado físico do combustível no LFTR. Enquanto que num PWR o combustível são *pellets* sólidas de ^{235}U e ^{238}U, num LFTR são sais fundidos e ligados quimicamente ao ^{232}Th ou ^{233}U, dependendo da fase de *breeding* onde se encontra. O combustível, por ser líquido, efetivamente não pode entrar em *meltdown* (Wang et. al, 2024). Ademais, a estabilidade dos sais de fluoreto (mas também de cloreto) significa que este não são voláteis, não reagem violentamente com água ou com o ar e são termicamente estáveis, reduzindo o risco de explosões de hidrogénio ou de outras reações químicas energeticamente densas, como foi o caso em Fukushima I (de Freitas Neto et al., 2021).

Caso o sobreaquecimento do reator ocorra, ou caso o reator sofra um corte elétrico, uma *freeze plug*, feitas de sais, existe para coletar os sais fundidos do reator. A *freeze plug* mantêm-se

sólida porque uma ventoinha arrefece-as abaixo do ponto de congelamento dos sais (Hargraves & Moir, 2010). Se os sais ficarem demasiado quentes, a *freeze plug* simplesmente derrete, fazendo com que os sais fundidos caiam e arrefecem num tanque de drenagem, configurado de forma a maximizar a transferência de energia térmica. Se houver um corte de energia total, a *freeze plug* passivamente derrete e o combustível nuclear de sal fundido naturalmente sai do reator e arrefece no mesmo tanque (Hargraves & Moir, 2010).

Por último, o LFTR permite o reabastecimento contínuo e o reprocessamento do combustível já utilizado, isto é, a remoção dos produtos de fissão e outros elementos indesejados ao mesmo tempo que se substitui o ^{233}U antigo com ^{232}Th novo (Luca et. al, 2026), de modo a melhorar a composição do combustível e consequentemente a eficiência dos neutrões, controlando desta forma a reatividade do reator e eliminando acidentes como o de Chernobil (Park et al., 2020) (*apud* Noori-kalkhoran et. al, 2026). Há que notar que, como isto representa uma forma de segurança ativa, a sua não-concretização poderá causar falhas e problemas.

Devido à menor quantidade de sistemas necessários para certificar a segurança das operações num LFTR, o custo inicial de construção diminui, e devido à menor complexidade geral da segurança num LFTR, a segurança destes aumenta devido à minimização do erro humano e das falhas eletrónicas ou mecânicas dos sistemas, representando um impacto social significativo, ao diminuir consideravelmente o risco de acidentes nucleares como de Chernobil e Fukushima I.

No entanto, devido à natureza fértil do ^{232}Th, um LFTR ainda necessita de uma certa quantidade de material físsil como ^{235}U ou ^{239}Pu para servir como *starter* do ciclo de *breeding,* o que não elimina por completo o problema da proliferação nuclear (Humphrey & Khandaker, 2018). Um outro aspeto negativo associado ao ciclo de Th-U é que para metade do ^{233}Pa se transmutar para ^{233}U é preciso esperar cerca de 27 dias, um aumento significativo em relação ao ciclo de U-Pu comum nos PWRs. Como o ^{233}Pa é melhor a captar e absorver mais neutrões que ^{232}Th, a velocidade do *breeding* será cada vez mais lenta. Para impedir isto de acontecer, os *designs* dos LFTRs têm de implementar uma camada fértil separada do reator onde ocorre a transmutação de tório para protactíneo. Isto acrescenta à complexidade e dos custos do reator, mesmo que não seja comparável com os PWRs (Humphrey & Khandaker, 2018).

4.4. Minimização, Reprocessamento e Armazenamento dos Resíduos Nucleares

Uma das maiores preocupações do público geral é indiscutivelmente a questão dos resíduos radioativos gerados. Todavia, até hoje, não houve nenhuma instância onde a gestão e transporte de resíduos radioativos tenha causado danos ou morte de pessoas, propriedade ou do ambiente (WNA, 2026e). Aliás, a quantidade de resíduos gerados pela indústria nuclear é relativamente pequena em comparação com outras indústrias, e cerca de 97% dos resíduos nucleares são lixo de nível baixo e lixo de nível intermedio, sendo só 3 a 0.2% dos resíduos de alto nível, dependendo do grau de reciclagem que ocorre nas centrais nucleares. (WNA, 2026e).

Em todo o caso, a minimização dos resíduos nucleares é uma prioridade no desenvolvimento das novas tecnologias nucleares, em conjunto com a reciclagem destes mesmos.

Isto posto, é necessário estabelecer o facto de que quando se fala de resíduos nucleares não se fale de resíduos no sentido tradicional. Nos resíduos nucleares estão incluídos, por exemplo, materiais usados por operários que se encontram levemente contaminados. Mas, ao contrário do que é habitual, também se considera o combustível usado nos reatores como resíduos nucleares (Emblemsvåg, 2022).

Em ambos os PWRs, com o ciclo de U-Pu, e os LFTRs, com o ciclo de Th-U, os mesmos produtos de fissão são produzidos, porém a composição dos actinídeos obtidos através da absorção e transmutação dos isótopos de urânio é diferente, uma vez que a massa atómica do ^{233}Th fértil é mais pequena do que ^{238}U por 6 nucleões (neutrões e/ou protões) (Hargraves & Moir, 2010).

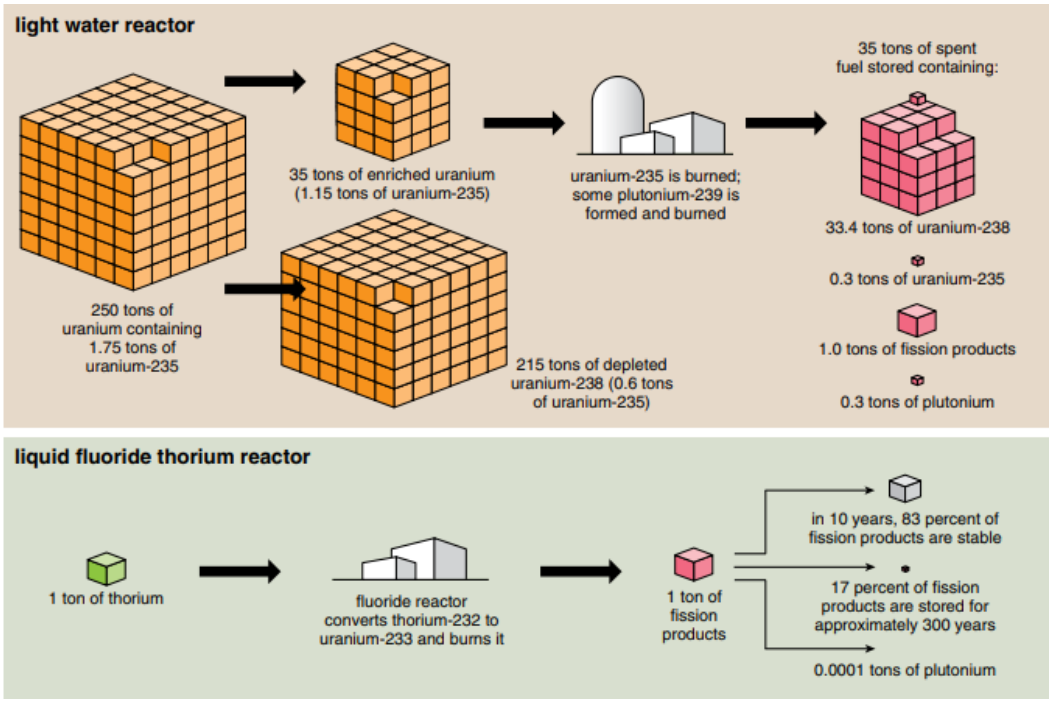


Figura 8 – Comparação da produção de produtos de fissão entre um LWR e um LFTR (Hargraves & Moir, 2010)

Como se pode observar na figura 8, para ambos os reatores obterem 1 tonelada de produtos de fissão com os seus respetivos ciclos, um LWR com o ciclo de urânio e um LFTR com o ciclo de tório precisam de, respetivamente, começar 250 toneladas de urânio natural e 1 tonelada de tório natural (Hargraves & Moir 2010). No LWR, 35 toneladas de urânio enriquecido (que contem somente 1.15 toneladas de ^{235}U) serão utilizadas na central para produzir energia, enquanto que no LFTR a totalidade do ^{232}Th será transmutado em ^{233}U, com uma percentagem minúscula de plutónio obtido. Depois da irradiação do combustível, no LWR obtém-se 35 toneladas de resíduos nucleares, sendo 33.4 toneladas de 238U, 0.3 toneladas de 235U, 0.3 toneladas de vários isótopos plutónio e por fim 1 tonelada de produtos de fissão (Hargraves & Moir 2010). O LFTR, especialmente em comparação com os reatores convencionais, produz uma quantidade consideravelmente menor de resíduos nucleares, além destes resíduos serem inicialmente menos radioativos, sendo que após 300 anos são 10 mil vezes menos radioativos que os resíduos do ciclo de U-Pu (Hargraves & Moir, 2010; Humphrey & Khandaker, 2018). Além disso, os resíduos do Th-U demoram menos tempo a decair para elementos mais estáveis do que os resíduos de U-Pu (Chroneos et. al, 2023). Não só o LFTR produz menor quantidade de resíduos de alto-nível, mas a radiação deste caí mais rapidamente do que os resíduos gerados num PWR (Ault et. al, 2017; Hargraves & Moir, 2010).

Num estudo realizado por Ault et. al (2017), foram comparados 4 tipos de ciclos:

1. Ciclo aberto (e modificado) de U-Pu
2. Ciclo aberto (e modificado) de Th-U
3. Ciclo fechado de U-Pu
4. Ciclo fechado de Th-U

Para o propósito desta dissertação, só interessa a opção 1 e 4, visto que a opção 1 se refere ao ciclo tradicional dos PWRs, e a opção 4 se refere ao ciclo fechado de *breeding* de ^{233}U a partir de tório. Neste estudo, o ciclo aberto e modificado de U-Pu foi analisado em 2 PWRs diferentes e o ciclo fechado de Th-U foi analisado num MSR do espetro térmico, que usa um sal de fluoreto e usa combustível líquido. Ou seja, um LFTR. Foram analisados os níveis de dose ocupacional (a dose total radiológica do operário), o impacto volumétrico dos resíduos de baixo nível, o calor de decaimento dos resíduos de alto nível e a radiotoxicidade dos resíduos de alto nível.

Para a dose ocupacional, o ciclo fechado de Th-U parece apresentar mais vantagens, provavelmente ao consolidar várias instalações que tradicionalmente estariam separadas numa só, limitando a exposição. No entanto, os valores obtidos para o Th-U têm algum nível de incerteza associados devido à falta de dados e informação sobre os combustíveis de tório e a sua relação com a dose operacional (Ault et. al, 2017). Para o volume dos resíduos de baixo nível, o impacto também tem um nível de incerteza associado devido à razão anterior. No entanto, os resultados apontam para o ciclo fechado de Th-U produzir grandes quantidades de volume, provavelmente devido ao contínuo fluxo continuo e considerável de material no reprocessamento. Isto quer dizer que, num LFTR, há um aumento significativo dos resíduos de baixo-nível para se poder reprocessar e reciclar o combustível irradiado, de modo a diminuir a quantidade dos resíduos mais radioativos (Ault et. al, 2017). Para os resíduos de alto nível, o ciclo de combustível fechado de Th-U supera o ciclo de combustível aberto de U-Pu. Em ambos os casos do calor de decomposição e da radiotoxicidade, os valores para o ciclo de Th-U são muito baixos e os do ciclo de U-Pu são, em comparação, extremamente altos (Ault et. al, 2017).

Como se utiliza principalmente ciclos abertos de U-Pu nos reatores de PWR, o reprocessamento de combustível nuclear irradiado é algo que não acontece. Tal é o caso pois reprocessar este combustível e depois utilizá-lo seria mais caro que simplesmente armazená-

lo e utilizar novo urânio, visto que o processo de reprocessamento de combustível sólido e altamente radioativo é demasiado caro e complexo. Ainda mais importante é o facto de que o reprocessamento do combustível irradiado passa por reaproveitar o ^{238}U e o plutónio, que poderiam ser utilizados para criação de ogivas nucleares, representa um grave risco na questão da proliferação nuclear (Bunn et. al, 2003). Em comparação, o ciclo de Th-U num LFTR tem o reprocessamento do seu combustível irradiado por este ser líquido, permitindo a remoção de elementos indesejados, ao mesmo tempo que não representa um risco da proliferação do plutónio para armamento nuclear, visto que este mal é produzido num LFTR (Hargraves & Moir, 2010).

Como já determinado, o ciclo de tório num LFTR produz lixo radioativo em menores quantidades, menos quente e menos duradouro. Isto obviamente representa uma vantagem ao nível ambiental e social, mas também ao nível económico, uma vez que quanto menos lixo for produzido, menos dinheiro se gasta em armazená-lo. Além disso, os resíduos produzidos no ciclo de Th-U só são altamente quentes e radioativos durante aproximadamente 300 anos, enquanto que os resíduos do ciclo de U-Pu são altamente quentes e radioativos durante mais de 10 mil anos (Hargraves & Moir, 2010). Tanto o armazenamento provisório como o descarte permanente do combustível irradiado à base de tório e dos seus produtos de fissão são mais simples que o de à base de urânio. (Emblemsvåg, 2022). Mesmo assim, existem desafios associados a este novo ciclo, como o ^{232}U criado juntamente com o ^{233}U, que é altamente radioativo e, por essa razão, tornando necessário um reprocessamento remoto e automatizado e em células fortemente blindadas, tal e qual como o reprocessamento e armazenamento de urânio. (IAEA, 2005). Além disso, os sais quando irradiados, podem sofrer certas reações químicas que fazem com que o processo de armazenamento permanente do combustível seja mais complexo do que para o combustível dos PWRs (McFarlane, 2024).

Além disso, como mencionado no capítulo 3, os MSRs podem ser reatores *burners*, que são criados para consumir actinídeos e transurânicos (como plutónio) provenientes de LWRs, para reduzir a quantidade de resíduos nucleares de longa vida ao obter produtos de fissão mais energeticamente estáveis.

4.5. Proliferação Nuclear

O ^{233}U que é convertido do ^{232}Th é, em teoria, adequado e atrativo para a produção de armamento nuclear. O ^{233}U liberta ligeiramente menos energia por fissão de átomo do que ^{235}U ou ^{239}Pu. No entanto, ^{233}U liberta, em média, mais neutrões por cada fissão, comparativamente aos outros isótopos mencionados. Isto significa que, por cada neutrão absorvido, o ^{233}U produz ao longo do tempo mais neutrões que ^{235}U ou ^{239}Pu, ou seja, tem uma economia de neutrões superior (WNA, 2024). Ao libertar mais neutrões, um átomo de ^{233}U é mais provável de entrar em fissão (Humphrey & Khandaker, 2018; WNA, 2024). Esta economia de neutrões faz com que o ^{233}U tenha uma massa crítica menor, ou seja, é preciso uma quantidade menor de material radioativo para começar uma reação em cadeia, quer controlada para uso num reator, quer descontrolada para uso em ogivas atómicas. Uma bomba de ^{233}U, apesar de não ser tão explosiva como uma bomba feita dos outros radioisótopos, tem requerimentos de massa e volume consideravelmente menores.

No entanto, o ^{233}U obtido no reator vem acompanhado de um outro isótopo de urânio, o ^{232}U. Os produtos de decaimento deste isótopo emitem radiação gama intensa que danifica equipamento, ao ponto de aumentar a facilidade com que se deteta o manuseio ilícito, tornando a sua militarização menos atrativa (Hargraves & Moir, 2010; Noori- kalkhoran, 2026). Ademais, o facto de o ^{232}U e o ^{233}U serem quimicamente idênticos e basicamente inseparáveis, por terem quase a mesma massa atómica, torna a sua separação extremamente difícil e dispendiosa (Hargraves & Moir, 2010). Assim sendo, a proliferação de ^{233}U para uso militar torna-se menos atrativo financeiramente do que a utilização de ^{238}U e plutónio, especialmente quando se implementam sistemas nos LFTRs que garantam que o ^{233}U esteja misturado com uma quantidade suficiente de ^{232}U para dissuadir o mau uso do combustível (Noori-kalkhoran, 2026).

Contundo, existe a possibilidade de contornar a criação de ^{232}U. Num LFTR, é necessário isolar ^{233}Pa para não interferir com o *breeding* eficiente de ^{233}U, uma vez que este tem uma probabilidade de absorção de neutrões superior ao ^{232}Th. A meia-vida de 27 dias do ^{233}Pa faz com que haja tempo suficiente para separar o ^{233}Pa, de modo a maximizar a produção de ^{233}U. Em comparação, a meia-vida do neptúnio produzido no ciclo de *breeding* U-Pu é de 23 dias, um tempo significativamente mais curto. Isto representa um risco de proliferação, sendo então necessário monitorizar este radioisótopo (Ashley et al, 2012) (apud Chroneos et. al, 2023) (Kang & von Hippel, 2001).

Há maneiras de obter ^{233}U de forma irregular, quer seja para obter ^{233}U em excesso para armas nucleares ou em moderação para geração de energia. O rácio de transmutação é controlado sobretudo através da conceptualização dos reatores antes da sua construção. Seria possível então, através da análise do reator, compreender se este está a ser usado de forma ilícita e para uso militar, e não energético (Chroneos et. al, 2023; Hargraves & Moir, 2010).

Destarte, o ciclo de tório num LFTR não é intrinsecamente resistente à proliferação nuclear, apesar de ser considerado uma melhoria em relação ao ciclo de urânio num PWR, mas só quando o seu combustível irradiado é reprocessado.

4.6. Custo Normalizado da Eletricidade

Apesar de haver interesse em desenvolver esta nova tecnologia nuclear, a literatura sobre os MSRs focam-se sobretudo nos aspetos técnicos e muito pouco nos aspetos económicos. Mignacca e Locatelli (2020) realizaram uma revisão sistemática da literatura sobre a economia e as finanças dos MSRs. Os poucos artigos científicos identificados sobre a lado económico dos MSRs só se focam na estimação dos custos e na identificação dos fatores que influenciam tais custos. Isto é certamente devido ao facto de que a determinação dos custos é importantíssima para determinar se a tecnologia poderá ser competitiva no mercado. Além disso, foi identificada uma grande falha na literatura sobre os custos de *decomissioning* dos MSRs (Mignacca & Locatelli, 2020).

Na literatura que existe sobre os custos associados aos MSRs e LFTRs, utiliza-se sempre o conceito do Custo Normalizado da Eletricidade (em inglês *Levelised Cost of Electricity*, LCOE). No contexto da energia nuclear, o LCOE representa a soma de todos os custos do ciclo de vida de uma central nuclear, dividida pela soma da eletricidade produzida pela central durante o seu tempo de vida total (Samalova et. al, 2017)

O LCOE de uma central nuclear é habitualmente dividido em 4 tipos de custos (Mignacca & Locatelli, 2020):

- Custos de capital;
- Custos de operação e manutenção (fixos e variáveis);
- Custos do ciclo de combustível;
- Custo de *decomissioning*.

No setor nuclear, a grande parte dos custos são os custos de capital, associados à construção da central, a compra do terreno, o equipamento de construção, licenças, o custo da gestão do projeto e os juros que se acumulam durante a construção, entre outros. Como é de esperar, o custo de capital para uma central nuclear tradicional chega a ser entre 50 a70% do LCOE (Mignacca & Locatelli, 2020). As centrais nucleares tradicionais são instalações muito grandes, mesmo que sejam a forma de geração de energia que menos espaço ocupa por área de terreno usado. Estas centrais requerem vários anos para serem construídas e um grande investimento financeiro inicial para tal construção. MSRs também podem sofrer disto (Caciuffo et al, 2020). Estes custos também são bastante elevados devido à conformidade regulatória. Num PWR, existem várias instalações que precisam de estar separadas por questões de segurança, sendo que existem sistemas complexos e caros que precisam de atender a altos padrões de qualidade, de modo a serem considerados seguros, devido à alta pressurização presente nestes reatores (Hargraves & Moir, 2010; Roser, 2020). Porém, os MSRs e LFTRs, como operam a níveis de pressão quase atmosféricas, provavelmente veriam os seus custos de capital, e consequentemente os seus custos totais, a reduzir de forma significativa.

Para esse propósito, vários cálculos do LCOE e estudos científicos sobre os custos do MSR, em comparação com o PWR, foram elaborados.

Segundo a análise comparativa do LCOE entre um PWR e um MSR realizada por Samalova et. al (2017), através de uma análise à taxa de desconto, os custos de capital foram concluídos serem componentes mais sensíveis para o PWR do que para o MSR. Em caso de prolongamento da construção das centrais, algo que é bastante comum, o preço de construção do PWR aumenta significativamente, e pelo contrário, uma extensão do período de construção tem um impacto económico menor no LCOE do MSR, tornando-os mais atrativos para financiamento. Contudo, é necessário informar que se teve de extrapolar certos valores devido à falta de informação disponibilizada publicamente sobre os custos dos MSRs.

Segundo os cálculos do LCOE de Emblemsvåg (2022), o LFTR tinha consistentemente um LCOE menor do que o PWR, mesmo ao utilizar valores conservadores para o cálculo do LCOE para a nova tecnologia nuclear, fazendo com que dificilmente esta tecnologia não seja rentável. Avisa ainda que mais pesquisa sobre este tema será necessária, uma vez que o LFTR ainda está numa fase de desenvolvimento.

Richards et. al (2017) conclui que os MSRs eram mais custo-eficaz do que os PWR e que os MSRs têm potencial para reduzir as emissões de GEE e os custos da indústria nuclear. A redução de custo foi cerca de 10%, devido sobretudo ao custo de capital mais baixo. Além disso, com um imposto de carbono adequado, seria mais barato instalar vários MSRs do que substituir centrais nucleares existentes com gás natural ou renováveis.

Contudo, os MSRs, mesmo que tenham um custo de capital inferior aos PWRs, ainda têm uma estrutura de custos semelhantes (Emblemsvåg, 2022; Richards et. al, 2017; Samalova et. al, 2017). Isto significa que ainda tem um custo de capital alto. Mesmo assim, baseado na literatura, espera-se que estes reatores em desenvolvimento cheguem a ser competitivos com várias fontes energéticas (Mignacca & Locatelli, 2020).

Mesmo assim, seria ideal diminuir os custos de capital associados à construção das centrais nucleares. Neste sentido, para reduzir drasticamente os custos de capitais, a indústria nuclear e investidores tem demonstrado interesse no conceito de Reatores Modulares Pequenos (em inglês *Small Modular Reactors*, SMR), reatores que, como o nome diz, são de dimensões pequenas e modulares. Este interesse advém da possibilidade da redução de custos e da facilitação da construção, uma vez que podem ser construídos em linhas de produção e transportados para onde seja necessário, fazendo com que sejam ótimos para implementação em zonas remotas do planeta (Caciuffo et. al, 2020). Estes reatores utilizam a economia de múltiplos e a modularização para reduzir os custos, uma vez que se aproveitaria a curva de aprendizagem através da repetição obtida nas linhas de montagem de fábricas (Mignacca & Locatelli, 2020; Roser, 2020). Os SMRs presentemente podem se diferenciar em 4 tipos, sendo dois deles o *Water Cooled* SMR, baseado nos LWRs tradicionais, e o *Molten Salt Reactor* SMR (United Nations Economic Commission for Europe, 2022, p. 39).

5. Conclusão

O objetivo principal desta dissertação foi comparar, a um nível introdutório, a tecnologia nuclear mais promissora para o uso de tório como combustível nuclear, em relação aos reatores convencionais de urânio. Analisou-se os aspetos económicos, ambientais e sociais de ambas as tecnologias, de modo a compreender os potenciais benefícios do ciclo de tório em alcançar os objetivos da UE no que toca à descarbonização, eletrificação e segurança energética, quer seja como alternativa ou como complemento às tecnologias já existentes.

Para a concretização deste objetivo, foi analisado o mix energético, através de dados sobre o consumo de energia primária e final, em conjunto com a exposição das metas ambientais e energéticas da UE, de modo a perceber o contexto energético atual da região e que caminho se pretende tomar na transição energética.

Cerca de metade da energia produzida internamente teve origem nas fontes de energia renováveis, porém os combustíveis fósseis continuam a representar uma percentagem bastante significativa do consumo de energia primária na UE. Além disso, o consumo de energia final também é maior nos produtos de petróleo. Contudo, as fontes renováveis têm um impacto significativo na produção de eletricidade. Adicionalmente, enumerou-se os objetivos ambientais, vinculativos ou não, para 2030, 2035, 2040 e 2050. Para estas metas serem atingidas, tornou-se clara a necessidade de acelerar a mudança do perfil do mix energético europeu, se a UE quer descarbonizar e eletrificar com sucesso, juntamente com a independência energética que se tornou um foco da soberania europeia.

O caminho para a transição energética passa em diminuir drasticamente a quantidade de emissões de GEE, além de aumentar a geração de eletricidade e de preparar a sociedade e as infraestruturas para o consumo geral de eletricidade. É nesta vertente que a energia nuclear, em sintonia com as renováveis, poderá ter um papel importante no futuro da transição energética. Neste sentido, foram enumeradas diversas vantagens únicas da energia nuclear, sendo a mais importante a não-intermitência, uma característica que a grande maioria das energias renováveis não possui. De seguida, olhou-se para o posicionamento dos órgãos políticos da UE em relação ao futuro papel da energia nuclear na região, onde se pode verificar que a UE tem demonstrado interesse em reconsiderar o desenvolvimento da indústria nuclear, quer para aumentar a energia gerada por este, quer para implementar novas tecnologias nucleares, em conjunto com as tradicionais.

Na seguinte parte da dissertação, realizou-se uma análise técnica e histórica sobre os reatores mais comuns a nível mundial e europeu, os Reatores de Água Pressurizada e sobre os reatores mais adequados para a utilização de tório, os Reatores a Sal Fundido, de modo a entender as diferenças principais entre ambos os ciclos e tecnologias nucleares, com o intuito de compreender os impactos económicos, ambientais e sociais associados a cada, e como se comparam. Além disso, a literatura industrial e científica revelou que dos imensos *designs* de MSRs existentes, os que utilizam combustível nuclear líquido, sais de fluoreto e um moderador de grafite no ciclo fechado são os que se encontram mais perto de comercialização, sendo chamados de Reatores de Fluoreto de Tório Líquido.

A energia nuclear tem como pilares de desenvolvimento a sustentabilidade, desde a etapa da mineração até à etapa do armazenamento permanente de resíduos nucleares, a segurança do reator, a resistência à proliferação e a acessibilidade económica. A aceitação de qualquer nova tecnologia nuclear depende do grau de satisfação destes objetivos. A comparação económica, ambiental e social foi então realizada para perceber os benefícios que os LFTRs trazem em relação aos PWRs a urânio.

No que toca à mineração, o ciclo de tório apresenta mais-valias significativas. Apesar de não existirem bastantes dados sobre as reservas totais de tório, uma vez que ainda não há procura para esta matéria-prima, as estimativas obtidas apontam para uma quantidade superior de tório, em relação ao urânio. Além disso, o tório que já se encontra minerado é considerado um *by-product* e considerado resíduos da mineração de vários metais e de terras-raras, fazendo com que haja muita pouca necessidade de extrair tório da natureza. Além disso, num futuro eletrificado as terras-raras são um recurso de alta importância, a obtenção do tório com as terras-raras representa uma sinergia. Assim sendo, o tório diminui descomunalmente a quantidade de resíduos e emissões associados à mineração, por virtude da abundância, em comparação com o urânio.

Em relação à fabricação do combustível a ser utilizado nos reatores, o tório também apresenta vantagens económicas e ambientais. Enquanto que o urânio precisa de ser moído, quimicamente alterado para um gás para o processo de enriquecimento, e novamente alterado para um material sólido e resistente ao aumento da temperatura, o tório só precisa de ser liquidificado em mistura com sais. Isto significa que, ao utilizar tório em vês de urânio, diminuem-se consideravelmente e o tempo de fabricação e de qualificação do combustível,

ao mesmo tempo que se diminui os custos de fabricação e elimina-se os gastos energéticos e a quantidade de produtos químicos usados.

Um dos problemas críticos da energia nuclear é a segurança dos reatores, devido aos eventos históricos de Chernobil e Fukushima I. Aqui também, os MSRs, e por extensão, os LFTRs são melhores que os reatores tradicionais. Como os PWRs têm de estar a alta pressão para o funcionarem, necessitam de vários sistemas de segurança ativa que são, por natureza, mais caros, mais complexos e propensos a falhar, enquanto que os LFTRs por funcionarem a pressão atmosférica não precisam de tantos sistemas de contingência em caso de despressurização, sendo que são conceptualizados para incorporar segurança passiva. Assim sendo, isto representa um ganho social significativo e uma redução dos custos do reator.

Foi também analisado o nível de eficiência de cada combustível no seu respetivo ciclo, e conclui-se que o tório apresenta ser superior ao urânio. Para a mesma quantidade de eletricidade gerada, é necessário bastante menos tório natural do que urânio natural, representando um ganho económico e ambiental. Além disso, um LFTR é melhor a converter energia térmica em eletricidade, já que opera a temperaturas bastante mais elevadas do que os PWRs. Estas altas temperaturas permitem também a produção de hidrogénio e outros combustíveis sintéticos, além de ser útil para indústrias tipicamente poluentes, como a metalúrgica e a química, e para a dessalinização de água do mar. Desta forma, o uso direto do calor proveniente de um LFTR também têm um impacto ambiental e social positivo fora do contexto da energia nuclear.

A gestão dos resíduos nucleares também é um tema vital, sendo que o ciclo de tório e o LFTR aparentam ser melhores. Não só um LFTR minimiza a quantidade de resíduos de alto nível, devido ao reprocessamento típico de um ciclo fechado, mas esses resíduos permanecem consideravelmente menos tempo a arrefecer e diminuir os níveis de radiotoxicidade. No entanto, devido ao reprocessamento, maiores volumes de lixo de baixo e médio nível são gerados. Além disso, um LFTR tem a flexibilidade de ser um *burner*, permitindo que se usado para queimar actinídeos e transurânicos, complementando os ciclos nucleares tradicionais.

O ciclo de tório apresenta melhorias ligeiras à resistência da proliferação, já que a presença de ^{232}U torna mais difícil e mais caro aproveitar o ^{233}U obtido a partir do tório para criar armas nucleares, no entanto esse urânio não deixa de ser mais atrativo para uso militar. De

qualquer maneira, a melhor salvaguarda é o não-reprocessamento do combustível irradiado, algo que é comum nos ciclos abertos dos PWRs e efetivamente impossível no ciclo fechado do LFTR.

Por fim, foram estudados os cálculos do LCOE para ambas as tecnologias. Ambos têm estruturas de custos semelhantes e elevados custos de iniciais, no entanto a literatura sugere que, principalmente devido aos menores custos associados aos sistemas complexos de segurança, os LFTRs têm uma menor barreira à entrada em comparação ao PWRs, apesar de continuar a ser elevada. Ademais, o desenvolvimento de um novo tipo de reatores de quarta geração, os *Small Modular Reactors* têm o potencial de diminuir ainda mais os custos de capitais, e podem basear-se tanto nos conceitos do PWR como nos do MSRs.

Em suma, os MSRs a tório são uma tecnologia nuclear certamente mais limpa e sustentável, segura, económica e resistente à proliferação do que os reatores tradicionais. No entanto, ainda existem várias barreiras tecnológicas e regulatórias que precisam de ser superadas antes da comercialização, sendo para tal necessário investir recursos financeiros e tempo. De qualquer maneira, o desenvolvimento desta nova tecnologia é exequível, e os ganhos económicos, ambientais e sociais, juntamente com a simplicidade relativa do *design* de MSR, deveriam justificar o I&D necessário para ultrapassar os restantes desafios. Considerando o futuro descarbonizado e eletrificado que a UE procura florescer, a existência de uma fonte de energia de baixo carbono que fornece eletricidade independentemente das condições atmosféricas e da altura do dia enquanto as renováveis não conseguem, torna-se importante, especialmente considerando o facto de que esta nova tecnologia não teria de desfasar os reatores pré-existentes por completo.

Referências Bibliográficas

Abousahl, S., Carbol, P., Farrar, B., Gerbelova, H., Konings, R., Lubomirova, K., Martin Ramos, M., Matuzas, V., Nilsson, K., Peerani, P., Peinador Veira, M., Rondinella, V., Van Kalleveen, A., Van Winckel, S., Vegh, J. & Wastin, F. (2021). *Technical assessment of nuclear energy with respect to the 'do no significant harm' criteria of Regulation (EU) 2020/852 ('Taxonomy Regulation')*. Luxemburgo, LU: Publications Office of the European Union. https://data.europa.eu/doi/10.2760/665806

Ashley, S. F., Fenner, R. A., Nuttall, W. J., & Parks, G. T. (2015). Life-cycle impacts from novel thorium–uranium-fuelled nuclear energy systems. *Energy Conversion and Management, 101*, 136-150. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.04.041

Ault, T., Krahn, S., & Croff, A. (2017). Comparing the environmental impacts of uranium and thorium-based fuel cycles with different recycle options. *Progress in Nuclear Energy, 100*, 114-34. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2017.05.010

Belyakov, N. (2019). Chapter Twelve - Modern nuclear power plant. In *Sustainable Power Generation: Current Status, Future Challenges and Perspectives*, Academic Press, pp. 291-325. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817012-0.00024-4

Bodansky, D. (2005). *Nuclear Energy: Principles, Practices, and Prospects (Second edition)*. New York: Springer. https://link.springer.com/book/10.1007/b138326

Bunn, M., Fetter, S., Holdren, J. P. & van der Zwaan, B. (2003). *The Economics of Reprocessing vs. Direct Disposal of Spent Nuclear Fuel*. Belfer Center for Science and International Affairs, Harvard Kennedy School: Project on Managing the Atom. https://www.belfercenter.org/publication/economics-reprocessing-vs-direct-disposal-spent-nuclear-fuel

Buttery, N. (2012). 10 - Water cooled thermal reactor designs, operation and fuel cycle. In Crossland, I. (ed.) (2012): *Nuclear Fuel Cycle Science and Engineering*, Woodhead Publishing, pp. 237-277. https://doi.org/10.1533/9780857096388.3.237

Caciuffo, R., Fazio, C., & Guet, C. (2020). Generation-IV nuclear reactor systems. *EPJ Web of Conferences*, *246*(00011). https://doi.org/10.1051/epjconf/202024600011

Chroneos, A., Goulatis, I., Daskalopulu, A., & Tsoukalas, L. H. (2023). Thorium fuel revisited. *Progress in Nuclear Energy*, *164*, 104839. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.104839

Comissão Europeia. (2019). *Pacto Ecológico Europeu*. Bruxelas, BE. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=CELEX:52019DC0640&from=EN

Comissão Europeia (2020). *Regulamento (UE) 2020/852 do Parlamento Europeu e do Conselho de 18 de junho de 2020 relativo ao estabelecimento de um regime para a promoção do investimento sustentável, e que altera o Regulamento (UE) 2019/2088*. Jornal Oficial da União Europeia, L 193. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:32020R0852

Comissão Europeia (2022). *Regulamento Delegado (UE) 2022/1214 da Comissão de 9 de março de 2022 que altera o Regulamento Delegado (UE) 2021/2139 no respeitante às atividades económicas em determinados setores energéticos e o Regulamento Delegado (UE) 2021/2178 no respeitante à divulgação pública específica relativa a essas atividades económicas*. Jornal Oficial da União Europeia, L 188. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/ALL/?uri=CELEX%3A32022R1214

Comissão Europeia (2025). *Programa Indicativo Nuclear apresentado em cumprimento do artigo 40.º do Tratado Euratom para o parecer do Comité Económico e Social Europeu*. Bruxelas, BE. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52025DC0315

Comissão Europeia (2026). *ELECTRIFICATION ACTION PLAN*. Bruxelas, BE. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52026DC0595

Delagnes, A., Madelain, M., Buisson, R., Toinin, J. P., Doriot, S., Ribis, J., Malacarne, R., Spartacus, G., Bacroix, B., & de Carlan, Y. (2026). A new nickel-based alloy for molten salt reactors (MSR) using chloride salts: Design and characterization. *Journal of Nuclear Materials*, *620*(156353). https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2025.156353

Department of Atomic Energy (2026, abril 7). *Prototype Fast Breeder Reactor at Kalpakkam, Tamil Nadu attains First Criticality*. Press Information Bureau. https://www.pib.gov.in/PressReleasePage.aspx?PRID=2249537&reg=3&lang=2

Emblemsvåg, J. (2022). Safe, clean, proliferation resistant and cost-effective Thorium-based Molten Salt Reactors for sustainable development. *International Journal of Sustainable Energy, 41(6)*, 514–537 https://doi.org/10.1080/14786451.2021.1928130

European Energy Agency (2026a). The importance of the EU Emissions Trading System in climate change mitigation. Obtido de: https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/climate-change-mitigation-reducing-emissions/the-importance-of-eu-ets-in-climate-change-mitigation em 03.09.2026.

European Energy Agency (2026b). Primary and final energy consumption in the European Union. Obtido de: https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/primary-and-final-energy-consumption?activeAccordion=546a7c35-9188-4d23-94ee-005d97c26f2b em 03.09.2026.

Erbach, G. (2025). *Updating the EU's Nationally Determined Contribution to the Paris Agreement*. European Parliamentary Research Service. https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2025/772893/EPRS_ATA(2025)772893_EN.pdf

Euratom Supply Agency (2026). *ANNUAL REPORT 2025*. Luxemburgo, LU: Serviço das Publicações da União Europeia. https://euratom-supply.ec.europa.eu/document/download/f5fd9141-e7ae-4074-8c83-9a57f55446a7_en?filename=ESA_Annual_Report_2025.pdf

Eurostat (2025a). *Energy Statistics - An overview*. Obtido de https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview em 03.09.2026

Eurostat (2025b). *Nuclear energy statistics*. Obtido de: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Nuclear_energy_statistics#Enrichment_capacity em 03.09.2026

Eurostat (2026). *Energy in Europe – 2026 edition*. Obtido de: https://ec.europa.eu/eurostat/web/interactive-publications/energy-2026#types-energy-consumed em 03.09.2026

de Freitas Neto, L. G., Freire, L. O., dos Santos, A., de Andrade, D. A., (2021). Potential advantages of molten salt reactor for merchant ship propulsion. *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, *9*(2B), 1–18. https://doi.org/10.15392/bjrs.v9i2b.1466.

GEN IV International Forum (s.d.). *Molten salt reactors (MSR)*. Obtido de: https://www.gen-4.org/generation-iv-criteria-and-technologies/molten-salt-reactors-msr em 03.09.2026

Haas, D., Hugon, M., & Verwerft, M. (2015). Overview of European Experience with Thorium Fuels. In Nakajima, K. (ed.) (2015): *Nuclear Back-end and Transmutation Technology for Waste Disposal*, Kyoto, Japan: Springer, pp. 197-204. DOI: 10.1007/978-4-431-55111-9_18.

Hargraves, R., & Moir, R. (2010). Liquid Fluoride Thorium Reactors: An old idea in nuclear power gets reexamined. *American Scientist, 98*(4), 304-313. https://www.jstor.org/stable/27859537

Humphrey, U. E., & Khandaker, M. U. (2018). Viability of thorium-based nuclear fuel cycle for the next generation nuclear reactor: Issues and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *97*, 259-275. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.019

International Atomic Energy Agency (2005). *Thorium fuel cycle – Potential benefits and challenges* (IAEA-TECDOC-1450). Viena, AT. https://www.iaea.org/publications/7192/thorium-fuel-cycle-potential-benefits-and-challenges

International Atomic Energy Agency (2023). *Status of Molten Salt Reactor Technology* (Technical Reports Series No. 489). Viena, AT. https://www.iaea.org/publications/14998/status-ofmolten-salt-reactor-technology

Jenet, A., Souček, P., Nilsson, K.-F., Caverzan, A., Capelli, E., Paviet, P., Rose, M., Holcomb, D., Smith, A., Křepel, J., Taucer, F., & Beneš, O. (2025). Advancing molten salt reactor technologies: Prioritizing standardisation needs and bridging gaps, *Nuclear Engineering and Design, 445*(114495). https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.114495

Juhasz, A., Rarick, R., & Rangarajan, R. (2009). High Efficiency Nuclear Power Plants Using Liquid Fluoride Thorium Reactor Technology. *7th International Energy Conversion Engineering Conference*, *Denver, Colorado.* https://doi.org/10.2514/6.2009-4565

Juhasz, A.J. (2014, julho 28-30). *Gas Turbine Energy Conversion Systems for Nuclear Power Plants applicable to LiFTR "Liquid Fluoride Thorium Reactor" Technology* [Apresentação de Conferência]. Propulsion & Energy Forum 2014, Cleveland, Ohio, US. https://ntrs.nasa.gov/citations/20140016755

Kamei, T., & Hakami, S. (2011). Evaluation of implementation of thorium fuel cycle with LWR and MSR. *Progress in Nuclear Energy*, *53*(7), 820-824. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2011.05.032

Kang, J., & von Hippel, F. N. (2001). U-232 and the Proliferation-Resistance of U-233 in Spent Fuel. *Science & Global Security*, *9*(1), 1-32. https://doi.org/10.1080/08929880108426485

Kelly, J. E. (2014). Generation IV international forum: A decade of progress through international cooperation. *Progress in Nuclear Energy*, *77*, 240-246. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.02.010

Krepel, J. (2025). *Overview and Update of MSR Activities within GIF* [Webinar]. GIF Education and Training Working Group. https://www.gen-4.org/resources/webinars/education-and-training-series-97-overview-and-update-msr-activities-within-gif

LeBlanc, D. (2010). Molten salt reactors: A new beginning for an old idea. *Nuclear Engineering and Design*, *240*(6), 1644-1656. https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2009.12.033

Lee, D. S. (2018) *Neutron production with thorium fuel in accelerator driven subcritical reactors* [Tese de Doutoramento, Universidade de Huddersfield (Inglaterra)]. https://www.researchgate.net/publication/326332052_Neutron_production_with_thorium_fuel_in_accelerator_driven_subcritical_reactors

Luca, N., Woods, R., Crombleholme, S., Vandanapu, H., Beer, C., Sobel, J., Steenberg, T. & Patel, M. K. (2026). Effect of salt purity on the corrosion of 316 L SS: Long-term studies in molten FLiNaK and ThF4 – LiF. *Journal of Nuclear Materials, 622*(156398). DOI: 10.1016/j.jnucmat.2025.156398

Marshall, J. L. & Marshall, V. R. (2001). Rediscovery of the Elements: Thorium-Løvøya, Langesundfjord, Norway. *The Hexagon, 93*, 70-73. Obtido de: https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc111179/m1/1/ em 03.09.2026.

McFarlane, J. (2024). Cradle to grave: The importance of the fuel cycle to molten salt reactor sustainability. *Frontiers in Nuclear Engineering*, *3*, 1335980. https://doi.org/10.3389/fnuen.2024.1335980

Meija, J., Coplen, T. B., Berglund, M., Brand, W. A., De Bievre, P., Gröning, M., Holden, N. E., Irrgher, J., Loss, R. D., Walczyk, T. & Prohaska, T. (2016). Isotopic compositions of the elements 2013 (IUPAC Technical Report). *Pure Appl. Chem. 88*(3), 293-306. DOI: 10.1515/pac-2015-0503

Netter, P. (2012). 16 - Reprocessing of spent oxide fuel from nuclear power reactors. In Crossland, I. (ed.) (2012): *Nuclear Fuel Cycle Science and Engineering*. Woodhead Publishing. DOI: 10.1533/9780857096388.4.459

Noori-kalkhoran, O., Jain, L., Derrer-Merk, E. & Merl, B. (2026). Molten salt nuclear reactors: A review of challenges and promises. *Progress in Nuclear Energy, 199*(106472). https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2026.106472.

Nuclear Engineering International (2025, abril 22). *China refuels thorium reactor without shutdown*. Obtido de https://www.neimagazine.com/news/china-refuels-thorium-reactor-without-shutdown/ em 03.09.2026.

Nuclear Regulatory Comission (2021, março 9). *Capacity factor*. Obtido de: https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/capacity-factor-net em 03.09.2026.

Nuclear Regulatory Comission (2026a, agosto 27). *Fertile material*. Obtido de: https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/fertile-material em 03.09.2026

Nuclear Regulatory Comission (2026b, agosto 27) *Fissile material*. Obtido de: https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/fissile-material em 03.09.2026

Oettingen, M. (2019). Modelling of the reactor cycle cost for thorium-fuelled PWR and environmental aspects of a nuclear fuel cycle. *Geology, Geophysics and Environment, 45*(3), 207–217. https://doi.org/10.7494/geol.2019.45.3.207

Pioro, I. (2020). Track 2: Current Status and Future Developments in the Nuclear Power Industry of the World. In *Climate Change and the Role of Nuclear Power: Proceedings of an International Conference Organized by the International Atomic Energy Agency in Cooperation with the OECD Nuclear Energy Agency and held in Vienna, 7-11 October 2019, International Atomic Energy Agency* (pp. 100-104). https://www.iaea.org/publications/14763/climate-change-and-the-role-of-nuclear-power

radioactivity.eu.com. (2020). *Plutonium-239 formation*. Obtido de: https://radioactivity.eu.com/articles/nuclearenergy/plutonium_239_formation em 03.09.2026.

Richards, J., Sabharwall, P., & Memmott, M. (2017). Economic comparison of current electricity generating technologies and advanced nuclear options. *The Electricity Journal*, *30*(10), 73-79. https://doi.org/10.1016/j.tej.2017.11.005

Ritchie, H. (2020, fevereiro 10). *What are the safest and cleanest sources of energy?* OurWorldinData.org. Obtido de: https://ourworldindata.org/safest-sources-of-energy em 03.09.2026

Ritchie, H. (2022, junho 16). *How does the land use of different electricity sources compare?* OurWorldinData.org. Obtido de: https://ourworldindata.org/land-use-per-energy-source em 03.09.2026

Roser, M. (2020, dezembro 1). *Why did renewables become so cheap so fast?*. OurWorldinData.org. Obtido de: https://ourworldindata.org/cheap-renewables-growth em 03.09.2026

Samalova, L., Chvala, O., & Maldonado, G. I. (2017). Comparative economic analysis of the Integral Molten Salt Reactor and an advanced PWR using the G4-ECONS methodology. *Annals of Nuclear Energy, 99*, 258-265. https://doi.org/10.1016/j.anucene.2016.09.001

Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks (2021). *SCHEER review of the JRC report on Technical assessment of nuclear energy with respect to the 'do no significant harm' criteria of Regulation (EU) 2020/852 ('Taxonomy Regulation')*. Obtido de: https://finance.ec.europa.eu/system/files/2021-07/210629-nuclear-energy-jrc-review-scheer-report_en.pdf em 03.09.2026

Serp, J., Allibert, M., Beneš, O., Delpech, S., Feynberg, O., Ghetta, V., Heuer, D., Holcomb, D., Ignatiev, V., Kloosterman, J. L., Luzzi, L., Merle-Lucotte, E., Uhlíř, J., Yoshioka, R. & Zhimin, D. (2014). The molten salt reactor (MSR) in generation IV: Overview and perspectives. *Progress in Nuclear Energy, 77*, 308-319. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.02.014.

Szydło, B. (2025). *REPORT on the security of energy supply in the EU (2025/2055(INI))* Committee on Industry, Research and Energy. Obtido de: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-10-2025-0121_EN.pdf

United Nations Economic Commission for Europe (2022). *Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources.* Geneva, CH. https://unece.org/sites/default/files/2022-04/LCA_3_FINAL%20March%202022.pdf

United Nations Environment Programme (2025). *Emissions Gap Report 2025: Off target - Continued collective inaction puts global temperature goal at risk.* Nairobi, KE. https://doi.org/10.59117/20.500.11822/48854

United Nations Framework Convention on Climate Change. (2015). *Paris Agreement.* https://unfccc.int/sites/default/files/resource/english_paris_agreement.pdf

United Nations Framework Convention on Climate Change (2025). *SUBMISSION BY THE DANISH PRESIDENCY OF THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION AND THE EUROPEAN COMMISSION ON BEHALF OF THE EUROPEAN UNION AND ITS MEMBER STATES.* https://unfccc.int/sites/default/files/2025-11/DK-2025-11-05%20EU%20NDC.pdf

United Nations Treaty Collection (s.d.). *7. d) Paris Agreement.* Obtido de: https://treaties.un.org/pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-7-d&chapter=27&clang=_en em 03.09.2026

U. S. Nuclear Energy Research Advisory Committee & Generation IV International Forum (2002). *A technology roadmap for generation iv nuclear energy systems.* https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2013-09/genivroadmap2002.pdf

Wang, Y., Zhu, C., Zhang, M. & Zhou, W. (2024). Chapter 9 - Molten salt reactors. In Wang, J., Talabi, S. & Sama Bilbao y Leon, S. (eds.) (2024): *Nuclear Power Reactor Designs: From History to Advances*. Academic Press, pp. 163-183. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99880-

Wojciechowski, W., Štreimikienė, D., Wojciechowski, A., & Bilan, Y. (2023). The role of nuclear energy in low carbon energy transition: Evidence from panel data approach in EU. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(59), 124353-124373. https://doi.org/10.1007/s11356-023-30827-8

World Nuclear Association (2024) *Thorium*. Obtido de: https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/thorium em 03.09.2026

World Nuclear Association (2025a). *Global Nuclear Industry Performance*. Obtido de: https://world-nuclear.org/our-association/publications/world-nuclear-performance-report/global-nuclear-industry-performance em 03.09.2026

World Nuclear Association (2025b). *Molten Salt Reactors*. Obtido de: https://world-nuclear.org/our-association/publications/world-nuclear-performance-report/global-nuclear-industry-performance em 03.09.2026

World Nuclear Association (2025c). *Nuclear Fuel Cycle Overview*. Obtido de: https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/nuclear-fuel-cycle-overview em 03.09.2026

World Nuclear Association (2026a). *Economics of Nuclear Power*. Obtido de: https://world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power em 03.09.2026

World Nuclear Association (2026b). *Mixed Oxide (MOX) Fuel*. Obtido de: https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/mixed-oxide-fuel-mox em 03.09.2026

World Nuclear Association (2026c). *Nuclear Power Reactors*. Obtido de: https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-power-reactors/overview/nuclear-power-reactors em 03.09.2026

World Nuclear Association (2026d). *Outline History of Nuclear Energy*. Obtido de: https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/outline-history-of-nuclear-energy em 03.09.2026

World Nuclear Association (2026e). *Radioactive Waste – Myths and Realities*. Obtido de: https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-waste/radioactive-wastes-myths-and-realities 03.09.2026

World Nuclear Association (2026f). *Review of nuclear energy*. Obtido de: https://world-nuclear.org/our-association/publications/world-nuclear-outlook-report/chapter-1-review-of-nuclear-energy em 03.09.2026

World Nuclear Association (2026g). *Uranium Enrichment*. Obtido de: https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/uranium-enrichment em 04.09.2026

World Nuclear Association (2026h). *What is Uranium? How Does it Work?* Obtido de: https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/what-is-uranium-how-does-it-work em 03.09.2026

World Nuclear News (2025, novembro 4). *Chinese molten salt reactor achieves conversion of thorium-uranium fuel*. Obtido de: https://www.world-nuclear-news.org/articles/chinese-msr-achieves-conversion-of-thorium-uranium-fuel em 03.09.2026