
**A inclusão das novas tecnologias de geração de energia
nuclear nas políticas energéticas europeias**

Filipe Amaral Vaz

Dissertação

Mestrado em Economia e Gestão do Ambiente

Orientado por
Susana Maria Almeida da Silva

Setembro 2022

Agradecimentos

Quero reservar este espaço para agradecer em primeiro lugar à minha família, à minha mãe Rosa, que com amor sempre me soube compreender e motivar, ao meu pai Luís que me conseguiu guiar, com os seus conselhos pertinentes, a tirar o melhor partido de cada situação, ao meu irmão Pedro que desde sempre foi o meu melhor amigo e aos meus tios Lucrécia e José que desde sempre desempenharam um papel fundamental no meu desenvolvimento pessoal e académico. A todos vós obrigado por me darem a oportunidade de estudar a temática do Ambiente e de desenvolver um trabalho com enorme significado para mim, uma vez que esta área sempre foi a minha vocação.

Em segundo lugar gostaria de agradecer à minha orientadora, Professora Susana Silva que apesar da minha intermitência na realização desta dissertação, foi sempre prestável a ajudar-me e que desde início acreditou que a minha ideia era pertinente nos dias de hoje e que me desafiou a convencê-la que a temática da Energia Nuclear era de facto algo importante em explorar face aos desafios da sustentabilidade ambiental e energética que atravessamos.

Gostaria também de deixar um comentário de apreciação e agradecimento aos meus amigos em geral, com especial ênfase ao João Carvalho e José Campos, com os quais cresci e vi crescer, que sempre foram uma peça fundamental para o alcance dos meus objetivos e com os quais sinto uma ligação profunda de amizade. Aos restantes amigos, um obrigado por todas as horas de conversa, discussão e carinho que me deram ao longo de todos os anos que passámos juntos. À minha parceira, Carolina, um obrigado do tamanho do mundo por teres aparecido na minha vida e me dares a motivação necessária para terminar este trabalho.

Resumo:

As alterações climáticas são o maior desafio que a humanidade enfrentará nas próximas décadas, uma vez que a estabilidade do planeta e dos seres humanos dependem diretamente delas. Sendo que o maior causador de instabilidade do clima são as emissões de gases com efeito de estufa, e dado que a maior fatia das emissões de gases com efeito de estufa da União Europeia deriva do setor energético, nomeadamente derivados da queima de combustíveis fósseis, é relevante procurar compreender quais as que existem para que possamos depender cada vez menos destas fontes de energia e possamos transitar para uma economia livre de carbono de modo que o futuro das próximas gerações não seja comprometido.

Neste sentido, este estudo procura dar uma nova perspetiva sobre a Energia Nuclear e as suas novas tecnologias, como alternativa viável para limitar estas emissões prejudiciais para a atmosfera na União Europeia, uma vez que esta fonte de energia primária é livre de carbono, possui reduzidas externalidades negativas quando utilizada de forma eficiente e controlada, e permite aumentar a segurança energética, uma vez que permite produzir grandes quantidades de energia consoante a procura, a um custo marginal reduzido.

Foi analisado o atual contexto e políticas energéticas da União Europeia, passando por uma visão geral da Energia Nuclear desde a sua proliferação até às tecnologias recentes, de modo a entender se existe espaço para que estas possam ser incluídas na estratégia de alcançar o cenário de neutralidade carbónica proposto pela Comissão Europeia até 2050.

Concluiu-se que as novas tecnologias de geração nuclear constituem uma oportunidade real de reduzir as emissões de CO₂ da União Europeia e fazer com que o sistema energético se torne cada vez mais descarbonizado, já que é possível produzir grandes quantidades de energia, calor e também hidrogénio com recurso a estas tecnologias e fazê-lo de uma forma eficiente em termos de custos, de espaço e com reduzidos impactos ambientais ao mesmo tempo que se fortalece a independência energética, posta em causa recentemente com os acontecimentos bélicos no leste Europeu.

Palavras-chave: Energia Nuclear, União Europeia, Política Energética, Segurança Energética

Abstract

Climate change is probably the biggest challenge that humanity may face in the coming decades, since the stability of the planet and human beings directly depend on it. Since the biggest cause of climate instability are greenhouse gas emissions, and given that the largest share of greenhouse gas emissions in the European Union derives from the energy sector, namely those derived from the burning of fossil fuels, it is important to try to understand which ones alternatives exist so that we can depend less and less on these energy sources and can move towards a carbon-free economy so that the future of the next generations is not compromised.

In this sense, this study seeks to give a new perspective on the production of Nuclear Energy and its new technologies, as a viable alternative to limit these harmful emissions to the atmosphere in the European Union, since this primary energy source is carbon-free, it has reduced negative externalities when used in an efficient and controlled manner, and allows for increased energy security, since it allows the production of large amounts of energy according to demand, at a reduced marginal cost.

With this objective, the current context and energy policies of the European Union were analysed, going through an overview of Nuclear Energy from its proliferation to recent technologies, in order to understand if there is space in which these can be included in the strategy to achieve the carbon neutrality scenario proposed by the European Commission until 2050.

In general, it was concluded that the new technologies of nuclear generation represent a real opportunity to reduce the CO₂ emissions of the European Union and to make the energy system become increasingly decarbonized, since it is possible to produce large amounts of energy, heat and also hydrogen using these technologies and to do it in an efficient way in terms of costs, space and with reduced environmental impacts, while strengthening energy independence, which has recently been called into question by the war events in Eastern Europe .

Keywords: Nuclear Energy, European Union, Energy Policy, Energy Security

Índice

1 - Introdução	8
1.1- Principais Fontes de Emissões de Gases de Efeito de Estufa (GEE)	9
1.2 – A Energia Nuclear como alternativa de mitigação às alterações climáticas	10
1.3 - Visão Geral das Quotas de Nuclear a Nível Mundial.....	11
1.4 - Investimento e riscos associados à Energia Nuclear	13
1.5 - Perspetivas de futuro da Energia Nuclear	14
2 - Plano estratégico para a mitigação das alterações climáticas na EU	17
2.1 - Tendências do sistema energético da UE / Mix energético europeu.....	18
2.2 - Energia Primária Produzida na UE.....	20
2.3 - Consumo de energia na UE.....	20
2.4 - Dependência Energética da UE	22
3 - O Papel da Energia Nuclear	24
3.1 - Evolução Histórica da Energia Nuclear	24
3.2 - Características do Setor da Energia Nuclear	27
3.2.1 - Custos associados à Energia Nuclear.....	28
3.2.2 - Outras variáveis com influência no setor da energia nuclear	30
3.3 - Tecnologia predominante	31
3.4 - Tecnologias emergentes de geração de Energia Nuclear	35
3.4.1 - Melhorias de segurança	36
3.4.2 - Redução dos resíduos nucleares	37
3.4.5 - Dimensão e Versatilidade.....	40
3.4.6 - Impactos Ambientais.....	41
4 - Evolução da política energética e nuclear na União Europeia.....	43

4.1- Principais políticas energéticas e de clima da UE	43
4.2 - Política Nuclear da União Europeia.....	47
4.2.1 - Taxonomia da Energia Nuclear na UE.....	49
5 - Conclusão	53

Índice de figuras

Figura 1 - Geração total de eletricidade de baixo-carbono entre 1971-2018 (EIA, 2019).....	12
Figura 2 - Energia primária por fonte entre 1990-2019 (Eurostat)	20
Figura 3 - Energia total consumida por fonte. Fonte: Eurostat	21
Figura 4 - Reator Chicago Pile-1	26
Figura 5 - Variação dos custos das várias formas de geração de eletricidade em função da taxa de desconto. (World Nuclear Association , 2021).	29
Figura 6 - Evolução das Tecnologias de Geração Nuclear	32
Figura 7 - Distribuição dos diferentes tipos de reatores nucleares.....	32
Figura 8 - Desenho técnico de um reator PWR. (World Nuclear Association, 2022)	33
Figura 9 - Desenho técnico de um reator BWR. (World Nuclear Association, 2022).....	33
Figura 10 - Investimento no setor energético por fonte (2005-2018) (IEA, 2019).....	34
Figura 11 - Produção de energia nuclear (1965 - 2021) (Our World in Data, 2021).....	35
Figura 12 - Tamanho comparativo dos vários modelos de reator nuclear	41
Figura 13 - Elementos do EGD (European Commission , 2019)	45
Figura 14 - Share de Energia Nuclear na produção de eletricidade nos Estados Membros (2007-2017) (IEA, 2019a)	48
Figura 15 - Preço médio da Eletricidade (Mwh) em alguns países da UE (2020-2022)	52

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Custo comparativo (LCOE) entre uma central nuclear avançada com centrais de carvão e gás natural de ciclo combinado (Robock, 2014, p.18).....	39
Tabela 2 - Reatores Nucleares existentes e projetos de construção.	49

1 - Introdução

O período em que vivemos foi cunhado no início dos anos 80 pelo ecologista Eugene F. Stoermer como o Antropoceno, precisamente por representar o período da história em que a humanidade começou a exercer um efeito notável no sistema vivo que é o Planeta Terra, tendo-se iniciado, em 1712 com a invenção do primeiro motor a vapor alimentado a carvão, por Thomas Newcomen (Lovelock, 2014).

Durante o Antropoceno, têm sido observados aumentos consideráveis das concentrações de Gases de Efeito de Estufa (GEE) que torna inequívoca a influência da ação humana no aquecimento da temperatura média da atmosfera, oceanos e superfície terrestre, provocando mudanças rápidas na criosfera e biosfera do planeta.

Desde 1750, os aumentos significativos dos GEE são atribuídos diretamente à ação humana e levaram a que cada umas das últimas quatro décadas tenham sido sucessivamente mais quentes que as anteriores resultando num aumento comparativo entre 0.84-1.10°C nas duas primeiras décadas do Séc. XXI, face ao ano de 1900 (IPCC, 2018). De acordo com o IPCC, a temperatura média da atmosfera foi entre 2011 e 2020 cerca de 1.09°C mais elevada do que entre 1850 e 1900 tendo, os oceanos e a superfície terrestre aumentado 0.88°C e 1.09°C respetivamente, no mesmo registo comparativo, sendo este o maior aumento da temperatura da atmosfera dos últimos 2000 anos.

As alterações climáticas causadas pelas emissões de GEE estimam-se que sejam irreversíveis nos próximos séculos a milénios, especialmente nos oceanos, calotas polares e no nível médio da água do mar devido sobretudo à incrementada acidificação e desoxigenação da mesma (IPCC, 2021) podendo levar a que as águas subam entre 0.98 e 1.88m, de acordo com os cenários mais pessimistas previstos até 2100. Este cenário implica, por exemplo, grandes danos nas zonas costeiras que representam a área geográfica do globo onde mais de metade da população mundial vive, albergando aproximadamente 3 mil milhões de pessoas, número que tenderá a duplicar até 2025 (Greel, 2003).

Os efeitos sociais, económicos e ambientais resultantes destas alterações serão cada vez mais adversos com o passar do tempo se não forem feitos esforços para cumprir os objetivos traçados no Acordo de Paris (COP-21) de limitar o aquecimento entre 1.5-2°C. Este limite de aquecimento foi pragmaticamente assumido pelas partes presentes na conferência e é dado como o máximo para que as consequências inevitáveis das alterações climáticas sejam

as consideradas “aceitáveis” e é, ao mesmo tempo, um objetivo desafiante e alcançável até 2100 apesar de no relatório publicado pelo Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (IPCC, 2018) se considerar que o objetivo principal deverá limitar o aquecimento até 1.5°C, onde 0.5°C de diferença para o teto máximo fará uma diferença significativa em relação aos efeitos e ao número de pessoas que a nível global sofrerão dos impactos das Alterações Climáticas.

Este objetivo será alcançável se, de acordo com os modelos desenvolvidos, for atingido um cenário de Zero Emissões até 2050, sendo que nos países industrializados este objetivo deve ser atingido até 2040 e, para esse objetivo, é necessário que as fontes de energia primária de baixo carbono prevaleçam sobre os combustíveis fósseis e as substituam para limitar as emissões de CO₂, como é o caso das Energias Renováveis e a Energia Nuclear, em particular (Nikolaus Muellner, 2021).

1.1 - Principais Fontes de Emissões de Gases de Efeito de Estufa (GEE)

O século XXI fica marcado por ser o século em que as emissões de GEE mais cresceram durante o período já conhecido como o Antropoceno. Neste período o aumento das emissões de GEE, com especial ênfase do CO₂, está altamente relacionado com a ascensão da China (29.7% *share* global de GEE) e Índia (6.9% *share* global de GEE) como potências económicas mundiais devido à sua rápida industrialização e ascensão como mercados emergentes na economia mundial, ocupando ambos países a 1ª e 4ª posição no top dos países mais poluidores do mundo, apenas separadas pelos Estados Unidos da América (13.9% *share* global de GEE) e os países que formam a União Europeia (UE-28) (9.1% *share* global de GEE) (BP, 2020).

Estes países, juntos com a Rússia e o Japão formam o grupo de países mais poluidores do mundo e concentram 51% da população mundial, 65% do PIB e consomem anualmente 80% dos recursos fósseis, que se refletem numa quota de 67.5% das emissões totais de CO₂ relacionadas com a utilização destes recursos nas suas economias (Crippa et al., 2019).

As evidências científicas, como visto acima, estabelecem uma relação direta entre as alterações climáticas e as emissões de GEE derivadas da atividade humana. De acordo com o World Resources Institute (WRI), no ano de 2016 as emissões de GEE a nível mundial

foram cerca de 49.4 Gt CO₂, sendo 65% destas emissões derivadas ao consumo energético nos setores dos transportes, produção de eletricidade e edifícios, sendo os restantes 35% atribuídos à agricultura, processos industriais, gestão da floresta e de resíduos (BP, 2020).

Em relação às emissões de CO₂ resultantes do setor energético, que é o foco do presente estudo, com ênfase na energia nuclear como solução para a sua redução, podemos estabelecer uma relação entre estas mesmas emissões e o consumo de energia primária das várias fontes de geração de energia como o petróleo, carvão, gás natural, nuclear e outras renováveis como eólica, solar, hídrica.

No ano de 2020, o consumo de energia primária contrariou a tendência dos anos anteriores devido à paralisação temporária da economia mundial causada pela pandemia da Covid-19, tendo decrescido cerca de 8% face ao ano anterior. Apesar deste decréscimo em 2020, causado sobretudo por uma queda mais acentuada da atividade económica na Europa, a tendência manteve-se face aos anos anteriores, tendo sido contabilizado o maior consumo de energia primária na Ásia Oriental com 45,5% do *share* total mundial, seguido dos países mais a Norte do continente Americano (EUA, México e Canada) com 19,4% e os países da União Europeia com 13,9%, em que como mencionado anteriormente, se inserem os países com maiores emissões de GEE no globo (IEA, 2021).

1.2 – A Energia Nuclear como alternativa de mitigação às alterações climáticas

O presente trabalho tem como objetivo analisar a relevância da Energia Nuclear como uma alternativa fiável e económica para mitigação das alterações climáticas, que são aceleradas pelo aumento das emissões de GEE proveniente da queima de combustíveis fósseis. O enquadramento desta investigação encontra-se nos países da União Europeia de forma a entender de que forma a Energia Nuclear se pode incluir na estratégia de política energética para as próximas décadas da UE, uma vez que foram feitos compromissos claros para atingir as metas traçadas de aquecimento global e existem hoje, alternativas de geração nuclear mais eficientes e seguras que poderão ser de interesse público e ambiental ser consideradas na fase de transição de uma economia intensa em carbono para uma economia verde, principalmente a nível energético (Robock, 2014).

O debate sobre a Energia Nuclear é controverso pois, apesar de os países presentes nas COP (Conferência das Partes - ONU) concordarem que limitar as emissões de CO₂ é necessário, não existe consenso nem objetivos claros em relação às medidas concretas para realizar esta ação através da Energia Nuclear uma vez que, por um lado, é uma alternativa real de baixo carbono à produção de eletricidade com poucas externalidades associadas, mas, por outro lado, a opinião pública em relação aos riscos e ao investimento associado excede os benefícios percebidos, fazendo com que se continue a olhar para a Energia Nuclear como algo a desconsiderar.

A temática da Energia Nuclear é particularmente relevante no período de escrita deste trabalho, uma vez que, a instabilidade do conflito armado no leste europeu, com a invasão da Ucrânia pela Federação Russa, coloca em causa a segurança energética da Europa já que, o aglomerado de países membros da União Europeia lidera o ranking de maiores importadores de energia, com 60% de dependência energética, a um custo total anual de 350 mil milhões de euros (World Nuclear Association , 2022), sendo que grande parte desta energia importada deriva de combustíveis fósseis provenientes de solo russo, como será analisado em mais detalhe no Capítulo 2.

O facto de a Taxonomia da Energia Nuclear na União Europeia ter sido alterada de ser considerada uma fonte de energia não sustentável para passar a ser considerada como “verde”, abre novamente oportunidades para este setor, como veremos no Capítulo 4, nomeadamente ao nível de financiamento publico e privado na pesquisa, desenvolvimento e aplicação de novas tecnologias de geração de Energia Nuclear que, nas últimas décadas, tem crescido a um ritmo baixo (BBC, 2022).

1.3 - Visão Geral das Quotas de Energia Nuclear a Nível Mundial

A energia nuclear é, desde a sua proliferação, uma componente do mix energético que ajuda a reduzir as emissões prejudiciais de GEE que provêm de outras formas de produção de energia à base de combustíveis fósseis, nomeadamente do carvão e do petróleo, que hoje são dominantes (Robock, 2014). A percentagem de energia nuclear produzida em 2018 constituía mundialmente cerca de 10% de todo o fornecimento de eletricidade a nível global e, em média, em economias desenvolvidas este *share* representa 18% e é a maior fonte de produção

de eletricidade de baixo carbono (IEA, 2019), apesar de, nos últimos anos, ter diminuído a produção nestes países uma vez que as centrais existentes atualmente se encontram antiquadas, datando dos anos 70 e 80, o que tem retardado o processo de inclusão da energia nuclear na transição energética, ao contrário das energias renováveis Solar, Eólica e Hídrica.

Em Maio de 2019, existiam 452 reatores nucleares em operação a nível global distribuídos por 31 países e encontram-se principalmente concentrados em economias desenvolvidas e países industrializados, resultando numa capacidade produtiva total de 400 gigawatts (GW) (IEA, 2019). Em 2018, a energia nuclear foi responsável pelo fornecimento de mais de metade da eletricidade produzida em França, na Eslováquia e Hungria que contribuíram para que o *share* de eletricidade produzida na União Europeia de origem nuclear tenha sido de 25% nesse ano. Nos Estados Unidos da América (EUA) a percentagem de eletricidade produzida com recurso à reação de fissão nuclear representa 20% enquanto que no Japão este *share* é de 5%, tendo diminuído drasticamente após o desastre de Fukushima, que levantou questões sobre a segurança da produção de energia nuclear, em 2011 (IEA, 2019).

A energia nuclear representa, nos últimos 50 anos, a maior fonte de produção de eletricidade de baixo-carbono em economias industrializadas segundo os dados da IEA, tendo produzido um total de 76000 TWh (Terawatts hora) de eletricidade livre de emissões no período entre 1971 e 2018, representando 40% de toda a eletricidade produzida com baixo nível de emissões de GEE em 2018, tendo nesse ano totalizado cerca de 10 vezes a produção de eletricidade produzida a partir do vento e do sol combinadas (IEA, 2019).

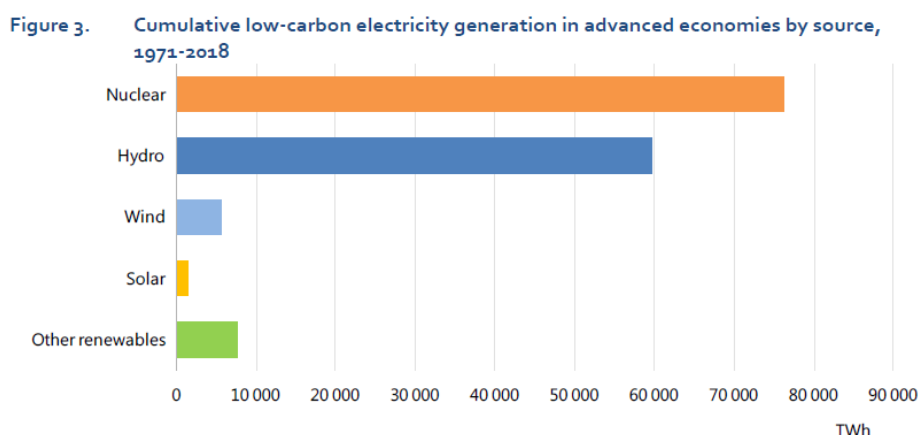


Figura 1 - Geração total de eletricidade de baixo-carbono entre 1971-2018 (IEA, 2019)

Para além do argumento da redução evidente de emissões de CO₂ a favor da energia nuclear, a segurança energética é outro ponto forte que a energia nuclear possui para suportar o seu crescimento e investimento, uma vez que pode contribuir para a mesma de diferentes formas: (IEA, 2019, p. 14)

- “A energia nuclear permite maior diversidade na oferta energética de um país, que para países que possuem menores reservas de recursos naturais é vantajoso, uma vez que reduz a necessidade de importações de recursos não-renováveis;
- O baixo custo dos recursos nucleares faz com que os custos operacionais das centrais sejam menos suscetíveis à volatilidade do preço dos combustíveis fósseis, mantendo-se mais ou menos constantes durante a vida útil de produção;
- A energia nuclear permite que as redes elétricas se tornem mais seguras e estáveis, nomeadamente em momentos de elevada procura, uma vez que a entrega de eletricidade é feita com elevada rapidez e fiabilidade pois não está dependente de fatores externos como é o caso das Energias Renováveis.”

Apesar destes pontos positivos, existem também riscos associados que não podem ser desconsiderados e que influenciam grandemente a opinião pública, que serão também discutidos nos capítulos seguintes.

1.4 - Investimento e riscos associados à Energia Nuclear

Apesar de vários acidentes ligados à produção de energia nuclear, como os de Three Mile Island (EUA, 1979), Chernobyl (Ucrânia 1986) e Fukushima (Japão, 2011), que causaram grande dispersão de radiação, contaminação de áreas geográficas consideráveis e também de vários ecossistemas, a energia nuclear continua a ser uma fonte de energia limpa capaz de produzir eletricidade de forma fiável, a um custo marginal muito baixo e onde não existem outros impactos associados à produção de energia com base em combustíveis fósseis que são prejudiciais à saúde humana (doenças respiratórias, intoxicações por mercúrio, etc.) e que afetam a estabilidade dos ecossistemas devido à exploração e extração dos recursos (gás, petróleo e carvão), que podem levar a derrames nos lençóis freáticos, trazendo à superfície terrestre outros impactos que podem ter reflexos na saúde humana a longo prazo. (Robock, 2014)

Segundo os dados recolhidos por Robock (Robock, 2014), atualmente, a maior parte das centrais nucleares em funcionamento foram construídas nos anos 60 e 70 e continuam a ter as suas licenças renovadas por mais 20 anos, mesmo quando a tecnologia existente nas mesmas, em termos de capacidade de processamento, é muito inferior quando comparada com centrais recentes, representando grandes ineficiências no longo prazo.

Neste sentido prevê-se que, se as centrais nucleares em funcionamento não sofrerem uma reforma, o *share* de eletricidade produzida com recurso ao nuclear irá gradualmente cair para zero nas próximas décadas já que a tendência tem sido de abrandar a construção de novas centrais, devido sobretudo à dificuldade em competir em termos de custos com outras formas de geração de eletricidade nomeadamente em países com mercados de eletricidade mais liberalizados (IEA, 2019) e também, devido ao facto de que o custo real do carbono ainda é refletido na sua totalidade nos custos de produção de eletricidade de outras fontes, que coloca a energia nuclear em desvantagem competitiva, uma vez que ainda não é reconhecida como livre de carbono por toda a comunidade científica, nem era considerada até recentemente como “verde” em termos de taxonomia.

1.5 - Perspetivas de futuro da Energia Nuclear

Apesar de a energia nuclear ter crescido pouco nas últimas décadas muito devido ao pouco investimento em investigação e desenvolvimento, existe espaço para este tipo de produção de eletricidade crescer devido às preocupações climáticas. Após o desastre de Fukushima, vários países europeus como a Alemanha, anunciaram que iriam reduzir gradualmente a produção de eletricidade com recurso ao nuclear até se tornarem neutros, mas recentemente, à luz da Conferência das Partes em Glasgow (COP-26), foi perceptível uma mudança de tom por parte dos representantes deste país em relação à energia nuclear onde admitiram que a energia nuclear deve ocupar uma posição maior no *share* de eletricidade, levando mesmo a que, em Fevereiro de 2022, a Comissão Europeia tenha proposto passar a classificar a Energia Nuclear como “verde”, abrindo espaço para debate e novo investimento no setor.

Neste sentido é importante ter em conta as novas tecnologias e avanços que existem na energia nuclear e considerar incluí-los em planos futuros, uma vez que existem condições para tornar a produção de eletricidade mais sustentável, mais eficiente em termos de custos

e acima de tudo mais barata para o consumidor final sem impactos adversos no ambiente. Para atingir tal objetivos, existem hoje tecnologias mais avançadas de reatores nucleares conhecidos como *IV Generation Reactors Advanced Nuclear* (Robock, 2014) e os SMR (*Small Modular Reactors*), cujas diferenças técnicas face ao atuais *II* e *III+ Generation Reactors* serão discutidas em maior detalhe posteriormente e que têm ganhos significativos em termos de segurança, menor espaço de instalação, maior versatilidade, melhorias na redução dos resíduos nucleares e aumento de eficiência produtiva que podem vir a provocar uma disrupção no setor nuclear principalmente na União Europeia, acelerando a transição energética neste sentido, mas que, contam ainda com grandes barreiras à sua implementação sobretudo devido aos elevados custos iniciais e amortização dos mesmos a longo prazo, colocando o investimento nestas tecnologias em desvantagem face a outras alternativas renováveis se não existirem incentivos governamentais suficientes (IEA, 2019).

Estas tecnologias, ainda que embrionárias, representam uma real oportunidade de reduzir as emissões de CO₂ e outros GEE uma vez que são de baixo carbono e permitem obter grandes quantidades de eletricidade a um baixo custo marginal sobretudo em países desenvolvidos e industrializados como é o caso da UE e por isso, pretende-se perceber quais são as tendências relativas às políticas energéticas e de que modo estas incluem a energia nuclear no futuro para que as alterações climáticas possam ter o menor impacto possível na forma como vivemos e nos ecossistemas que são fundamentais para a sobrevivência humana.

A questão de investigação da presente dissertação é: “*Será que as novas tecnologias de produção de energia nuclear podem constituir uma alternativa viável e um incentivo aos governos e empresas de incluí-las nas políticas energéticas da União Europeia de forma a atingir as metas da neutralidade carbónica até 2050 e de garantir a sua segurança energética ?*”

Para procurar responder à questão de investigação, foi seguida uma metodologia de investigação descritiva de natureza prática através da análise do *share* energético europeu, assim como do cenário atual das políticas energética da UE com base na legislação enquadrada nos objetivos traçados pela Comissão Europeia para a neutralidade carbónica em 2050, passando por uma análise da energia nuclear e suas características técnicas e económicas recorrendo aos conteúdos bibliográficos existentes sobre o tema, para entender

de que forma as novas formas de geração nuclear poderão ser importantes para a transição energética da UE, uma vez que, é necessária uma mudança de paradigma na forma como é produzida energia para atingir uma redução significativa das emissões de GEE de forma a mitigar as alterações climáticas.

A realização deste trabalho é importante na medida em que as novas tecnologias de geração nuclear estão ainda numa fase embrionária e não existe literatura suficiente do ponto de vista económico e ambiental, que as torne conhecidas como uma alternativa viável para os objetivos da UE de neutralidade carbónica e segurança energética. Neste sentido, pretende-se contribuir com um trabalho introdutório que possa dar a conhecer estas tecnologias à literatura, dando também a conhecer ao legislador e decisor político uma perspetiva diferente sobre a energia nuclear e de que forma esta pode ajudar a atingir os objetivos traçados até 2050.

2 - Plano estratégico para a mitigação das alterações climáticas na UE

A mitigação eficiente dos impactos das alterações climáticas é hoje um dos desafios mais exigentes que os decisores políticos europeus têm na sua agenda. Este desafio passa, como enunciado anteriormente, por limitar o aquecimento da temperatura média do planeta abaixo de 1.5°C, até 2050, através de ações concretas e realistas que tenham por base uma estratégia de longo prazo que seja posta em prática da forma mais suave e continua possível, de modo a limitar os danos sociais e económicos destas medidas (Crippa, 2019).

Neste sentido, o *Pacto Ecológico Europeu*, assinado em 2019 pela Comissão Europeia, constitui uma estratégia de crescimento que visa transformar a União Europeia “numa sociedade equitativa e próspera, dotada de uma economia moderna, eficiente na utilização dos recursos e competitiva” para que, em 2050, tenha zero emissões líquidas de GEE e na qual a riqueza económica gerada não seja diretamente ligada à utilização de recursos fósseis em detrimento do ambiente e do bem-estar da sociedade (Comissão Europeia , 2019).

A concretização deste plano requer investimento e reformas em vários setores económicos como a indústria, infraestruturas, transportes, agriculturas e energia com o objetivo de os tornar cada vez mais limpos de emissões ao longo do tempo, para que o seu impacto em termos de emissões líquidas se vá tornando cada vez menor, e onde a Comissão Europeia admite que apenas a adoção de novas medidas não serão suficientes para garantir o alcance dos objetivos traçados, mas que também é necessário garantir que a legislação e políticas traçadas no *Pacto Ecológico* sejam cumpridas, em cooperação com os Estados Membros.

Atualmente, o compromisso assumido pelos órgãos de soberania europeus assenta na meta de redução das emissões de GEE em, pelo menos, 50% até 2030 passando inicialmente por fixar de forma eficaz o preço do carbono em toda a economia que terá impactos importantes no setor energético pois, desta forma, será possível dar mais peso às energias limpas de emissões em detrimento das fontes de energia primária altamente intensas em carbono para

esse efeito, tendo em conta o risco de fuga de produção que possa existir, para outras localizações do globo com menor ambição ambiental (Comissão Europeia, 2019).

Grande parte dos estudos que contemplam estes objetivos baseam-se nos campos da energia e são fundamentados numa série de cenários prováveis de continua descarbonização do sistema energético europeu entre 2030 e 2050, uma vez que mais de 75% das emissões de GEE da União Europeia estão diretamente relacionadas com a produção e utilização de energia em todos os setores económicos (Hainsch, et al., 2021).

Inicialmente, segundo Hainsch, et al., 2021, a descarbonização do sistema energético focava-se nas questões relacionadas com a segurança energética e com seus custos, porém, com a introdução das Diretivas do *Pacto Ecológico Europeu*, estes objetivos passaram a estar centrados na redução significativa de GEE, uma vez que é essa a motivação das políticas atuais de combate às Alterações Climáticas, colocando assim grande ênfase em aumentar a produção de energias renováveis e outras formas de outras fontes sustentáveis ao menor custo possível e integrando-as de forma inteligente na rede.

Um dos principais cenários previstos no relatório *A Clean Planet for All* (2018) da Comissão Europeia revela que para, em 2030, a UE atingir uma redução de pelo menos 45% das emissões de GEE, em comparação com 1990, é necessário um conjunto de políticas ambientais e energéticas que aumentem a eficiência energética em, pelo menos 32,5% e que se verifique um aumento do *share* de energias renováveis em 32% do consumo de energia final até 2030 ao mesmo tempo que se impõe legislação que acelere a transição do setor dos transportes de modo a reduzir a sua intensidade carbónica.

2.1 - Tendências do sistema energético da UE / Mix energético europeu

De modo a compreender melhor de que modo a União Europeia pretende implementar os objetivos mencionados acima e se a Energia Nuclear pode ser incluída nesse processo, é necessário primeiro olhar para o mix energético deste conjunto de países (em diante referido como EU-27) uma vez que a maior parte das emissões de CO₂ advém da produção e transformação de energia (Attila, et al., 2021). Neste sentido, esta secção do presente estudo pretende analisar quais foram as tendências e objetivos alcançados até 2021 pelos EU-27, entender quais as alterações ao mix energético já postas em prática e quais as previsões de

política energética a implementar nas próximas décadas, nomeadamente de produção de energia elétrica, de modo a atingir os resultados ambicionados à luz do *Pacto Ecológico Europeu*, do *European Green New Deal*, mencionado mais à frente, e dos objetivos traçados na COP-26 de reduzir a pegada de carbono da União e de rumar a uma sociedade mais sustentável para os Europeus.

Durante o período entre o início de 2020 e o fim de 2021 a economia mundial foi impactada pela pandemia Covid-19 sendo por isso demasiado cedo para tirar conclusões concretas sobre se a situação pandémica contribuiu como sendo uma vantagem ou desvantagem para a transição energética que se encontra em curso, existindo ainda uma grande dúvida sobre se os tomadores de decisão política energética avaliam a contingência vivida como uma oportunidade para levar os objetivos de neutralidade carbónica até 2050 em diante, de forma mais acelerada, ou como um custo que acaba por retardar este processo (IEA, 2021).

Apesar de todas estas contingências associadas a um período pandémico sem precedentes, a UE conseguiu atingir algumas metas importantes tendo-se conseguido em 2020, pela primeira vez, fazer com que a produção eletricidade a partir de fontes renováveis tenha ultrapassado a produção com origem em combustíveis fósseis, tornando-se assim a maior fonte de energia produzida na UE, com 38% do *share* total de energia produzida contra 37% com origem fóssil e 25% proveniente de geração nuclear. O período pandémico foi responsável por uma volatilidade violenta dos preços da energia devido à contração da economia mundial e levou a que em certas alturas os preços do petróleo tomassem valores negativos em Março de 2020, perdas estas que acabaram por ser revertidas com um aumento de 230% no mercado grossista numa base anual, impactando o mercado retalhista principalmente por causa do aumento dos combustíveis e gás natural em 11% à data de Setembro de 2021 (European Commission , 2021, p. 3) .

Para melhor compreender o futuro do sistema energético, nos próximos pontos irei apresentar o estado deste sistema desde 1990 até 2019, de acordo com os dados recolhidos do *Eurostat* no artigo *Energy Statistics – an Overview*, em termos de energia primária produzida assim como o estado das importações e exportações e da energia final consumida por setor

na UE e perceber quais as tendências observadas e oportunidades para o futuro no setor da energia.

2.2 - Energia Primária Produzida na UE

A produção de energia primária na UE, em 2019, atingiu um total de 616 milhões de toneladas de barris de petróleo equivalente (Mtoe) com os combustíveis fósseis e a Energia Nuclear a apresentarem uma tendência negativa no *share* total de energia produzida entre 1990-2019 com perdas significativas nomeadamente no gás natural, com uma perda de 49.4%, seguida dos derivados de petróleo com -34.6% e dos combustíveis fósseis sólidos, como o carvão, com -33.2% de *share* neste período e que atingiu assim, em 2019, o valor mais baixo desde 1990 (Eurostat, 2022). Como mostra a Figura 1, esta tendência negativa foi contra balanceada com um aumento da produção de energias renováveis no mesmo período, com um aumento de 48.3%, contando nessa altura com o maior *share* de energia primária produzida na UE.

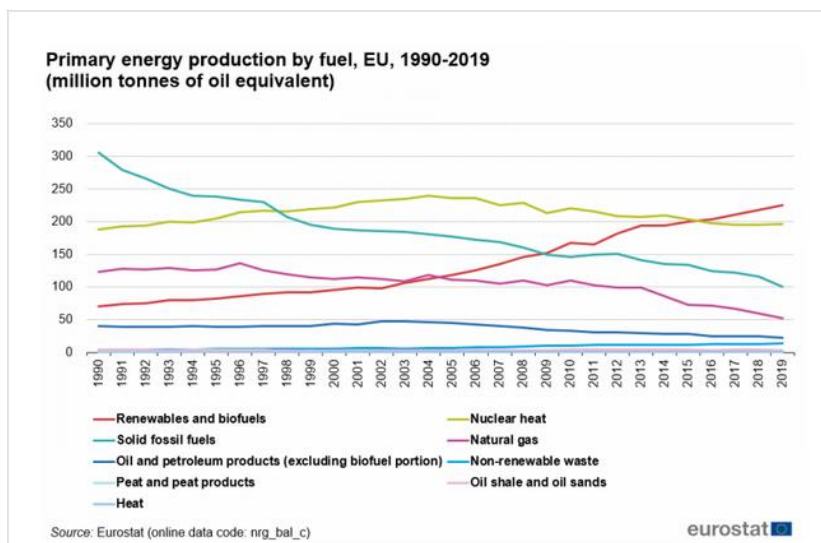


Figura 2 - Energia primária por fonte entre 1990-2019 (Eurostat)
https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview

2.3 - Consumo de energia na UE

De acordo com os dados do *Eurostat*, o consumo final de energia na União Europeia cresceu a um ritmo baixo desde 1994, tendo atingindo o seu valor máximo em 2006 com um total

de 990 Mtoe, tendo decrescido de forma constante desde o pico até 2019 onde o valor foi de 935 Mtoe de energia total consumida, como apresentado na Figura 2.

Entre 1990 e 2019 o *share* de combustíveis fósseis sólidos, onde se destaca o uso de carvão no consumo de energia final, decresceu de 9.6% em 1990 para apenas 2.1% em 2019 (Eurostat, 2022), demonstrando o esforço da UE em reduzir cada vez mais o consumo desta fonte de energia primária que foi evidente através da descontinuação de centrais a carvão em 9 países da comunidade e em que outros 13 países assinaram acordos vinculativos com o mesmo objetivo (European Commission, 2021).

Os produtos derivados de petróleo representavam, em 2019, o maior *share* do consumo energético com 37%, seguidos da eletricidade que representam 22.8% e da utilização de gás natural que se manteve praticamente constante, oscilando entre 18.8% em 1990 e 21.3% em 2019 do *share* total da energia final consumida nos países da UE.

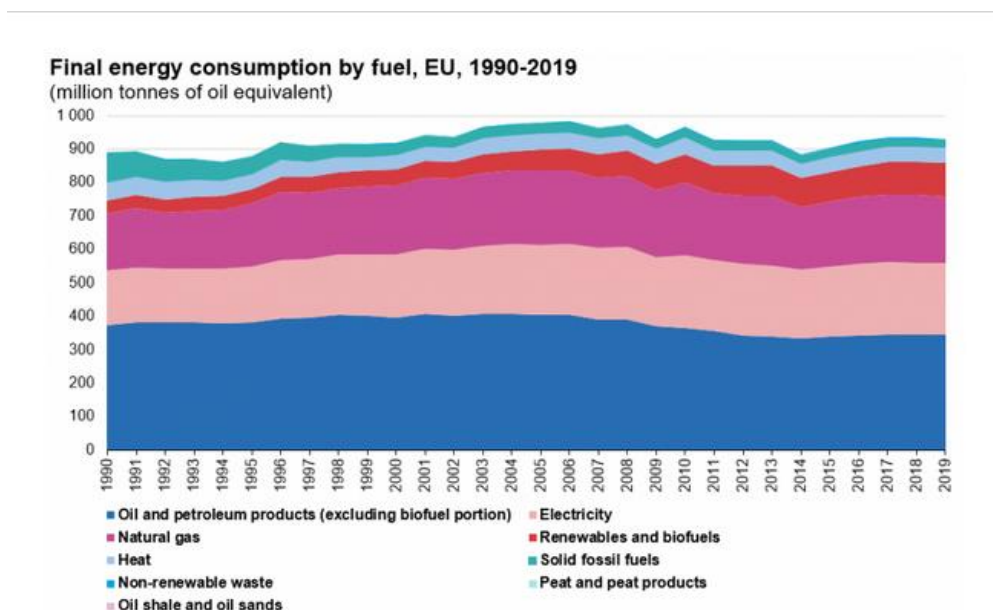


Figura 3 - Energia total consumida por fonte. Fonte: Eurostat
https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview

Na prática, o consumo final de energia é verificado nos vários setores da Economia da UE onde os Transportes representam 30.9% do *share*, o Uso Doméstico com 26.3% seguido da Indústria, Serviços e Agricultura com 25.6%, 13.7% e 3.0% respetivamente.

Apesar de os combustíveis fósseis representarem ainda a maior fatia do *share* de energia final consumida, existem pontos positivos a tirar dos últimos 20 anos, uma vez que as estatísticas do *Eurostat* mostram que o *share* de energias renováveis passou de 4.3% em 1990 para 10.9% em 2019 e a tendência de futuro é continuar a acelerar até que, a par de outras formas de geração de energia primária como a energia nuclear, tornem a economia completamente descarbonizada até 2050.

2.4 - Dependência Energética da UE

A União Europeia é atualmente energeticamente dependente dos seus parceiros externos, nomeadamente em termos dos combustíveis fósseis, tanto no consumo direto, como na sua transformação para produzir eletricidade (European Commission , 2021). O termo dependência energética representa a quantidade de energia necessária para satisfazer as necessidades energéticas de um país ou região através do rácio entre as importações e exportações brutas de energia e, em 2019, apesar dos aumentos do *share* de energia primária a UE continua longe de poder considerar-se energeticamente independente, tendo atingido nesse ano uma dependência de 60,6% de importações de energia para satisfazer as suas necessidades, com o gás natural a ter maior peso nas mesmas, já que 89.7% de todo o gás consumido na UE foi obtido via importações (Eurostat, 2022).

O gás natural, como enunciado anteriormente, ocupa uma posição elevada no consumo energético europeu tendo duplicado o mesmo entre 1990 e 2019, atingindo um recorde de importações em 2019 com cerca de 19,3% de aumento face a 2009. Apesar disto, o gás natural ocupa ainda o segundo lugar nas importações de energia da UE, totalizando 513 Mtoe em 2019, apenas 1.2% menos do que em 2009 (Eurostat, 2022).

A dependência energética da UE tem seguido uma tendência crescente desde 1990, onde registava 50.1% do consumo energético proveniente das importações e que atingiu em 2019 o valor mais alto nos últimos 30 anos (European Commission , 2021), podendo dever-se este fator tanto ao crescimento do consumo energético generalizado como a uma incapacidade do sistema energético europeu e suas infraestruturas em modernizar-se, contando ainda com uma grande dependência dos combustíveis fósseis, nomeadamente do gás natural e do

petróleo provenientes da Rússia e países árabes não sendo notável investimento suficiente em fontes de produção de energia internamente nas últimas décadas.

De facto, os recentes acontecimentos da invasão russa da Ucrânia constituem, à data de escrita deste estudo, um desafio importante para a agenda política europeia uma vez que a Rússia constitui o maior fornecedor de energia de origem fóssil da União Europeia (Bloomberg, 2022). O conflito armado levado a cabo na Ucrânia tem consequências económicas e de segurança energética graves para a UE, uma vez que os preços da energia se tornam cada vez mais voláteis a par que o abastecimento pode ser posto em causa pois a Rússia representa o maior fornecedor de carvão da UE com 46.7% de todas as importações, seguido do gás natural com 41.1% e dos derivados de petróleo com 26.9% (Eurostat, 2019) e portanto controla em grande parte o abastecimento destes produtos para a União Europeia.

Neste sentido, o tema da presente dissertação é também pertinente na ótica da segurança energética da EU, pois esta poderá estar a ser posta em causa e a estratégia dos decisores políticos nos próximos anos deverá passar por garantir cada vez mais a independência energética através de investimento em novas e inovadoras formas de produção de energia, nomeadamente eletricidade, através não só das Energias Renováveis, mas também com recurso à Energia Nuclear que apresenta vantagens a nível de emissões de CO₂, capacidade produtiva e onde a intermitência não é uma variável considerável. Por estes motivos, tem existido um crescente interesse por parte de vários países em tornar o setor da energia nuclear mais atrativo, como é o caso de França, que anunciou recentemente planos para construir novas centrais nucleares até 2050 (The Guardian, 2022), e que será discutido em mais detalhe mais à frente neste estudo.

3 - O Papel da Energia Nuclear

A presente secção deste trabalho tem por objetivo fazer uma análise da Energia Nuclear como alternativa viável de ser cada vez mais incluída na política energética europeia, através de uma perspetiva económica e ambiental, sob a forma de um ensaio, mostrando os principais argumentos a favor e contra da utilização desta fonte de energia primária.

Inicialmente, irei apresentar de forma breve os aspetos técnicos da energia nuclear e a evolução ao longo do tempo da sua utilização, passando por uma análise económica e das várias tecnologias existentes e, por fim, mostrar quais as tendências que a geração de energia nuclear enfrenta com as novas tecnologias emergentes que atualmente existem, para perceber de que modo a União Europeia pode usufruir e implementá-las para atingir os seus objetivos de mitigação das alterações climáticas e limitação do aquecimento global abaixo de 1.5°C.

3.1 - Evolução Histórica da Energia Nuclear

O conceito de átomo é conhecido desde a Grécia Antiga, onde os filósofos introduziram a ideia de que toda a matéria é composta por partículas de matéria indivisível (U.S Department Of Energy, 2002). A própria palavra *atomos*, em grego, significa precisamente indivisível e levou bastante tempo até que este conceito fosse novamente estudado de modo a entender qual a composição da matéria e as suas propriedades químicas e físicas.

A indivisibilidade do átomo foi posta em causa no final do século XIX quando Henri Becquerel, em 1896, descobriu que a uranite causava escurecimento no papel fotográfico, demonstrando posteriormente que este fenómeno era devido à radioatividade do urânio presente neste mineral (World Nuclear Association, 2020, p. 6). A radioatividade foi estudada com maior profundidade, por Marie e Pierre Curie que descobriram que a radioatividade não era exclusiva do urânio, tendo descoberto vários outros elementos químicos radioativos como o Rádio, Polónio e Tório.

Nos anos seguintes, os cientistas focaram-se no estudo da estrutura atómica tendo sido confirmado na década de 1911, a descoberta do núcleo do átomo por Rutherford. Ao longo da década de 1910 os cientistas ficaram convictos de que o núcleo do átomo era composto

por partículas de carga positiva, os prótons, e partículas sem carga elétrica, neutrões, existindo outras partículas mais leves que se movem em torno dele chamadas de elétrons (World Nuclear Association, 2020).

Após a descoberta básica do núcleo, foi observado que as partículas do mesmo se mantinham juntas devido a uma *força nuclear forte* e que esta energia era também responsável por algum tipo de radiação. Neste sentido, fizeram-se esforços para entender de que modo esta energia podia ser criada artificialmente e utilizada externamente até que, em 1933, Enrico Fermi observou transformações nucleares ao bombear átomos de urânio com neutrões acelerados, ocorrendo libertação de energia (World Nuclear Association, 2020)

As transformações nucleares observadas por Fermi produziram outros elementos atômicos mais pesados, mas também outros mais leves, que foram identificados por Otto Hahn e Fritz Strassman em 1938, como sendo bário e criptônio, que eram cerca de metade da massa atômica do urânio. Estas experiências levadas a cabo no final na década de 1930 permitiram perceber que os átomos quando bombardeados por neutrões, absorvem estas partículas e tornam-se instáveis, partindo-se em dois pedaços espontaneamente e que, em consequência, libertam grandes quantidades de energia, produzindo por sua vez dois ou três neutrões que levam a uma maior instabilidade do núcleo e originam novas reações em cadeia de fragmentação do núcleo em outros núcleos atômicos mais leves. Este processo ficou conhecido como *fissão nuclear* e foi o ponto de partida para a geração de energia com origem nuclear.

Após esta importante descoberta, cientistas como Niels Bohr, Fermi e Einstein começaram a discutir a possibilidade de criar reações de fissão nuclear em cadeia de forma controlada e autossustentável, uma vez que, em teoria, poderiam ser libertadas grandes quantidades de energia se o urânio utilizado conseguisse ser estabilizado sobre as condições certas. Em resultado dos estudos levados a cabo por estes cientistas, em novembro de 1942, na Universidade de Chicago, foi construído o primeiro reator nuclear, chamado *Chicago Pile-1*, baseado num modelo que consistia numa massa de urânio colocada dentro de uma placa de grafite, dando-lhe uma forma cúbica, como mostra a figura 4. A invenção deste reator com

reações em cadeia autossustentáveis deu origem à era nuclear, tanto para a sua aplicação positiva ou negativa (U.S Department Of Energy, 2002).

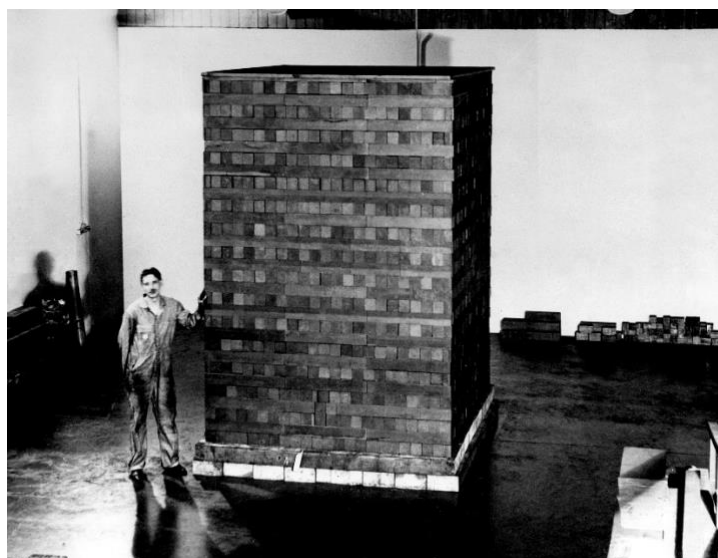


Figura 4 - Reator Chicago Pile-1 (Fonte: <https://www.atomicheritage.org/history/chicago-pile-1>)

No entanto, apesar destes avanços científicos no campo da ciência atómica, os acontecimentos políticos da década de 1940 devidos à segunda guerra mundial, levaram a que o foco dos estudos e pesquisas sobre a energia nuclear levassem um rumo diferente e fizeram com que se construíssem armas nucleares em detrimento da utilização desta tecnologia para se produzir energia nuclear em larga escala para beneficiar as populações (World Nuclear Association, 2020).

Um grande contributo para esta direção oposta da utilização de energia nuclear foi o Projeto Manhattan, criado pelo governo dos Estados Unidos e liderado pelo físico Robert Oppenheimer, que tinha como objetivo a criação da primeira bomba nuclear. Os esforços deste projeto em criar uma reação nuclear em cadeia que pudesse ser utilizada a nível bélico culminaram com a primeira detonação perto do laboratório de Los Alamos, nos Estados Unidos, em 1945, e com a segunda e terceira explosão de bombas nucleares sobre Hiroxima e Nagasáqui no Japão, contribuindo para a vitória dos aliados na Segunda Guerra Mundial (U.S Department Of Energy, 2002).

Com o término do conflito, foram criadas várias organizações e entidades que encorajaram o desenvolvimento e uso da energia nuclear com objetivos pacíficos que beneficiassem a sociedade, como é exemplo o *Atomic Energy Act (AEC)* em 1946, que contribuiu para que se inaugurasse o primeiro reator a produzir energia elétrica em 1951, nos EUA. A indústria de geração nuclear cresceu rapidamente durante a década de 1950 e 1960 quando os primeiros reatores comerciais arrefecidos com água começaram a ser utilizados pelas empresas privadas de eletricidade, uma vez que estas se aperceberam que a energia nuclear constituía uma alternativa económica, ambientalmente limpa e segura que permitia desenvolvimento económico, uma vez que a procura por energia elétrica subiu, por via do *boom* da década de 50 (U.S Department Of Energy, 2002).

3.2 - Características do Setor da Energia Nuclear

O setor da energia nuclear é, *per se*, um sistema que depende de várias disciplinas científicas para o seu bom funcionamento e desenvolvimento, dado a sua complexidade. De acordo com a Agência de Energia Nuclear da OCDE (AEN), a inovação neste setor é fortemente influenciada pelo ambiente sociopolítico em que se pretende implementar alternativas de produção de energia com base no nuclear, assim como pelas tecnologia e *know-how* existente num determinado país, o mercado de energia onde se encontra e pela conjuntura económico-financeira geral (Nuclear Energy Agency OECD, 2007, p. 12)

Este último ponto é bastante importante dado que a energia nuclear é uma forma de geração de eletricidade cujo desenvolvimento e implementação é um processo longo que requer pesquisa e alocação de recursos financeiros de longo prazo de modo a tornar a produção o mais segura, rentável e eficiente possível. Os custos continuam, portanto, a ser o fator mais determinante para a construção e instalação de um reator nuclear na rede elétrica de um país, uma vez que, as projeções de investimento de uma única central nuclear encontram-se entre 5 e 12 mil milhões de dólares com um tempo médio de construção que varia entre 6 e 10 anos, cerca do dobro do investimento e tempo necessário para construir uma central a carvão ou a gás, e que está sempre sujeito às flutuações do mercado das matérias primas como o aço, cobre ou cimento, entre outras variáveis que podem fazer aumentar os custos variáveis durante o período de construção (Johnson, 2011).

3.2.1 - Custos associados à Energia Nuclear

Os custos associados à Energia Nuclear são de difícil avaliação uma vez que dependem diretamente da localização onde as centrais são instaladas e da tecnologia instalada nas mesmas. A Energia Nuclear é, segundo o estudo “Economics Of Nuclear Energy” (World Nuclear Association , 2021) competitiva relativamente a outras fontes de geração de eletricidade como o carvão e o gás natural, se forem considerados os custos associados às emissões de carbono que, em muitos países como a China ou Índia não fazem parte do sistema de custeio.

As centrais nucleares têm, por norma, custos elevados associados de construção e licenciamento, mas são relativamente baratas de gerir ao longo do tempo, mesmo quando incluídos os custos de gestão dos resíduos e de término de atividade e, quando, por exemplo, comparadas com o custo ambiental e social inerentes à produção de eletricidade com base em combustíveis fósseis, tornam-se ainda mais competitivas com as restantes alternativas (World Nuclear Association , 2021).

A forma mais utilizada para avaliar os custos de uma central nuclear é através dos custos normalizados da eletricidade (em inglês *levelized costs of electricity*, LCOE) que corresponde ao custo total para a construção e operação de uma central, dividido pela eletricidade total produzida durante o período em atividade (\$/MWe) (Lazard, 2017). O LCOE pode também ser entendido como o a que a eletricidade tem de ser vendida para que o projeto encontre o seu *break-even point*.

De um ponto de vista económico, o financiamento da energia nuclear envolve vários tipos de custos, de entre os quais (World Nuclear Association , 2021):

- **Custos de capital:** Incluem os custos de aquisição do terreno, construção, matérias-primas e mão-de-obra. Também os custos de financiamento poderão ser incluídos e estes podem ter impactos significativos no valor total dos custos de capital, uma vez que são dependentes do tempo necessário à construção e da taxa de juro / desconto associada à dívida contraída.

O custo de capital é um componente muito importante na viabilidade de uma central nuclear, uma vez que, períodos longos de construção, onde não existe fonte de

receita, pode resultar em juros muito elevados que podem vir a comprometer o projeto de investimento. É muitas vezes utilizada a taxa de desconto em função do custo normalizado da eletricidade (LCOE) para determinar se o investimento nestes projetos pode ser recuperado no futuro pois a taxa de desconto utilizada determina o valor atual do investimento ao longo do tempo, ou seja, a capacidade de o investimento gerar cash-flows positivos no futuro que possam cobrir os custos e criar rendimento.

Na figura 5 podemos observar o efeito das várias taxas de desconto no possível custo de construção de projetos das várias formas de geração de eletricidade e podemos concluir que quanto menor for a taxa de desconto associada, mais barato se torna construir uma central nuclear, ou seja, o valor atual do investimento de uma central nuclear é tanto maior quanto menor for o seu período de construção uma vez que o juro composto associado totaliza montantes elevados enquanto não existem rendimentos que cubram o investimento.

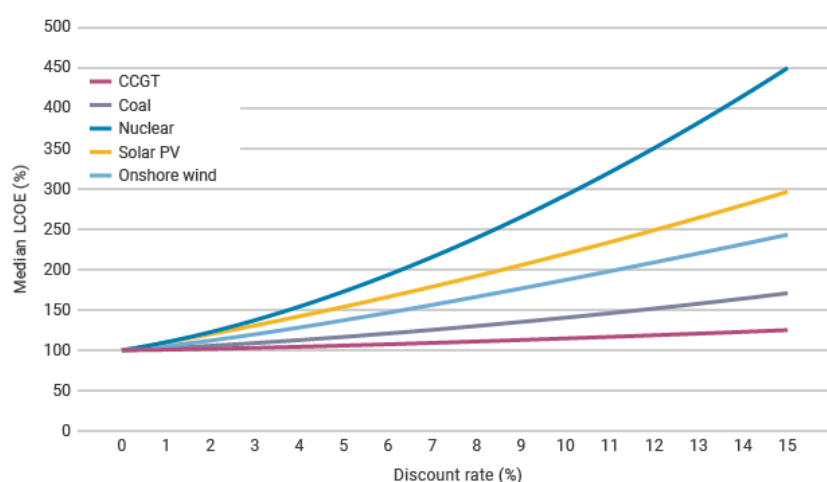


Figura 5 - Variação dos custos das várias formas de geração de eletricidade em função da taxa de desconto. Fonte: (World Nuclear Association, 2021).

- **Custos de operação:** Estes incluem os custos do combustível, operação, manutenção, desmantelamento e de tratamento dos resíduos resultantes da atividade da central. Estes custos podem ser de natureza fixa ou variável, têm também em conta a taxa de desconto utilizada no projeto, para poderem ser comparáveis ao longo do tempo e são completamente internalizados.

- **Custos externos:** Custos para a sociedade, também conhecidos como externalidades negativas, que contam, por exemplo, com os custos relacionados com a possibilidade de acontecer um desastre nuclear ou também com as emissões de CO₂ emitidas, que no caso da energia nuclear tendem para zero.

Uma característica que torna a energia nuclear menos competitiva do que outras formas de geração de eletricidade é que os custos relacionados com as emissões de GEE para a atmosfera não são internalizados quando se produz eletricidade com base em combustíveis fósseis, uma vez que o carbono emitido nas operações das empresas ainda não está incluído nos custos totais em \$/ton CO₂ (World Nuclear Association , 2021).

De acordo com o relatório “*Projected Costs of Generating Electricity 2020*” da OCDE, o LCOE de uma central nuclear a uma taxa de desconto de 3% é, quando considerados os custos de carbono a \$30 / ton CO₂, significativamente mais barato do que as alternativas mais utilizadas para a produção de eletricidade como o carvão e as centrais a gás de ciclo combinado e, a taxas de desconto ainda mais baixas, é ainda mais barato do que a energia eólica e solar (OCDE, 2020).

3.2.2 - Outras variáveis com influência no setor da energia nuclear

O setor da energia nuclear, como enunciado acima, está também altamente ligado ao estado do mercado de energia e sua interdependência (World Nuclear Association , 2022), como é exemplo o mercado energético europeu, tanto ao nível da transmissão de energia pelos vários países como de *know-how* partilhado entre países, de fornecimento de matérias-primas e dos acordos entre os países que podem tornar este mercado mais ou menos flexível a nível burocrático e técnico, facilitando, ou não, a sua proliferação e desenvolvimento como alternativa viável aos combustíveis fósseis e outras alternativas de geração de energia renovável (Nuclear Energy Agency OECD, 2007).

A temática da energia nuclear é também um tema sempre sensível a nível sociopolítico devido à perceção pública que as populações têm com as questões relacionadas com a segurança das centrais nucleares e da gestão adequada dos resíduos radioativos. É necessária, portanto, a devida análise do custo-benefício que advém da construção de uma central nuclear para que as populações e decisores políticos possam facilmente identificar o impacto positivo da

energia nuclear no seu modo de vida, uma vez que obter eletricidade produzida através do nuclear pode ter benefícios na fatura da eletricidade e na qualidade do ar ao longo do tempo (Nuclear Energy Agency OECD, 2007).

É neste sentido que pretendo apresentar nas próximas páginas, quais as vantagens que a inovação e reforma dos sistemas de geração nuclear poderão trazer, uma vez, apesar de o setor da energia nuclear atual se encontrar num estado de maturidade, existem ainda oportunidades para o renovar a nível tecnológico de forma económica, com novas formas de geração de energia nuclear, comparando-as com as atuais tecnologias de forma breve, e com outras formas de geração de energia renovável.

3.3 - Tecnologia predominante

Como visto anteriormente, na breve descrição sobre a descoberta da energia nuclear, um reator nuclear produz grandes quantidades de energia através da fissão dos átomos de certos elementos presentes no combustível nuclear, dando origem a uma reação em cadeia controlada, que produz vapor de água a elevadas pressões e, por sua vez, faz girar as pás de um gerador criando assim eletricidade a partir da sua energia cinética.

Os reatores mais comuns nos dias de hoje são os reatores desenvolvidos inicialmente para alimentar os submarinos e grandes navios, representando 85% de toda a produção de energia nuclear do mundo (World Nuclear Association, 2022)

Um reator nuclear é composto por diversos componentes sendo os mais importantes os seguintes:

- 1) **Combustível:** Isótopo fértil de Urânio / Plutónio. O combustível mais utilizado atualmente é uma mistura de óxidos de urânio e plutónio empobrecido (MOX – Mixed Oxide)
- 2) **Moderador:** Material existente no núcleo que desacelera os neutrões resultantes da reação, de modo a criar mais reações de fissão – normalmente água ou grafite.
- 3) **Refrigerador:** Fluido que circula no reator de modo a absorver a energia resultante da reação nuclear para fazer girar a turbina.
- 4) **Blindagem:** Cobertura do reator que evita escape de radiação e neutrões para o exterior – pode ser constituída de chumbo, aço, água ou cimento.

5) **Turbina:** Parte do reator para onde é transferida a energia absorvida na reação e que por sua vez gera energia elétrica.

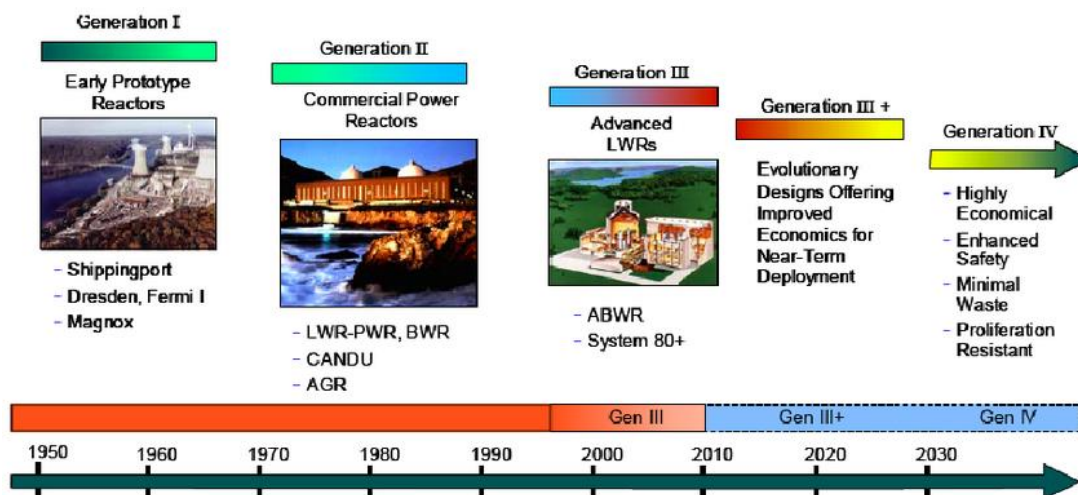


Figura 6 - Evolução das Tecnologias de Geração Nuclear (Fonte: https://www.researchgate.net/figure/Nuclear-reactors-evolution_fig1_258047105)

Como é possível observar na Figura 6, existem vários tipos de reatores nucleares, sendo os mais comuns os Generation II, PWR (Pressurised Water Reactor) e BWR (Boiling Water Reactor), bastante comercializados desde 1970 até finais de 1990, quando surgiram os reatores Generation III.

Reactor type	Main countries	Number	GWe	Fuel	Coolant	Moderator
Pressurized water reactor (PWR)	USA, France, Japan, Russia, China, South Korea	306	292.0	enriched UO ₂	water	water
Boiling water reactor (BWR)	USA, Japan, Sweden	61	61.8	enriched UO ₂	water	water
Pressurized heavy water reactor (PHWR)	Canada, India	48	24.4	natural UO ₂	heavy water	heavy water
Advanced gas-cooled reactor (AGR)	UK	10	5.7	natural U (metal), enriched UO ₂	CO ₂	graphite
Light water graphite reactor (LWGR)	Russia	11	7.4	enriched UO ₂	water	graphite
Fast neutron reactor (FBR)	Russia	2	1.4	PuO ₂ and UO ₂	liquid sodium	none
High temperature gas-cooled reactor (HTGR)	China	1	0.2	enriched UO ₂	helium	graphite
TOTAL		439	393.0			

Figura 7 - Distribuição dos diferentes tipos de reatores nucleares. (Fonte: World Nuclear Association, 2022)

No sentido de simplificar a análise, irei apenas utilizar os dois tipos de reator mais utilizados no mercado, PWR e BWR, na comparação com as novas formas de geração nuclear pois, como podemos verificar na figura 7, o PWR representa cerca de 70% de todos os reatores atualmente em funcionamento, enquanto os reatores BWR representam quase 15% desse mesmo *share*.

Estes reatores, inicialmente chamados *Generation II*, são ambos caracterizados por serem abastecidos com Dióxido de Urânio enriquecido, serem moderados por água e utilizarem também água como fluido de refrigeração, daí a designação *Light Water Reactors* (LWR), e diferem sobretudo nos circuitos de refrigeração, onde no PWR existem circuito primário e um secundário e no BWR existe apenas um circuito, como podemos ver nas Figuras 8 e 9 tendo também diferenças na temperatura a que o núcleo se encontra, sendo necessário portanto manter os reatores a pressões atmosféricas diferentes (entre 75 e 150 vezes a pressão atmosférica normal), para impedir que a água existente no circuito entre em ebulição (Robock, 2014).

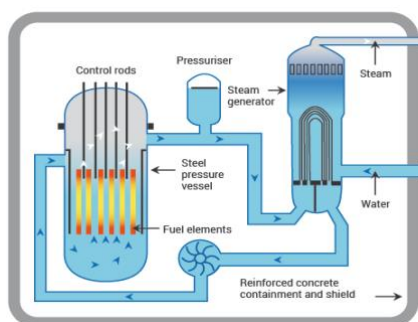


Figura 8 - Desenho técnico de um reator PWR. (Fonte: World Nuclear Association, 2022)

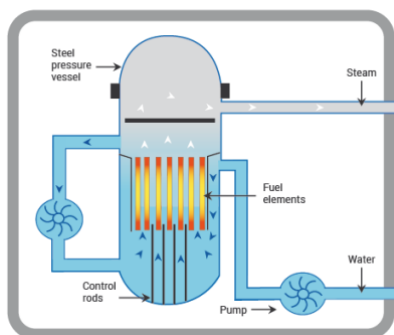


Figura 9 - Desenho técnico de um reator BWR. (Fonte: World Nuclear Association, 2022)

Apesar destes reatores *Generation II* terem sido desenvolvidos e instalados pela primeira vez em meados dos anos 60, o seu *design* mudou ao longo do tempo de modo a melhorar a eficiência energética, a segurança dos equipamentos e a gestão dos resíduos radioativos resultantes da utilização. Estes reatores LWR melhorados que surgiram a partir do ano 2000 têm a designação de *Generation III* e *Generation III+* e são ainda o tipo de reator predominante nos planos de construção de novas centrais nucleares em todo mundo, apesar de essencialmente serem reatores de *Generation II*, com ciclos de vida que atualmente têm sido estendidos para lá do plano inicial da sua utilização, que pode ser uma preocupação em termos de segurança e rentabilidade, como é o caso da França, que pretende aumentar o ciclo de vida dos seus reatores de 900 MWe de 40 para 60 anos (World Nuclear Association, 2022).

Maior parte das centrais nucleares construídas até hoje foram originalmente desenhadas para operarem entre 30-40 anos mas, devido aos elevados custos de construção e novas centrais e da complexidade destes sistemas, os legisladores optam por aumentar o ciclo de vida através da atribuição de novas licenças, como é o exemplo dos EUA, onde em quase todos os 100 reatores em atividade, as licenças foram renovadas com a intenção de prolongar a atividade até 60 anos de vida útil, significando por isso, investimento em sistemas e componentes mais recentes em designs que se vão tornando obsoletos (World Nuclear Association, 2022).

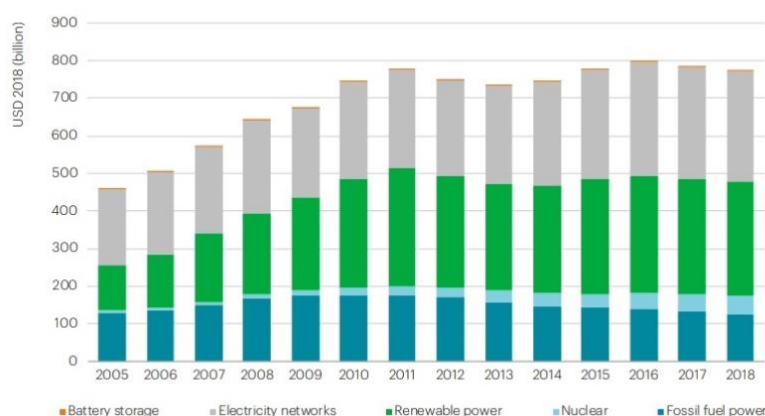


Figura 10 - Investimento no setor energético por fonte (2005-2018) (Fonte: IEA, 2019)

A decisão de investir em novas centrais e principalmente, em novas tecnologias de geração nuclear prende-se sobretudo com o fator económico, uma vez que são necessárias grandes alocações de capital para construir novos reatores e novas centrais cujo retorno financeiro é

sempre de longo prazo. Esta decisão tem levado a que o setor da energia nuclear tenha entrado em decréscimo em termos de investimento (Figura 10), apesar de que a produção de energia nuclear tenha aumentado (Figura 11).

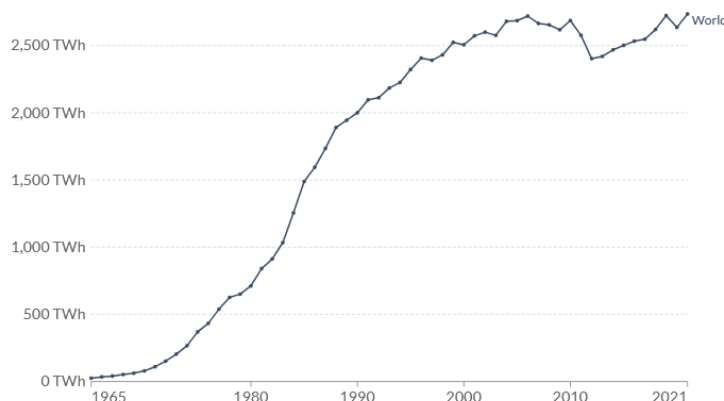


Figura 11 - Produção de energia nuclear (1965 - 2021) (Fonte: Our World in Data, 2021)

3.4 - Tecnologias emergentes de geração de Energia Nuclear

Na presente secção deste estudo, irei apresentar de um modo geral, as tecnologias emergentes deste setor, que podem ter impacto no mercado da energia nuclear e possivelmente renová-lo, uma vez que, podem trazer benefícios claros em termos de custos de produção, área necessária de instalação, eficácia energética e melhorias relativamente ao tratamento e armazenamento dos resíduos radioativos resultantes da sua atividade, sendo este último um dos aspetos mais importantes na opinião pública que, muitas vezes acaba por ofuscar os benefícios ganhos pela utilização de energia nuclear para a produção de eletricidade (Nuclear Energy Agency OECD, 2007, p. 11).

Como é possível observar na Figura 6, os planos existentes para renovar o setor da energia nuclear para lá de 2030 estão centrados nos reatores de *IV Generation* que, como a figura sugere, constituem uma alternativa mais económica, segura, menos suscetível a desastres e com melhorias na gestão dos resíduos provenientes da atividade, mas também nos Reatores Nucleares Modulares (*Small Modular Reactors, SMR*) que constituem reatores mais pequenos (<300 MWe) e podem ser instalados em locais isolados afastados do *grid* elétrico e onde os custos de capital são muito inferiores (TIME, 2021). Estes reatores nucleares atualmente encontram-se em fase de experimentação e desenvolvimento e, por isso, não existem ainda

muitos países onde tenham sido instalados e tenha sido comprovada a sua melhoria face à tecnologia existente em termos empíricos, uma vez que são necessários longos períodos para confirmar a sua fiabilidade (Robock, 2014).

A introdução da tecnologia *IV Generation* de reatores nucleares aconteceu no início do novo milénio com a criação do *Generation IV International Forum (GIF)* pelo Departamento de Energia dos EUA, que é uma organização internacional de países onde a geração de energia nuclear têm relevância, e que conta com os seguintes países: Argentina, Austrália, África do Sul, Brasil, China, Canadá, Coreia do Norte, Estados Unidos da América, Japão, Reino Unido, Suíça, Rússia, e União Europeia. O objetivo deste comité é partilhar informação e pesquisa para desenvolvimento deste novo tipo de reatores (World Nuclear Association, 2020).

Um das características interessantes deste novo tipo de tecnologia com as anteriores é que o investimento no setor não tem sido exclusivamente feito através de apoios e subsídios governamentais, mas também por parte de empresas privadas, que veem uma boa oportunidade num novo mercado que surge, como por exemplo nos reatores SMR. Existem atualmente 6 tipos de reatores de *Gen IV* a ser atualmente desenvolvidos pelos países do GIF, (em inglês): *Gas Cooled Fast Reactors*; *Lead-Cooled Fast Reactors*; *Molten Salt Reactor*; *Supercritical Water Cooled Reactor*; *Sodium-Cooled Fast Reactor*; *Very High Temperature Reactor* (Robock, 2014) e que se esperam começar a ser comercializados entre 2030-2040. Ao nível privado, existem várias empresas a desenvolver soluções que envolvem menos capital intensivo e que podem ser instaladas em locais remotos sem acesso à rede como é exemplo a *Oklo Inc*, que atualmente possui um protótipo de um reator nuclear do tamanho de uma banheira e que pode produzir eletricidade (15 MWe) suficiente para abastecer um bairro ou uma fábrica durante uma década, sem reabastecimento e sem emissões de carbono (TIME, 2021), a *TerraPower* fundada por Bill Gates que conta já com investimentos em vários dos reatores de *Gen IV* mencionados acima, entre outras empresas.

3.4.1 - Melhorias de segurança

Uma das maiores diferenças das novas tecnologias de geração nuclear face aos reatores de II e III+ geração é que nestes, a reação necessita de ser “encorajada” para que seja possível

produzir energia, ou seja, a reação em cadeia de fissão consecutiva dos elementos, que liberta calor, necessita de ser incentivada e não contida para funcionar, como acontece nas tecnologias anteriores. O seu sistema de arrefecimento à base de sais derretidos, existente por exemplo nos reatores *Molten Salt Reactor (MSR)*, faz com que não seja necessária a existência de um fluido de arrefecimento em circulação a altas pressões, nem de um gerador de *backup* que o faça circular em casos de emergência, que foi a causa do acidente de Fukushima, onde o gerador a diesel ficou inundado, causando o sobreaquecimento do reator e consequente explosão (Robock, 2014) devido à elevada pressão do reator.

Muitos destes novos reatores utilizam então materiais como chumbo ou sódio que derretem naturalmente devido às elevadas temperaturas de um reator (700°C) (World Nuclear Association, 2020) e assim, funcionam como fluido de refrigeração. Este fluido de refrigeração funciona a baixa pressão pois não é necessário pressurizá-lo, como nos sistemas de refrigeração dos reatores PWR, para manter o fluido no estado líquido a elevadas temperaturas, em circulação.

Aliada a esta importante inovação, estes reatores, possuem um coeficiente de temperatura muito forte, ou seja, à medida que a temperatura do reator sobe, a reação nuclear desacelera levando a um arrefecimento natural e gradual do mesmo (World Nuclear Association, 2020), reduzindo o perigo de um possível derretimento do reator em casos de perda de abastecimento de energia, não necessitando um sistema externo de arrefecimento, como nos reatores nucleares convencionais.

3.4.2 - Redução dos resíduos nucleares

Os materiais resultantes da atividade de uma central nuclear são conhecidos como resíduos nucleares e são categorizados em três categorias de acordo com a IAEA (International Atomic Energy Agency), face ao seu nível de radioatividade, definindo-os como Baixo, Intermédio e de Alto Nível.

A maior parte dos resíduos nucleares é de nível baixo, representando 90% do *share* total de resíduos totais da atividade nuclear. No entanto, estes materiais contêm apenas 1% da radioatividade enquanto os resíduos de alto nível representam 95% da contaminação e constituem 3% do *share* total de resíduos nucleares e que são constituídos maioritariamente

pelo combustível utilizado nos reatores e têm um período de decaimento muito longo durante a sua armazenagem. (World Nuclear Association, s.d.)

Os reatores de nova geração, *Generation IV*, possuem vantagens significativas a nível ambiental, em termos da redução dos resíduos nucleares e do seu tempo de decaimento (Robock, 2014) quando armazenados. De um ponto de vista técnico, os resíduos nucleares existem porque os reatores convencionais utilizam moderadores, como visto acima no ponto 3.3, para desacelerar os neutrões resultantes da reação de fissão, que perdem energia ao longo do tempo e por consequência, levam a que o combustível nuclear não seja totalmente consumido (World Nuclear Association, 2020). Ao contrário deste sistema, os reatores de nova geração não utilizam moderadores para desacelerar os neutrões uma vez que a sua tecnologia permite ter neutrões com mais energia e dessa forma, permitem um consumo mais eficiente do combustível, resultando não só em menos resíduos, mas também numa menor contaminação radioativa dos mesmos após a sua utilização (Robock, 2014).

A mais eficiente e completa utilização do combustível nuclear é um dos fatores mais importantes desta tecnologia. Os vários modelos de reatores *Advanced Nuclear Generation IV* utilizam formas diferentes de operar que, por motivos de simplificação, não irei descrever neste trabalho mas, de notar que estas tecnologias permitem não só reduzir em larga escala o volume de resíduos nucleares mas também o seu tempo de decaimento de 300000 anos para apenas 300 anos, podendo mesmo, em certos modelos, utilizar os próprios resíduos nucleares (devidamente tratados e reciclados) como combustível (Tarantol, 2014), que beneficia não só o ambiente mas também reduz a necessidade de minerar e enriquecer urânio.

3.4.4 - Custos estimados

Como visto anteriormente, um dos maiores entraves ao desenvolvimento e construção de mais centrais nucleares são os seus custos totais, que incluem os custos de capital, de operação e outros custos externos associados.

Uma vez que as tecnologias de geração nuclear avançada (Gen IV) estão ainda numa fase inicial de desenvolvimento, não existem ainda estudos e dados empíricos suficientes para poder analisar com exatidão o custo total normalizado, utilizando a sigla encontrada na literatura, LCOE, de uma central em funcionamento.

Existem várias análises realizadas por diferentes autores que utilizam o LCOE para estimar o custo de uma central nuclear avançada em comparação com outras fontes de produção de energia elétrica. Uma das estimativas foi realizada em 2018 por parte do MIT (Massachusetts Institute of Technology) que concluiu que o LCOE de um reator avançado encontrar-se-á entre \$110 e \$120/MWh (MIT, 2018), enquanto outro estudo chegou ao valor de \$60/MWh (Energy Innovation Reform Project, 2017) em média, para os 6 designs diferentes de reatores mencionados no ponto 3.4 deste capítulo.

Comparativamente, os reatores nucleares LWR de grande dimensão têm um custo médio entre \$112-\$183/MWh, uma central a carvão de \$60-\$143/MWh, uma central de gás natural de ciclo combinado tem médio entre \$42 e \$78/MWh enquanto a energia eólica e solar têm um custo médio entre \$30-\$60/MWh e \$43-\$53/MWh, respetivamente (Lazard, 2017). Estas estimativas, não consideram, no entanto, os custos associados às emissões de GEE, o que tornaria as tecnologias de geração nuclear avançada mais competitivas não só com as energias fósseis, tendo em conta o rendimento muito superior das mesmas, mas também face às energias renováveis, dada a sua intermitência associada (Congressional Research Service, 2019)

De acordo com Robock, 2014, a comparação dos custos associados (LCOE) entre várias formas de produção de eletricidade só faz sentido quando os custos relacionados com as emissões de GEE são internalizados e, nestas condições, a produção de energia nuclear avançada é extremamente competitiva com as restantes fontes de produção de eletricidade.

Tabela 1 - Custo comparativo (LCOE) entre uma central nuclear avançada com centrais de carvão e gás natural de ciclo combinado (Fonte: Robock, 2014, p.18)

	Capital costs (construction + financing)	Variable O/M (including fuel)	Total levelized cost
Advanced nuclear	71	11	96
Natural gas (advanced combined cycle with carbon capture)	30	55	91
Conventional coal	60	30	95
Coal gasification with carbon capture	97	38	147

A Tabela 1 mostra-nos uma comparação do LCOE total estimado para um período de 30 anos entre uma central nuclear avançada (*IV Generation*), uma central de gás natural de ciclo combinado com captura de carbono, uma central a carvão convencional e uma central a carvão com captura de carbono (de notar que o LCOE total na última coluna não é exatamente a soma das duas primeiras colunas porque estão incluídos outros custos associados no funcionamento de uma central). Como é possível observar na Tabela 1, as centrais nucleares avançadas são extremamente competitivas com as restantes, ficando apenas atrás das centrais de gás natural de ciclo combinado com captura de carbono (onde os custos associados às emissões são internalizados) sob condições normais. No entanto, as centrais nucleares avançadas operam segundo reduzidos custos variáveis, ao contrário do gás natural que está dependente do volátil preço do gás natural e por isso, pode tornar mais atrativo o investimento nestas centrais, cujo custo total de capital pode ser também ainda mais reduzido uma vez que estas podem manter-se em funcionamento num período de até 60 anos, diminuindo, portanto, a taxa de desconto associado ao seu investimento (Robock, 2014).

3.4.5 - Dimensão e Versatilidade

Uma das características mais interessantes destas novas tecnologias é que podem ser facilmente adaptadas ao contexto em que se pretendam inserir já que a capacidade instalada pode variar entre os 15MWe e 1500MWe, dependendo do modelo do reator, das necessidades energéticas ou do local onde este possa ser instalado, permitindo grande versatilidade de instalação (World Nuclear Association, 2020).

A maior parte dos reatores avançados são mais versáteis, com especial ênfase nos reatores SMR (Small Modular Reactors) ou os microreactores, mais pequenos (Figura 12), que os modelos convencionais mais utilizados BWR e LWR e a sua construção é modular, ou seja, os reatores podem ser facilmente transportados em módulos por via ferroviária, marítima e rodoviária e ser instalados no local onde se pretendem ser instalados em unidades suficientes que satisfaçam as necessidades energéticas (Congressional Research Service, 2019). Estes reatores têm o potencial de abastecer áreas isoladas do *grid* elétrico e outras que necessitem de abastecimento ininterrupto de eletricidade como unidades industriais, ou hospitalares, mas

também bases militares ou zonas devastadas por desastres naturais que tenham as suas fontes de energia danificada (World Nuclear Association, 2020).

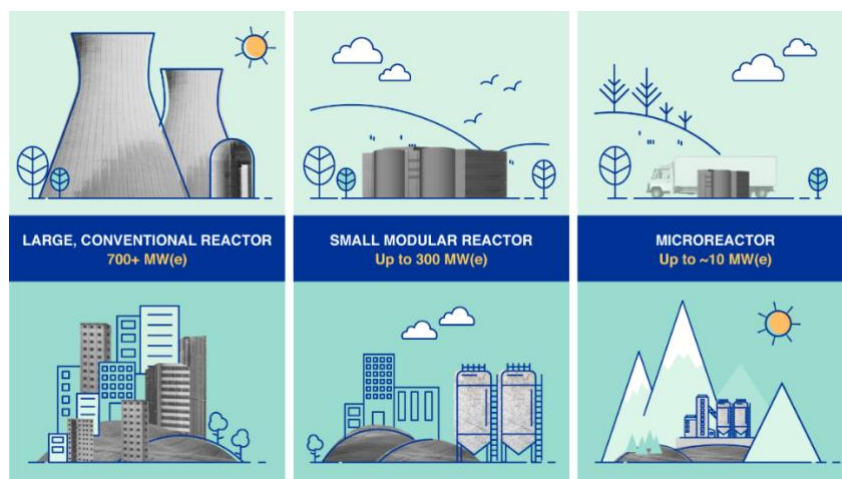


Figura 12 - Tamanho comparativo dos vários modelos de reator nuclear (Fonte: <https://www.fortum.com/nuclear/small-modular-reactors>)

Para além da versatilidade de instalação, os reatores nucleares avançados têm aplicações que podem capturar outros mercados (MIT, 2018). Uma vez que estes reatores operam a temperaturas muito elevadas (500-1000°C) em comparação com os reatores convencionais (300-330°C), é possível canalizar parte deste calor para processos industriais ou mesmo para aquecimento de áreas residenciais (MIT, 2018). Outra possível utilização destes reatores é a possível produção de Hidrogénio ou dessalinização de água do mar de acordo com o estudo realizado pelo MIT.

3.4.6 - Impactos Ambientais

Como foi sendo referido ao longo deste trabalho, a utilização de energia nuclear para produção de eletricidade de forma convencional, não produz emissões de CO₂ diretamente, ainda que tenha algumas externalidades negativas, nomeadamente ao nível da gestão e armazenamento dos resíduos. As tecnologias de energia nuclear avançada foram desenhadas para reduzir ainda mais este impacto ambiental, mas ainda não estão em atividade há tempo suficiente para se avaliar quais os impactos ambientais de todo o seu ciclo de vida (Congressional Research Service, 2019).

Para se avaliar os impactos ambientais destas tecnologias é necessário primeiro recolher dados empíricos e analisar cada situação em particular, uma vez que estes reatores são muito versáteis e cada instalação tem as suas próprias características no seu ciclo de vida.

4 - Evolução da política energética e nuclear na União Europeia

Uma vez que o objetivo final deste estudo é estabelecer uma relação entre as novas formas de geração de energia nuclear e o impacto destas na redução das emissões de GEE na União Europeia, é necessário olhar para o contexto da energia nuclear e das políticas energéticas europeias e da regulação existente em relação a esta fonte de produção de eletricidade, para perceber qual o atual *framework* em que esta indústria se encontra e quais poderão ser os próximos passos a dar para um sistema energético europeu mais sustentável.

A União Europeia constitui, como visto no capítulo 2 da presente dissertação, o maior importador de energia do mundo e, a par desta problemática, o seu sistema energético enfrenta desafios para que, no futuro, a UE se torne mais independente energeticamente e mais sustentável no que diz respeito ao sistema elétrico que, na sua globalidade, emprega 1.6 milhões de pessoas, contribuindo em média com 250 mil milhões de euros para a economia europeia por ano (IEA, 2020).

4.1 - Principais políticas energéticas e de clima da UE

Desde 2009 que os objetivos em redor das alterações climáticas e do estado do setor energéticos começaram a ser legislados na UE, num acordo denominado “*2020 Climate and Energy Package*”, através das Diretivas Europeias como a Diretiva 406/2009/EC relativamente à criação de um sistema de créditos de carbono, as Diretivas 2009/28/EC e 2012/27/EU que remetem para a obrigação dos países em estabelecer metas que vão de acordo com os objetivos da União Europeia e que foi complementado com a Diretiva 2009/31/EC relativamente ao investimento em Captura e Armazenamento de Carbono (European Commission, 2009).

Nesta altura, as metas a alcançar em 2020 eram as seguintes (European Commission, 2009, p. 1):

- Reduzir as emissões de GEE em 20%, face aos níveis de 1990;
- Alcançar 20% da energia final consumida proveniente de fontes renováveis e de 10% no setor dos transportes;
- Reduzir o total de energia final consumida em 20% em 2020, face a 2007.

Com a tomada de posse deste novo executivo, foi criado, em 2015, o projeto “*State of the Energy Union*” que tinha como prioridade o desenvolvimento e fortalecimento de um sistema que aumentasse a segurança e a eficiência energética, através da integração de um único sistema energético europeu que facilitasse a pesquisa e inovação para, deste modo, acelerar a descarbonização da economia europeia (Comissão Europeia, 2015). Este projeto é baseado no relatório “*Framework Strategy for a Resilient Energy Union with a Forward-Looking Climate Change Policy*” (Comissão Europeia, 2015) onde é demonstrada a visão da Comissão Europeia em criar um sistema energético europeu integrado e onde estão listados os motivos pelos quais é necessário uma União Energética europeia (*Energy Union*) para suportar a política climática de forma mais eficiente e afastar cada vez mais a União Europeia dos combustíveis fósseis.

Segundo este relatório, a reforma do sistema energético europeu com a criação de uma União Energética é necessária para cumprir os seguintes objetivos (Comissão Europeia, 2015, p. 2):

- “Fazer entender aos membros da UE que são interdependentes entre si para entregar energia de forma segura e eficiente aos seus cidadãos;
- Aumento da facilidade com que a energia flui entre fronteiras, através da competitividade natural dos mercados de energia e do melhor uso dos recursos disponíveis com a criação de regulação mais eficiente, quando necessário;
- Construção de uma economia sustentável, de baixo carbono e amiga do ambiente que seja duradoura;
- Estimular o mercado de trabalho de forma natural através da interdependência dos países da UE, de modo que se continue a atualizar e gerir o sistema energético do futuro;
- Garantir que todos os cidadãos europeus sejam integrados na transição energética, que beneficiem das novas tecnologias para reduzir a sua fatura energética, sendo parte ativa do sistema energético no qual os consumidores mais vulneráveis sejam protegidos.”

No ano de 2019, deu-se uma nova eleição para dos membros da Comissão Europeia para o período entre 2019-2024 e, desde início, foi mostrada iniciativa em renovar o estado do sistema energético europeu, pretendendo continuar o trabalho do anterior executivo, eleito em 2014, com um compromisso evidenciado pela introdução do plano para atingir o objetivo de neutralidade carbónica em 2050, denominado “*European Green Deal (EGD)*” (European Commission, 2019) e que cujas propostas são revistas a cada 5 anos, para garantir a execução do mesmo de forma eficiente.

O EGD representa uma verdadeira oportunidade no plano de recuperação económica da União Europeia pós pandemia Covid-19 que pretende focar o crescimento da sua zona económica com investimentos privados e públicos que ajudem a atingir os objetivos traçados de neutralidade económica até 2050. Em Maio de 2020 a Comissão Europeia anunciou um pacote de 1.1 triliões de euros a ser distribuído aos países membros durante o prazo entre 2021 a 2027 e que, em matéria de sustentabilidade se destina a investimentos para melhorar a eficiência dos sistemas energéticos, substituir tecnologias ineficientes e ultrapassadas, renovar o mix energético para não só reduzir as emissões de GEE da União Europeia mas também para assegurar a sua segurança energética no futuro (IEA, 2020)

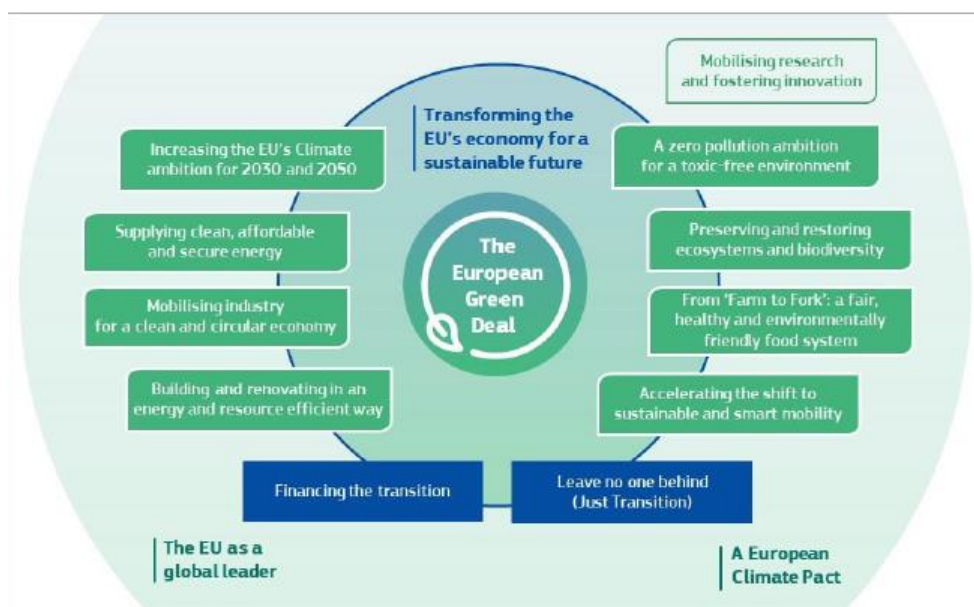


Figura 13 - Elementos do EGD (Fonte: European Commission, 2019)

Como ilustrado na Figura 13, a Comissão Europeia pretende entrar num processo de transição para garantir que fornece energia “limpa, económica e segura” a todos os seus cidadãos de modo a cumprir com os ambiciosos objetivos de 2050 e, para isso, tem na sua agenda um conjunto de políticas energéticas que englobam as seguintes prioridades e que estão relacionadas com o presente estudo (European Commission , 2019, p. 6):

- Promover iniciativas tecnológicas e de infraestruturas modernas no setor energético;
- Aumentar a conectividade entre os sistemas energéticas dos vários países para melhor integrar as energias renováveis na rede;
- Melhorar a eficiência energética.

A exploração dos pontos mencionados acima é de especial interesse para a indústria da Energia Nuclear, uma vez que, de acordo com os factos enunciados ao longo do Capítulo 3 deste trabalho, existem alternativas neste setor que podem contribuir para o alcance destes objetivos traçados pela Comissão Europeia através de investimento em novas tecnologias de geração nuclear.

Apesar deste argumento positivo, em 2020, a visão de longo prazo para a Energia Nuclear da Comissão Europeia era que, em 2050, o *share* de energia produzido através desta fonte seria de apenas 15% mas, como visto anteriormente, a frota de centrais nucleares encontra-se envelhecida e com poucas perspetivas de construção de novas centrais devido à anterior taxonomia e visão de que a energia nuclear não deve ser incluída na estratégia energética europeia, podendo mesmo fazer com que a capacidade de produção nuclear total desça para os 5% na União Europeia até 2040, senão existir uma mudança de perspetiva sobre a Energia Nuclear que permita que os governos e instituições privadas invistam no setor e o tornem mais viável (IEA, 2020).

Neste sentido, irei nos próximos pontos analisar o contexto e políticas atuais da Energia Nuclear, assim como analisar a atual tendência do mix energético Europeu derivado da invasão da Ucrânia pela Federação Russa para perceber se existe possibilidade real de inclusão desta forma de produção de energia no sentido de contribuir para os objetivos de neutralidade carbónica, mas também no sentido de garantir a segurança energética para o futuro da UE.

4.2 - Política Nuclear da União Europeia

As políticas e medidas de regulação energética europeias tiveram a sua origem com a criação, em 1952, da Comunidade Europeia do Carvão e do Aço (CECA) cujos membros fundadores (Alemanha, Bélgica, França, Itália, Luxemburgo e Países Baixos) pretendiam organizar a livre circulação do carvão e do aço entre as fronteiras destes países, com o objetivo de expandir o crescimento económico e garantir uma melhor qualidade de vida para os seus cidadãos através do livre acesso a fontes de produção, fixando preços e controlando a concorrência (European Union Law, 2017). Estes mesmos países, a 25 de Março de 1957, concordaram em criar a organização Euratom (European Atomic Energy Community) que visava coordenar os esforços dos países em organizar, financiar e desenvolver o uso da Energia Nuclear de forma pacífica através da assinatura do tratado *Euratom Treaty* (IEA, 2020, p. 229).

Atualmente, à Euratom pertencem formalmente todos os países da União Europeia e onde a Comissão Europeia assume o papel de responsável de propor legislação relativa à Energia Nuclear através de diretivas, regulação e recomendações que são posteriormente discutidas pelo Conselho Europeu antes de serem legisladas nos Estados Membros (European Union Law, 2007). Devido ao *Euratom Treaty*, a Comissão Europeia está vinculada a publicar um relatório denominado Programa Ilustrativo Nuclear (PINC) periodicamente, baseado nas estatísticas dos vários Estados Membros, relativamente às previsões do setor da Energia Nuclear no longo prazo (World Nuclear Association, 2022), tendo no último PINC, em 2016, sido feita uma previsão de redução da capacidade nuclear até 2025 e uma estabilização entre os 95 a 105 GWe até 2050 de produção de energia com origem nuclear.

A maior parte da infraestrutura nuclear existente na UE foi instalada nas décadas de 1970 e 1980, tendo o *share* de geração de eletricidade proveniente da Energia Nuclear atingido o seu pico em 2004, com 33% de toda a energia produzida na UE (IEA, 2020, p. 224).

Apesar de a UE deter a maior frota de reatores nucleares do mundo, contando com 103 reatores em 2020 num total de 100GWe (World Nuclear Association, 2022), a geração de energia nuclear tem decrescido em alguns dos Estados Membros, tendo totalizado em 2017 um *share* de apenas de 25% no mix energético da UE, com exceção da Hungria, Eslovénia, Bulgária, Finlândia, República Checa, Eslováquia, Espanha, Roménia e Reino Unido onde a tendência foi de aumento, como é possível observar na Figura 14.

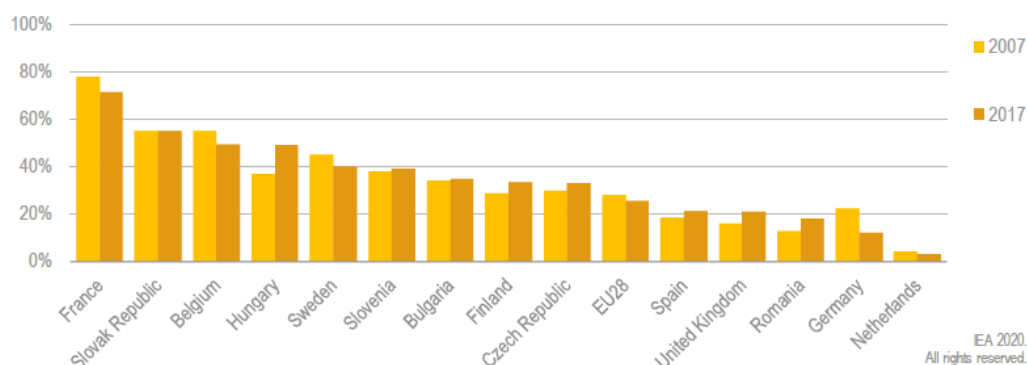


Figura 14 - Share de Energia Nuclear na produção de eletricidade nos Estados Membros (2007-2017) (IEA, 2019a)

O declínio da produção de energia nuclear na UE deve-se sobretudo ao encerramento de um grande número de reatores nucleares derivado à visão negativa do setor que cresceu pós acidente de Fukushima, em 2011, em que a Alemanha decidiu encerrar 8 dos seus 17 reatores, com planos de encerrar completamente a atividade nuclear no país até 2022, mas também devido ao elevado número de reatores que têm sido temporariamente encerrados para ações de manutenção e revisão, principalmente em França, Bélgica e Suécia, de modo a serem preparados para uma extensão da sua licença de atividade por mais tempo e devido à demora nos licenciamentos de novas centrais nucleares, mais modernas e eficientes (IEA, 2020), tendo levado a que, até 2015, tenham sido desativados 91 reatores.

Apesar de a Energia Nuclear ser uma fonte provada de baixas emissões de CO₂ e de atualmente contribuir para 50% de toda a eletricidade de baixo carbono produzida na UE, o setor enfrenta desafios claros ao seu desenvolvimento nomeadamente devido ao facto de vários Estados Membros serem fortemente contra o uso de Energia Nuclear e pelo facto de os mercados de eletricidade estarem numa tendência de responderem aos estímulos provocados pelas Energias Renováveis, com menos barreiras à entrada (World Nuclear Association , 2022). Sem incentivos claros ao investimento em novas centrais, nomeadamente com novas tecnologias de geração nuclear já enunciadas anteriormente, o número de reatores a serem encerrados irá superar largamente o número de novos projetos de geração nuclear até 2030, uma vez que grande parte das centrais existentes entrarão no seu período máximo de utilização.

Como é possível observar na Tabela 2, atualmente apenas a França e a Eslováquia têm reatores nucleares em construção, sendo por isso, os resultados destes projetos muito importantes para o futuro da Energia Nuclear na UE (World Nuclear Association , 2022).

Tabela 2 - Reatores Nucleares existentes e projetos de construção. Fonte: [https:// world-nuclear.org/information-library/ country-profiles/ others/ european-union.aspx](https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/others/european-union.aspx)

COUNTRY (Click name for Country Profile)	NUCLEAR ELECTRICITY GENERATION		REACTORS OPERABLE		REACTORS UNDER CONSTRUCTION		REACTORS PLANNED		REACTORS PROPOSED	
	2020		March 2022		March 2022		March 2022		March 2022	
	TWh	% e	No.	MWe net	No.	MWe gross	No.	MWe gross	No.	MWe gross
Belgium	32.8	39.1	7	5942	0	0	0	0	0	0
Bulgaria	15.9	40.8	2	2006	0	0	1	1000	2	2000
Czech Republic	28.4	37.3	6	3934	0	0	1	1200	3	3600
Finland	22.4	33.9	5	4394	0	0	1	1170	0	0
France	338.7	70.6	56	61,370	1	1650	0	0	0	0
Germany	60.9	11.3	3	4055	0	0	0	0	0	0
Hungary	15.2	48.0	4	1902	0	0	2	2400	0	0
Lithuania	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2700
Netherlands	3.9	3.3	1	482	0	0	0	0	0	0
Poland	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6000
Romania	10.6	19.9	2	1300	0	0	2	1440	1	720
Slovakia	14.4	53.1	4	1837	2	942	0	0	1	1200
Slovenia	6.0	37.8	1	688	0	0	0	0	1	1000
Spain	55.8	22.2	7	7121	0	0	0	0	0	0
Sweden	47.4	29.8	6	6882	0	0	0	0	0	0
EU	652.4	c 25%**	104	101,913	3	2592	7	7210	16	17,220
	TWh	% e	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe
	NUCLEAR ELECTRICITY GENERATION		OPERABLE		UNDER CONSTRUCTION		PLANNED		PROPOSED	

4.2.1 - Taxonomia da Energia Nuclear na UE

O contexto da segurança energética de UE, com a invasão da Ucrânia pela Rússia, trouxe de volta a discussão da inclusão da energia nuclear como peça fundamental do mix energético europeu, uma vez que, como referido anteriormente neste trabalho, 60% da energia consumida em 2019 na UE foi importada de países externos, e em que a Rússia assume um papel fundamental pois constitui o maior exportador de combustíveis fósseis para a UE (Eurostat, 2022), com especial ênfase no gás natural, recurso essencial na indústria e

utilização doméstica, cujas importações em 2021 constituíram 40% de todo o consumo na UE, num total de 155 mil milhões de metros cúbicos (IEA, 2022).

De facto, a energia nuclear tem sido desconsiderada como uma fonte alternativa de produção de energia para atingir os objetivos de neutralidade carbónica até 2050 assumidos pela União Europeia, devido não só à visão negativa sobre esta fonte de energia pós Fukushima, mas também devido à taxonomia da UE relativamente aos investimentos sustentáveis (Concil on Foreign Relations , 2022).

A taxonomia da UE constitui um sistema de classificação de atividades económicas ambientalmente sustentáveis que vão de encontro às metas do *European Green New Deal* e que tem como foco dar definições exatas sobre que investimentos são considerados “verdes” (Comissão Europeia, 2020). A base da taxonomia da UE foi legislada a 18 de Junho de 2020 e entrou em vigor a 12 de Julho de 2020 através do Regulamento EU 2020/852 do Parlamento Europeu, com o propósito de estabelecer um regime para a promoção do desenvolvimento sustentável através do investimento público e privado, traçando seis objetivos a que as atividades económicas em questão têm de cumprir para poderem ser consideradas sustentáveis (Comissão Europeia, Regulamento EU 2020/8521):

1. Contribuir para a mitigação das alterações climáticas;
2. Contribuir para a adaptação da economia face às alterações climáticas;
3. Facilitar a transição para uma economia circular;
4. Prevenção e controlo da poluição;
5. Contribuir para a proteção e restauro da biodiversidade e ecossistemas;
6. Contribuir para o uso sustentável dos recursos hídricos e marinhos.

Relativamente à energia nuclear, na data de publicação do regulamento EU 2020/852 foi criada uma investigação independente pelo *Joint Research Centre (JCR)*, para avaliar se esta fonte de energia não iria contra os 6 objetivos traçado, segundo o critério “*do no significant harm*” (não prejudicar significativamente) e que, após a sua publicação em Junho de 2021, concluiu que as operações de produção de energia nuclear não causam danos significativos a nenhum dos mesmos, e que foram encontradas evidências de que causam menos danos

do que outras tecnologias de geração de energia, relativamente à saúde humana e ao ambiente (European Commission, 2021, p. 15).

O desenvolvimento e publicação deste relatório foi essencial uma vez que tinha que ser garantido o critério de que esta não prejudica significativamente o ambiente através de uma análise profunda dos seus impactos nos objetivos da Taxonomia da UE e, a 9 de Março de 2022, foi tornado publico o Regulamento Delegado UE 2022/1214 pela Comissão Europeia que integra as atividade de produção de energia nuclear na Taxonomia da UE, a par do gás natural e que foi oficialmente aprovado por unanimidade pelo Parlamento Europeu a 11 de Julho de 2022, como medida de aceleração da descarbonização em linha com o *European Green New Deal* (Comissão Europeia , 2022).

Este Regulamento é de especial importância para o presente estudo, uma vez que nele estão incluídas as novas tecnologias avançadas (GEN IV) de geração nuclear em fase pré-comercial, (Anexo I, 4.26, UE 2022/1214), a construção e exploração de novas centrais para produção de eletricidade ou calor, incluindo para a produção de hidrogénio (Anexo I, 4.27, UE 2022/1214) e a produção de eletricidade a partir de energia nuclear em instalações existentes (Anexo I, 4.28, UE 2022/1214), como parte integrante da Taxonomia da UE.

Uma vez que a energia nuclear se encontra agora incluída nesta lista, o investimento em novas tecnologias de geração nuclear ter um novo incentivo, uma vez que, ao contrário das tecnologias convencionais, o tempo e custos de construção de uma nova central é significativamente menor, a sua aplicação é muito mais versátil e a sua utilização é também mais segura, oferecendo por isso uma oportunidade interessante em termos de transição energética para fontes menos intensas em carbono tal como consta nos objetivos da Comissão Europeia em atingir a neutralidade carbónica até 2050.

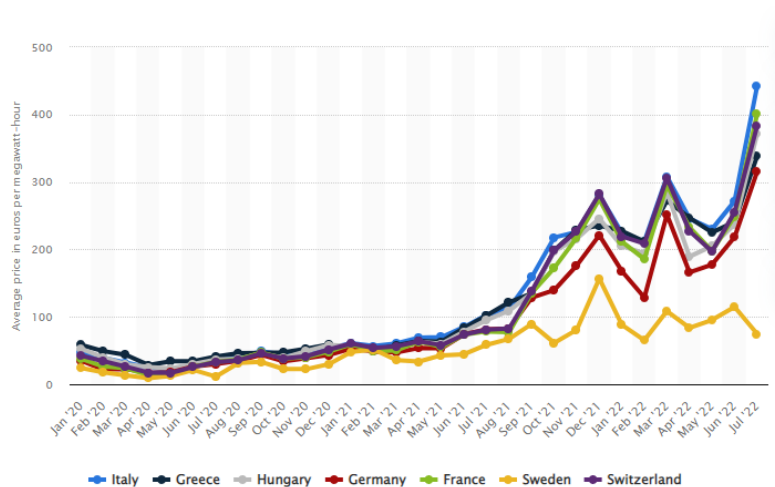


Figura 15 - Preço médio da Eletricidade (MWh) em alguns países da UE (2020-2022) (Fonte: <https://www.statista.com/statistics/1267500/eu-monthly-wholesale-electricity-price-country/>)

Para além destas valências a energia nuclear, nomeadamente as novas tecnologias, pode também ser relevante em contextos como a atual crise energética europeia, derivada sobretudo pelas sanções económicas impostas à Rússia, que veio salientar a dependência energética da UE e a necessidade de reformar o sistema energético europeu para evitar períodos de extrema volatilidade de preços da eletricidade, como os observados durante o ano de 2022 (Figura 15) e que têm efeitos nefastos na atividade e competitividade económica das pessoas e empresas uma vez que é possível produzir elevadas quantidades de energia a custos marginais baixos e sem emissões de GEE sempre que a procura o justificar, uma vez que as centrais nucleares se ajustam facilmente às necessidades do *grid* elétrico pois não é necessário manter esta energia armazenada e a intermitência não é uma variável, ao contrário das Energia Renováveis.

5 - Conclusão

A presente dissertação de mestrado assumiu como objetivo principal estudar o contexto do setor energético europeu e compreender se as novas tecnologias de geração de energia nuclear constituem uma alternativa viável de serem incluídas nas políticas energéticas da União Europeia, e se podem impactar de forma positiva o caminho para a neutralidade carbónica estimada para 2050, num esforço de limitar o aquecimento global em 1.5°C, e contribuir ao mesmo tempo para a sua segurança energética.

Para dar resposta à questão de investigação, foi analisado em primeiro lugar o atual contexto do sistema energético dos países da União Europeia, através de dados estatísticos, onde se observou que a maior parte das emissões de GEE advêm do setor energético, nomeadamente na produção e transformação de energia mostrando, portanto, a elevada intensidade carbónica deste setor.

Apesar de a produção de energia primária com recurso a combustíveis fósseis ter sido inferior à energia primária produzida com base em energias renováveis em 2019 na UE, a maior parte da energia consumida continua a ser de origem fóssil, evidenciando que o sistema energético europeu está não só intrinsecamente carbonizado, mas também que a energia produzida de forma renovável não é suficiente para as necessidades, revelando a crescente dependência energética observada nas últimas duas décadas e as suas consequências com a recente invasão da Ucrânia pela Rússia, que colocou em causa o abastecimento de gás natural e levou ao aumento exponencial dos preços da energia em toda a Europa.

Neste sentido, procurou olhar-se para as características da Energia Nuclear tanto das tecnologias predominantes como das mais recentes com base na literatura existente das organizações de regulação energética, sob um ponto de vista histórico, técnico e ambiental para perceber qual a predominância e importância desta fonte de produção de energia primária ao nível da sua contribuição para as emissões de GEE dentro do setor energético ao longo do tempo e qual o seu potencial contributo para a mitigação das alterações climáticas por parte da EU no futuro, de acordo com os objetivos traçados de neutralidade carbónica, nomeadamente com o recurso às novas tecnologias de geração nuclear,

explorando as suas características e mais-valias em relação à geração de energia nuclear convencional, de modo a avaliar a sua possível inclusão nas políticas energéticas europeias.

De um modo geral observou-se que a Energia Nuclear apresenta elevadas barreiras à entrada uma vez que são necessários elevados custos iniciais mas que, no entanto, esta se revela competitiva no longo prazo em termos de custos de manutenção e de atividade quando comparada com os combustíveis fósseis, quando são incluídos os custos ambientais, sociais e outros custos variáveis associados à sua atividade, uma vez que o custo normalizado de produção de eletricidade a partir desta fonte já internaliza, por exemplo, os custos relacionados com as emissões de GEE, que são aproximadamente nulos fazendo assim da Energia Nuclear a fonte de energia primária com menos intensidade carbónica, ou seja, a mais limpa mesmo quando comparada com outras renováveis.

Apesar destes pontos positivos, nos países onde existem centrais nucleares tem-se observado uma tendência decrescente no investimento e produção, nomeadamente devido não só à perceção pública negativa face a esta fonte de energia como também ao cada vez maior interesse em outras alternativas de produção de energia com reduzida pegada ecológica como a energia solar, hídrica e eólica e devido ao facto de que a maior parte das centrais nucleares existentes já se encontram em final de ciclo de vida e a sua extensão de operação ou construção de novas centrais assentes em tecnologia ultrapassada não apresentam benefícios claros em termos financeiros ou de alocação de outros recursos como o espaço necessário para a sua construção .

No entanto verificou-se que atualmente existem tecnologias avançadas de geração nuclear (*Advanced Nuclear Reactors IV GEN e Small Modular Reactors, SMR*), que embora embrionárias, possuem mais-valias claras em vários campos quando comparadas com as tecnologias predominantes, nomeadamente em termos de segurança, já que a construção destes reatores não implica a sua submissão a elevadas pressões nem a componentes externos para o seu arrefecimento, como em termos de redução dos resíduos radioativos pois a utilização do combustível é mais eficaz, mas também em termos de versatilidade de transporte e construção e acima de tudo dos seus custos associados, uma vez que sendo estes de dimensão tendencialmente menor, podem ser construídos ou alocados em determinados locais de

forma mais eficiente e de mais de acordo com as reais necessidades energéticas da rede, ajustando-se melhor à procura.

Para procurar entender se as novas tecnologias de geração nuclear se encontram em linha com os objetivos energéticos e climáticos da UE, foi necessária uma análise das políticas energéticas, em geral, e da energia nuclear, em particular, através da legislação em vigor mas também anterior, de modo a perceber qual a tendência do sistema energético europeu na última década. Foram analisadas as principais legislações desde 2009, através das Diretivas Europeias, em matéria de energia e clima e concluiu-se que os objetivos da EU são claros em criar uma economia sustentável e de baixo carbono de forma a que nenhum cidadão europeu fique de fora da transição energética sem nunca ter havido orientações evidentes sobre como alcançar estes objetivos até 2019 com a introdução do *European Green Deal*, em 2019, nomeadamente em matéria de energia já que a tendência da dependência energética e dos combustíveis fósseis se continuou a verificar.

No entanto, o EGD, traça objetivos em matéria de energia onde as novas tecnologias de geração nuclear se aplicam, nomeadamente na promoção de iniciativas de modernização do sistema energético. Aliado a este facto, a decisão de incluir a Energia Nuclear como parte integrante da Taxonomia Europeia constituiu um marco histórico muito importante para o desenvolvimento deste setor pois, ao considerar esta fonte de energia como verde, podem abrir-se portas a novos investidores dando origem a um mercado com maior atratividade.

Com base nos resultados encontrados relativos às características inovadoras das novas tecnologias de geração nuclear como da mudança de paradigma em relação à energia nuclear, pode concluir-se que estas tecnologias podem ter um impacto muito positivo para o alcance das metas de neutralidade carbónica se inseridas nas políticas energéticas europeias, podendo ter uma contribuição muito positiva para a redução das emissões de GEE como também para o aumento da eficiência energética mas também da segurança energética da UE.

6. Referências Bibliográficas

- Association, W. N. (2020). *Outline History of Nuclear Energy* . Obtido de <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/outline-history-of-nuclear-energy.aspx>
- Attila, A., Biró, B., Adorján, L., Dobos, Á. C., Illés, G., Tóth, N. K., . . . Zsiborás, Z. T. (2021). Comparative analysis of national energy strategies of 19 European countries in light of the green deal's objectives. (E. C. X, Ed.) 12(ISSN 2590-1745). doi:100136
- Bank, W. (2018). *Total Greenhouse Gas Emissions*.
- BBC. (2 de Fevereiro de 2022). *Climate change: EU moves to label nuclear and gas as sustainable despite internal row*. Obtido de <https://www.bbc.com/news/world-europe-60229199>
- Bloomberg. (23 de January de 2022). *What Would War in Ukraine Mean for Europe's Energy Crisis?* Obtido de Bloomberg.com: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-01-23/what-would-war-in-ukraine-mean-for-europe-s-energy-crisis>
- BP. (2020). *Energy Outlook 2020*.
- Brouwer, K. M., & Bergkamp, L. (2021). *Road to EU Climate Neutrality by 2050 - Spatial Requirements Of Wind / Solar and Nuclear Energy and Their Respective Costs*. Brussels.
- Comissão Europeia . (2015). *A Framework Strategy for a Resilient Energy Union with a Forward-Looking Climate Change Policy* . Bruxelas.
- Comissão Europeia . (2019). *Pacto Ecológico Europeu*. Bruxelas.
- Comissão Europeia . (9 de Março de 2022). *REGULAMENTO DELEGADO (UE) 2022/1214 DA COMISSÃO*. Obtido de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=CELEX:32022R1214&from=EN>

- Comissão Europeia. (2015). *State of the Energy Union - questions and answers*. Obtido de https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/MEMO_15_6106
- Comissão Europeia. (22 de Junho de 2020). *EU taxonomy for sustainable activities*. Obtido de https://finance.ec.europa.eu/sustainable-finance/tools-and-standards/eu-taxonomy-sustainable-activities_en
- Concil on Foreign Relations . (15 de Março de 2022). *Could Nuclear Power Cut Europe's Dependence on Russian Energy?* Obtido de Could Nuclear Power Cut Europe's Dependence on Russian Energy?: <https://www.cfr.org/in-brief/could-nuclear-power-cut-europes-dependence-russian-energy>
- Crippa, M. (2019). *Fossil CO2 and GHG emissions of all world countries*.
- Energy Innovation Reform Project. (17 de Julho de 2017). *What Will Advanced Nuclear Power Plants Cost?* Obtido de <https://www.innovationreform.org/2017/07/01/will-advanced-nuclear-power-plants-cost/>
- European Comission . (11 de Dezembro de 2019). *The European Green Deal* . Obtido de The European Green Deal : https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication_en.pdf
- European Comission . (2021). *State of the Energy Union 2021 - Contributing to the European Green Deal and the Union's Recovery*. European Comission . Brussels: European Comission. Obtido de https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_5554
- European Comission. (2009). *2020 climate & energy package*. Obtido de 2020 climate & energy package: https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2020-climate-energy-package_en
- European Comission. (2018). *A Clean Planet for All—A European Strategic Long-Term Vision for a Prosperous, Modern, Competitive and Climate Neutral Economy*. Brussels.
- European Comission. (29 de Junho de 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. Obtido de https://finance.ec.europa.eu/system/files/2021-07/210629-nuclear-energy-jrc-review-scheer-report_en.pdf

European Union Law . (19 de Outubro de 2007). *Treaty establishing the European Atomic Energy Community (Euratom)*. Obtido de Treaty establishing the European Atomic Energy Community (Euratom): <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/treaty-establishing-the-european-atomic-energy-community-euratom.html>

European Union Law. (11 de Dezembro de 2017). *Tratado que institui a Comunidade Europeia do Carvão e do Aço (Tratado CEECA)*. Obtido de Tratado que institui a Comunidade Europeia do Carvão e do Aço (Tratado CEECA): <https://eur-lex.europa.eu/PT/legal-content/summary/treaty-establishing-the-european-coal-and-steel-community-ecsc-treaty.html>

Eurostat. (2019). *From where do we import energy?* . Obtido de <https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy/bloc-2c.html#carouselControls?lang=en>

Eurostat. (27 de January de 2022). *Energy Statistics - An overview* . Obtido de https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_statistics_-_an_overview

Eurostat. (Janeiro de 2022). *Nuclear Energy Statistics*. Obtido de https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Nuclear_energy_statistics#Nuclear_heat_and_gross_electricity_production

Congressional Research Service. (18 de Abril de 2019). *Advanced Nuclear Reactors: Technology Overview and Current Issues*. Obtido de <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R45706>

Greel, L. (25 de Setembro de 2003). *Ripple Effects: Population and Coastal Regions*. p. 8.

- Hainsch, K., Loffle, K., Burandt, T., del Granado, P. C., Pisciella, P., & Zwickl-Bernhard, S. (4 de Março de 2021). *Energy Transition Scenarios: What policies, societal attitudes and technology developments will realize the EU Green Deal*, p. 17.
- Hassan, S. (2020). Is Nuclear Energy a better alternative for mitigating CO2 emissions in BRICS countries? An empirical analysis.
- IEA. (2019). *Report extract - power sector* . Obtido de <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2019/power-sector>
- IEA. (2019). Nuclear Power In a Clean Energy System. *Nuclear Power In a Clean Energy System*.
- IEA. (2020). *European Union 2020 Energy Policy*.
- IEA. (2020). *European Union Energy Policy Review 2020*.
- IEA. (2021). *Global Energy Review*.
- IEA. (2021). *World Energy Outlook*. Obtido de <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>
- IEA. (3 de Março de 2022). *How Europe can cut natural gas imports from Russia significantly within a year*. Obtido de <https://www.iea.org/news/how-europe-can-cut-natural-gas-imports-from-russia-significantly-within-a-year>
- International Atomic Energy Agency. (s.d.). *Getting to the Core of Radioactive Waste*. Vienna, Austria.
- IPCC. (2018). *Global Warming of 1,5°C - An IPCC Special Report on the impacts of Global Warming above 1,5°C*.
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021, The Physical Science Basis - Summary For Policymakers*. IPCC.
- Johnson, T. (2011). *Nuclear Power Expansion Challenges*. Obtido de Council on Foreign Relations : <https://www.cfr.org/backgrounder/nuclear-power-expansion-challenges>

Lazard. (Novembro de 2017). Obtido de <https://www.lazard.com/media/450337/lazard-levelized-cost-of-energy-version-110.pdf>

Lovelock, J. (2014). *A Rough Ride to the Future*. Penguin Books.

Mez, L. (2012). Nuclear Energy: Any solution for sustainability and climate protection ?

MIT. (2018). *The Future of Nuclear Energy in Carbon-Constrained World*. Obtido de <https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2018/09/The-Future-of-Nuclear-Energy-in-a-Carbon-Constrained-World.pdf>

Nikolaus Muellner, N. A. (2021). Is nuclear energy the solution to climate change.

Nuclear Energy Agency OECD. (2007). *Innovation in Nuclear Eenergy Technology*.

OCDE. (2020). *Projected Costs of Generating Electricity*.

Our World in Data. (2021). *Global generation of nuclear energy*. Obtido de <https://ourworldindata.org/nuclear-energy>

Robock, Z. (2014). Economic Solutions to Nuclear Energy's Financial Challenges.

Sailor, W. (2000). Nuclear Power: A Nuclear Solution to Clianmte Change ? .

Sovacool, B. K. (2020). Differences in carbon emissions reduction between countries pursuing renewable electricity versus nuclear power.

Tarantol, A. (Novembro de 2014). *Fast-Acting Nuclear Reactor Will Power Through Piles of Plutonium*. Obtido de <https://gizmodo.com/fast-acting-nuclear-reactor-will-power-through-piles-of-1655683450>

The Guardian . (10 de Fevereiro de 2022). *France to build up to 14 new nuclear reactors by 2050, says Macron*. Obtido de <https://www.theguardian.com/world/2022/feb/10/france-to-build-up-to-14-new-nuclear-reactors-by-2050-says-macron>

TIME. (Novembro de 2021). *A New Generation of Nuclear Reactors Could Hold the Key to a Green Future*. Obtido de <https://www.nytimes.com/2021/11/29/business/nuclear-power-europe-climate.html>

U.S Department Of Energy, O. o. (Janeiro de 2002). The History of Nuclear Energy. p. 19.

World Energy Association. (Março de 2022). *Nuclear Power in the European Union* . Obtido de Nuclear Power in the European Union : <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/others/european-union.aspx>

World Nuclear Association . (Setembro de 2021). *Economics of Nuclear Power* . Obtido de <https://world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power.aspx>

World Nuclear Association . (Março de 2022). *Nuclear Power in the European Union*. Obtido de <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/others/european-union.aspx>

World Nuclear Association. (Dezembro de 2020). *Generation IV Nuclear Reactors*. Obtido de <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/generation-iv-nuclear-reactors.aspx>

World Nuclear Association. (2020). *Outline History of Nuclear Energy*. Obtido de <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/outline-history-of-nuclear-energy.aspx>

World Nuclear Association. (Maio de 2022). *Nuclear Power Reactors*. Obtido de <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx>

World Nuclear Association. (Junho de 2022). *Plans For New Reactors Worldwide*. Obtido de Plans For New Reactors Worldwide: <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/plans-for-new-reactors-worldwide.aspx>

World Nuclear Association. (s.d.). *What is Nuclear waste, and what do we do with it?* . Obtido de <https://world-nuclear.org/nuclear-essentials/what-is-nuclear-waste-and-what-do-we-do-with-it.aspx>