



A Energia Nuclear no contexto da descarbonização e do mix energético Português

Maria Margarida Faustino Pinheiro

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Duarte de Mesquita e Sousa

Júri

Presidente: Prof. Célia Maria Santos Cardoso de Jesus

Orientador: Prof. Duarte de Mesquita e Sousa

Vogal: Prof. João José Esteves Santana

Junho 2022

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Agradecimentos

Entregar esta tese representa a finalização de um capítulo importante da minha vida. Agradeço profundamente às pessoas mais importantes e responsáveis pelo meu sucesso acadêmico, profissional e pessoal - os meus pais. Estou-vos eternamente agradecida pela educação que me deram e por todo o amor que têm por mim. Por toda a paciência e exigência que sempre tiveram comigo, um grande obrigado.

No que diz respeito ao meu percurso escolar, não poderia deixar de fazer referência à minha explicadora de física e química do secundário e amiga, a professora Lurdes Granadeiro. Sem ela não teria vindo para este curso e sem a sua ajuda não o conseguiria ter terminado.

Agradeço ainda à minha irmã por ver sempre o lado racional das coisas e conseguir sempre trazer-me calma.

Agradeço aos meus amigos que estiveram sempre disponíveis, não só para me fazerem rir e distraírem mas também por me terem posto a trabalhar quando eu não queria - um agradecimento especial à Carlota, à Carolina, à Inês, à Pikika, à Joana e ao Gui. Agradeço também ao Afonso e à Guadalupe - amigos e colegas de casa - sem a sua ajuda esta tese não teria sido entregue, obrigada pela paciência, pelas conversas motivacionais e por toda a ajuda que me deram durante esta fase final. Um agradecimento especial ao meu amigo Diogo pela simpatia, disponibilidade e por toda a ajuda que me deu durante este percurso.

Agradeço aos meus colegas de trabalho que, durante esta reta final, me trouxeram calma e sabedoria. *"Tenho a vida que eu quis, nem sempre feliz, mas foi a vida que eu escolhi"* - António.

Não posso deixar de agradecer ao meu orientador professor Duarte Mesquita por me ter desafiado a fazer esta tese e por ter estado sempre disponível para me ajudar e por me ter encaminhado na direção certa.

Por último, agradeço à minha instituição - Instituto Superior Técnico - por todos os desafios que me deu e pelas alegrias e oportunidades que me trouxe. Agradeço principalmente pelas pessoas que conheci aqui. Fui muito feliz durante estes 6 anos.

Abstract

The world is facing its greatest crisis in human history, and given the pressing need to reduce CO_2 emissions, this thesis aims to provide a credible alternative to the government's plan (RNC2050). A modeling program was used to examine the Portuguese plan and determine its practicality. The viability of a nuclear power plant in Portugal was investigated as a low-carbon energy source with the goal of reaching carbon neutrality by 2050. A simulation tool was used to assess the impact of putting in a nuclear power plant.

The development of a model based on the Portuguese plan has revealed that wind energy is the renewable energy source with the most potential, while solar energy has proven to be less cost-effective. The demand for batteries was more than RNC2050 predicted. Due to a lack of solid-based energy, concerns about supply security have arisen (according to the plan the security will be guaranteed by hydro and batteries). Extreme weather events will become more often as a result of climate change, and water resources may not be sufficient to fulfill demand.

The addition of a nuclear power plant to the energy mix has proven to be economically viable. Would improve supply security and generate revenue. It would relieve pressure on renewable energy ambitions, allowing decarbonization to be achieved. However, changing public opinion and assessing the dangers will be required.

The advantages and disadvantages of solar, wind and nuclear technologies were evaluated through a brief analysis of their life cycle.

Keywords

Climate Change; Decarbonization; Carbon Neutrality; Nuclear Power in Portugal

Resumo

Estando o mundo a atravessar pelo maior desafio na história da humanidade, e dada a urgência em acabar com as emissões de CO_2 , esta tese teve como principal objetivo apresentar uma alternativa viável ao plano proposto pelo governo. Analisou-se o plano português e estudou-se a sua viabilidade através de um programa de modelação. Estudou-se a exequibilidade de uma central nuclear em Portugal, como fonte de energia de baixo carbono e no sentido de atingir a neutralidade carbónica em 2050. Utilizou-se novamente uma ferramenta de modulação que simulou como seria o mix energético com a inserção de nuclear e estimou a produção elétrica.

A criação de um modelo de aproximação ao plano português concluiu que a energia eólica é a fonte renovável com maior potencial, porém, a solar provou não ser tão custo-eficaz. A necessidade em baterias foi superior à estimada no plano. Levantaram-se questões relativas à segurança no abastecimento pela falta de uma energia de base sólida (segundo o plano será o conjunto hídrica-baterias). As alterações climáticas irão provocar aumento dos fenómenos meteorológicos extremos e os recursos hídricos poderão não ser suficientes para satisfazer as necessidades de consumo.

A introdução de uma central nuclear provou ser economicamente viável para o mix energético. Aumentaria a segurança no abastecimento e produziria riqueza. Libertaria pressão nos objetivos das renováveis, cumprindo a descarbonização. Porém, será necessário alterar a opinião pública e avaliar os riscos.

Avaliaram-se as vantagens e desvantagem das tecnologias solar, eólica e nuclear, através de uma breve análise ao ciclo de vida.

Palavras Chave

Alterações Climáticas; Descarbonização; Neutralidade Carbónica; Energia Nuclear em Portugal.

Conteúdo

1	Introdução	2
1.1	Motivação	3
1.2	Objetivos	4
1.3	Estrutura	5
2	Estado da arte: consumo e mix energético	7
2.1	Panorama Atual	8
2.2	Mix Energético e Consumo Atual	10
2.3	Energia Nuclear	15
3	Previsão dos Consumos e Mix Energético nas próximas três décadas	21
3.1	Critérios tidos em conta para a criação do modelo	22
3.2	Modelação de acordo com o plano nacional	26
3.3	Análise dos resultados obtidos	29
4	Inserção de uma central Nuclear no Sistema Elétrico Português	31
4.1	Dimensionamento da central nuclear	32
4.2	Resultados da Modelação	34
4.3	Análise dos resultados obtidos	35
5	Análise Integrada para as tecnologias Solar, Eólica e Nuclear	39
5.1	Custo Nivelado da Energia - LCOE	40
5.2	Emissões de Gases com Efeito de Estufa	41
5.3	Consumo de água	43
5.4	Utilização do solo	44
5.5	Materiais	45
6	Conclusão	47
6.1	Conclusões Finais	48
6.2	Trabalho Futuro	50

Lista de Figuras

2.1	Quota de energia renovável no consumo final bruto de energia na UE27. Fonte: Eurostat	9
2.2	Consumos totais nacionais em 2018. Fonte: DGEG	10
2.3	Evolução do Consumo de Energia Final por setor de atividade. Fonte: DGEG	11
2.4	Fonte: DGEG	13
2.5	Evolução da Produção Bruta de Energia Elétrica por tipo de fonte em Portugal. Fonte: DGEG	13
2.6	Evolução da Potência Instalada para produção de Eletricidade em Portugal. Fonte: DGEG	14
2.7	Potência Instalada em Portugal em 2018. Fonte: DGEG	14
2.8	Capacidade Instalada dos reatores nucleares em 2019. Fonte: IAEA PRIS	16
2.9	Percentagem de nuclear no mix energético para produção de eletricidade na UE27 em 2019	16
2.10	Percentagem de mortes por fonte por 1 TWh produzido Fonte: Markandya Wilkinson; Sovacool e outros; Our World In Data	19
3.1	Trajetória de redução de emissões até 2050 face a 2005. Fonte: Eurostat	22
3.2	Previsão do crescimento da população residente em Portugal. Fonte: Pordata, Eurostat	23
3.3	Previsão a longo prazo do crescimento do Produto Interno Bruto real em Portugal. Fonte: OCDE	24
3.4	Previsão do consumo de eletricidade final em Portugal. Fonte: RNC2050	24
3.5	Sistema Energético de Referência para Portugal	25
3.6	Evolução da Capacidade Instalada	28
3.7	Previsão da Produção de Energia Elétrica em Portugal	28
4.1	Diagrama de duração de carga para o ano de 2019	32
4.2	Previsão da Produção de Energia Elétrica em Portugal com Nuclear no mix energético	34
4.3	Previsão da Produção de Energia Elétrica em Portugal com Nuclear no mix energético	35
4.4	Produção de Eletricidade na Califórnia no dia 20/04/2022. Fonte: CAISO	37

4.5	Emissões de CO_2 na Califórnia no dia 20/04/2022. Fonte: CAISO	37
5.1	Emissões resultantes do ciclo de vida das tecnologias solar PV, eólica e nuclear	42
5.2	Consumo de água no ciclo de vida das tecnologias solar PV, eólica e nuclear [1]	43
5.3	Materiais utilizados pelas tecnologias solar PV, eólica e nuclear [2]	46

Lista de Tabelas

2.1	Metas nacionais de redução de emissões de CO ₂ por setor [3]	9
2.2	Consumo de Energia Final por setor de atividade em Portugal, em 2018. Fonte: DGEG	11
2.3	Importações, Exportações e Saldo Importador em Portugal em 2018. Fonte: DGEG	12
3.1	Parâmetros definidos para o ano base (2019) do modelo. Fonte: ETSAP	26
3.2	Evolução da capacidade instalada proposta no Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050) e obtida na modelação	27
4.1	Evolução da capacidade instalada proposta no RNC2050 e obtida na modelação com nuclear no mix energético	35
5.1	Emissões resultantes do ciclo de vida das tecnologias solar PV, eólica e nuclear [4]	42
5.2	Consumo de água no ciclo de vida das tecnologias solar PV, eólica e nuclear [1]	43
5.3	Requisitos de solo das tecnologias solar PV, eólica e nuclear [2]	44
5.4	Requisitos de materiais das tecnologias solar PV, eólica e nuclear [2]	46

Acrónimos e Siglas

DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
FER	Fontes de Energia Renovável
GEE	Gases com Efeito de Estufa
IPCC	Painel Intergovernamental sobre as Mudanças Climáticas
LCOE	<i>Levelized Cost of Energy</i>
LULUCF	<i>Land Use, Land-Use Change and Forestry</i>
OM	Operação e Manutenção
PIB	Produto Interno Bruto
PNEC2030	Plano Nacional Energia e Clima 2021-2030
p.p.	Pontos Percentuais
PDDD	Pesquisa, Desenvolvimento, Demonstração e Disseminação
PWR	<i>Pressurized Water Reactors</i>
RNC2050	Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050
SER	Sistema Energético de Referência
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
UE27	União Europeia 27
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas
U235	Urânio 235

1

Introdução

Conteúdo

1.1	Motivação	3
1.2	Objetivos	4
1.3	Estrutura	5

1.1 Motivação

O aquecimento global já deu provas de ser o maior desafio que a humanidade encontrou em toda a sua história. Estamos a caminhar para um desastre climático. O Acordo de Paris assinado em 2015, na 21ª Conferência das Partes em Paris, estipulou que, de forma a mitigar e controlar os efeitos das alterações climáticas, é fundamental garantir que o aumento da temperatura média global se mantenha abaixo dos 2°C acima dos níveis pré-industriais. Ficou ainda o compromisso, por parte da comunidade internacional, em tentar que o aumento não exceda 1,5°C [5]. Na Conferência de Imprensa para as Mudanças Climáticas de 2022, realizada pelo Painel Intergovernamental sobre as Mudanças Climáticas (IPCC), António Guterres esclareceu que estamos a caminhar para o dobro dos 1,5°C estipulados em Paris. Neste momento já é possível ver grandes consequências das alterações climáticas, um pouco por todo o Mundo. Estamos perante uma emergência climática e, caso continuemos com as políticas atuais iremos enfrentar efeitos catastróficos [6]. Para que o aumento da temperatura média global não exceda os 1,5°C estipulados seria necessário diminuir 45% das emissões de Gases com Efeito de Estufa (GEE) durante a década de 2020-2030. As políticas atuais caminham para um aumento de 14% [7].

No final do ano de 2019, a Comissão Europeia apresentou o Pacto Ecológico Europeu e comprometeu-se a atingir a neutralidade carbónica em 2050, ou seja, zero emissões líquidas de GEE [8]. Para tornar isto possível, todos os estados membros tiveram de desenvolver planos e metas a atingir até 2050. Portugal tem mostrado vontade em não só cumprir com os objetivos, mas também ser dos primeiros a atingir certas metas. Para isso, o governo português desenvolveu o Plano Nacional Energia e Clima 2021-2030 (PNEC2030) e o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050) onde ficam estabelecidos quais os passos a tomar para atingir a neutralidade carbónica até 2050.

No entanto, ficou claro pelo IPCC, na Conferência de Imprensa para as Mudanças Climáticas em 2022, que os planos delineados poderão não ser suficientes e que teremos de tomar decisões drásticas no que diz respeito aos combustíveis fósseis. A produção de energia terá de mudar radicalmente e passará por energias limpas e não emissoras de gases com efeito de estufa.

A União Europeia criou um sistema para facilitar o investimento sustentável, o Regulamento de Taxonomia orienta os investidores sobre quais as atividades económicas que são ambientalmente sustentáveis. Obriga também as empresas europeias a comunicarem as suas atividades de forma a perceber se estão alinhadas com a taxonomia. O objetivo é fomentar e subsidiar atividades sustentáveis e remover ajudas a projetos que não estiverem de acordo com o regulamento e contribuir para o aumento das emissões. No início do ano de 2022, levantou-se a questão sobre a inclusão de energia nuclear e gás natural no Regulamento de Taxonomia, durante um período de transição e de forma a ajudar a atingir as metas propostas. A Comissão Europeia definiu que certas atividades nucleares e de gás serão incluídas como transacionais - aquelas que ainda não poderão ser substituídas por al-

ternativas de baixo carbono, que sejam economicamente viáveis e contribuam para a mitigação das mudanças climáticas. Estas atividades terão um papel importante na transição para uma economia neutra em carbono, no entanto estão sujeitas a condições restritas e não podem excluir o investimento em energias renováveis [9] [10].

1.2 Objetivos

A descrição do problema acima revela a urgência numa ação climática drástica. Apesar de Portugal já ter desenvolvido o Roteiro para a Neutralidade Carbónica e ser dos Estados Membros com mais inserção de energias renováveis no seu mix energético, é importante apresentar alternativas e questionar a viabilidade do plano em questão. É com esse objetivo que esta tese é apresentada: estudar a viabilidade do RNC2050 e apresentar uma solução alternativa.

Têm sido levantadas questões relativamente às energias renováveis, nomeadamente à energia solar e à energia eólica, pois estas tecnologias não são completamente isentas de emissões de GEE (principalmente no fabrico dos componentes). As energias solar e eólica têm rendimentos baixos e estão completamente dependentes das condições ambientais e, dado que caminhamos para um mundo em que as alterações climáticas irão provocar muitas condições adversas, levantam-se algumas questões sobre a segurança no abastecimento num sistema energético maioritariamente dependente destas duas tecnologias. O consumo energético irá aumentar bastante e apesar das melhorias na eficiência energética, o mundo está a dar passos para se tornar cada vez mais elétrico. A inserção de carros elétricos irá provocar não só um forte aumento no consumo, mas também muitas transformações na rede elétrica.

É fundamental garantir a segurança e fiabilidade do sistema energético português e, apesar do foco principal ser atingir a neutralidade carbónica, não poderemos pôr em risco o abastecimento de eletricidade. Esta tese irá estudar viabilidade de uma central nuclear em Portugal que servirá de base para o mix energético.

Este trabalho tem como principais objetivos:

- Analisar o Roteiro para a Neutralidade Carbónica em 2050, em Portugal;
- Simular as necessidades energéticas de acordo com o RNC2050;
- Dimensionar uma central nuclear que sirva de base ao mix energético português;
- Simular o mix energético com a inserção de uma central nuclear em Portugal;
- Fazer uma avaliação integrada às tecnologias solar, eólica e nuclear de forma a perceber as suas vantagens e desvantagens.

1.3 Estrutura

Esta tese é constituída por seis capítulos. No presente capítulo apresenta-se a descrição do problema e os objetivos que servem como base para este trabalho, assim com a estrutura do mesmo.

O capítulo 2 fornece uma breve introdução sobre o panorama atual, não só em Portugal mas também na União Europeia; Discute o mix energético e consumo atual no território nacional; Apresenta ainda uma breve explicação sobre energia nuclear e como é que ela está presente na Europa, incluindo algumas políticas acerca do futuro da nuclear em cada estado membro.

O capítulo 3 fornece uma análise sobre o funcionamento do programa utilizado para simular o sistema energético português e quais os critérios tidos em conta para a criação do modelo. Neste capítulo também é feita a modelação de acordo com o plano nacional RNC2050 e comentam-se os resultados obtidos no sentido de analisar a viabilidade do mesmo.

No capítulo 4, faz-se o dimensionamento de uma central nuclear em Portugal e apresentam-se os resultados obtidos pela modelação. Faz-se uma comparação ao RNC2050 e discute-se os resultados.

O capítulo 5 apresenta uma avaliação integrada das tecnologias solar, eólica e nuclear. Apresentam-se custos (*Levelized Cost of Energy* (LCOE)) e das emissões de gases com efeito de estufa, analisa-se o consumo de água, a utilização do solo e os materiais que constituem cada tecnologia. Esta análise é feita para toda a vida útil da tecnologia e tem como objetivo alertar para as vantagens e desvantagens de cada uma destas tecnologias.

Por último, o capítulo 6 conclui sobre todos os resultados obtidos nesta tese e quais serão as recomendações para possíveis trabalhos no futuro.

2

Estado da arte: consumo e mix energético

Conteúdo

2.1 Panorama Atual	8
2.2 Mix Energético e Consumo Atual	10
2.3 Energia Nuclear	15

Neste capítulo é exposta a atual situação energética nacional em matéria de alterações climáticas. Descrevem-se as principais metas e objetivos que Portugal definiu para combater as alterações climáticas e ser neutro em carbono em 2050. Apresenta-se o atual mix energético e o consumo detalhado em Portugal. Explora-se ainda a inclusão da energia nuclear no mundo.

2.1 Panorama Atual

Com as alterações climáticas a população mundial enfrenta um dos momentos mais críticos da história. Desde o aumento do nível das águas aos fenómenos meteorológicos extremos, os impactos das alterações climáticas estão a mudar drasticamente a vida como a conhecemos.

O combate às alterações climáticas deu os primeiros passos em 1992, ano em que foi criada a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas (UNFCCC). Em 1997 foi adotado o Protocolo de Quioto com o objetivo de reduzir as emissões. Hoje, o Protocolo de Quioto conta com 192 Partes e a Convenção com 197 Partes. Em 2015, na 21^a Conferência das Partes em Paris, criou-se o Acordo de Paris no sentido de acelerar e intensificar as ações e investimentos necessários para um futuro sustentável de baixo carbono. Ficou definido o objetivo de assegurar que o aumento da temperatura média global fique abaixo de 2°C acima dos níveis pré-industriais, com o compromisso por parte da comunidade internacional de fazer os possíveis para que esse aumento não exceda 1,5°C. [5]

A União Europeia criou metas e objetivos bem definidos para travar as alterações climáticas e reduzir as emissões de gases com efeito de estufa dos seus Estados Membros. Para que o acordo de Paris seja bem sucedido será necessário atingir a neutralidade carbónica em 2050.

No final do ano 2019 a Comissão Europeia apresentou o Pacto Ecológico Europeu (*European Green Deal*) [8] cujos os principais objetivos são:

- Não haverá emissões líquidas de gases com efeito de estufa em 2050;
- O crescimento económico deverá estar dissociado da utilização dos recursos;
- Nenhuma pessoa e nenhum lugar é deixado para trás.

Para corresponder ao exposto, Portugal desenvolveu o RNC2050 [11] onde se concluiu que é na década 2021-2030 que se devem concentrar os maiores esforços. Nesse sentido, Portugal criou o PNEC2030 [3] com as principais metas e objetivos a alcançar durante a década. Para se alcançar a neutralidade carbónica em 2050 será necessário reduzir as emissões de gases com efeito de estufa entre 85% a 90% relativamente aos níveis de 2005 e atingir níveis de sequestro de carbono entre 9 a 13 milhões de toneladas de CO₂ em 2050.

Para reduzir as emissões de GEE, Portugal ambiciona uma redução entre 45% a 55% em 2030, 65% a 75% em 2040 e, finalmente, 85% a 90% em 2050. Na tabela 2.1 apresentam-se as metas

setoriais relativas à redução de CO₂ para os anos 2020 e 2030, face a 2005.

	2020	2030
Serviços	-65%	-70%
Residencial	-14%	-35%
Transportes	-14%	-40%
Agricultura	-8%	-11%
Resíduos e Águas residuais	-14%	-30%

Tabela 2.1: Metas nacionais de redução de emissões de CO₂ por setor [3]

Portugal definiu como um dos principais objetivos para atingir a neutralidade carbónica em 2050, dar prioridade à eficiência energética. Foram estabelecidas as metas de reduzir em 25% o consumo de energia em 2020 e reduzir em 35% em 2030 relativamente aos níveis de 2005, apenas com o contributo da eficiência energética.

Por ser um país com grande disponibilidade de recursos endógenos renováveis, como o sol, o vento, a água, a biomassa e a geotermia, Portugal tem tido uma posição de destaque no que respeita à descarbonização. Na figura 2.1 apresenta-se a quota de Energia Renovável no consumo final bruto de energia na União Europeia para o ano 2019 em comparação à meta definida para 2020.

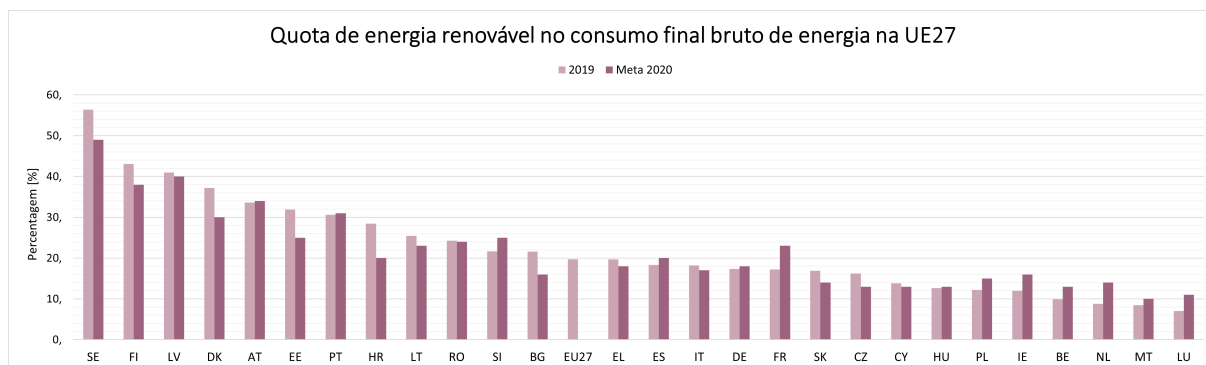


Figura 2.1: Quota de energia renovável no consumo final bruto de energia na UE27. Fonte: Eurostat

Em 2019 Portugal foi o 7º Estado Membro com maior percentagem de penetração de Fontes de Energia Renovável (FER) no consumo final, com uma percentagem de 30,6%. A meta para 2020 é de 31% e para 2030 é de 47%.

No entanto, importa também referir que Portugal é um dos países da União Europeia com maior dependência energética, consequência da inexistência de produção de fontes de energia fósseis em território nacional. Em 2018, Portugal foi o 7º Estado Membro com maior dependência energética.

As alterações climáticas têm como uma das principais consequências o aumento dos fenómenos meteorológicos extremos. Para além do maior risco de inundações e de incêndios, também se espera que os Verões sejam extremos e que os Invernos tenham períodos muito rigorosos. Um dos objetivos do Pacto Ecológico Europeu afirma que nenhuma pessoa nem nenhum lugar será deixado para trás.

Ora em 2019 Portugal teve uma pobreza energética de 18,9%. Quer isto dizer que 18,9% da população portuguesa não foi capaz de aquecer adequadamente a sua casa devido à sua situação económica. Portugal foi o 4^a país da União Europeia 27 (UE27) com maior taxa de pobreza energética, atrás da Bulgária, da Lituânia e do Chipre. A média da UE27 foi 6,9%. A descarbonização não poderá passar apenas pela redução das emissões, é muito importante que as populações sejam protegidas e que se garanta o seu bem estar e qualidade de vida.

Finalmente, na comunicação da Comissão Europeia feita ao parlamento Europeu, "*Reforçar a ambição climática da Europa para 2030*" [12] constata-se que, em 2019, as emissões GEE da UE diminuíram cerca de 25% relativamente a 1990, e, no mesmo período, a economia cresceu 62%. Em Portugal a situação é semelhante, tem sido possível desacoplar o Produto Interno Bruto (PIB) das Emissões de CO₂ e do Consumo de Energia Primária. Isto prova que é possível combater as alterações climáticas com crescimento económico.

2.2 Mix Energético e Consumo Atual

Para avaliar o consumo nacional é preciso analisar duas quantidades diferentes, a Energia Primária e a energia Final. A energia primária reflete as necessidades energéticas de um país. Resulta da soma das importações com a produção doméstica, excluindo-se a variação de stocks e as saídas e representa toda a energia utilizada diretamente ou a que é sujeita a transformação para outras formas energéticas. Na figura 2.2(a) apresenta-se o mix de energia primária em 2018. A Energia Final diz respeito ao consumo final observado. Exclui o consumo do próprio setor e as perdas ocorridas durante a transformação e distribuição de energia, exclui também o consumo para outras formas de energia e o consumo como matéria prima. Na figura 2.2(b) apresenta-se o consumo final por produto, em 2018.

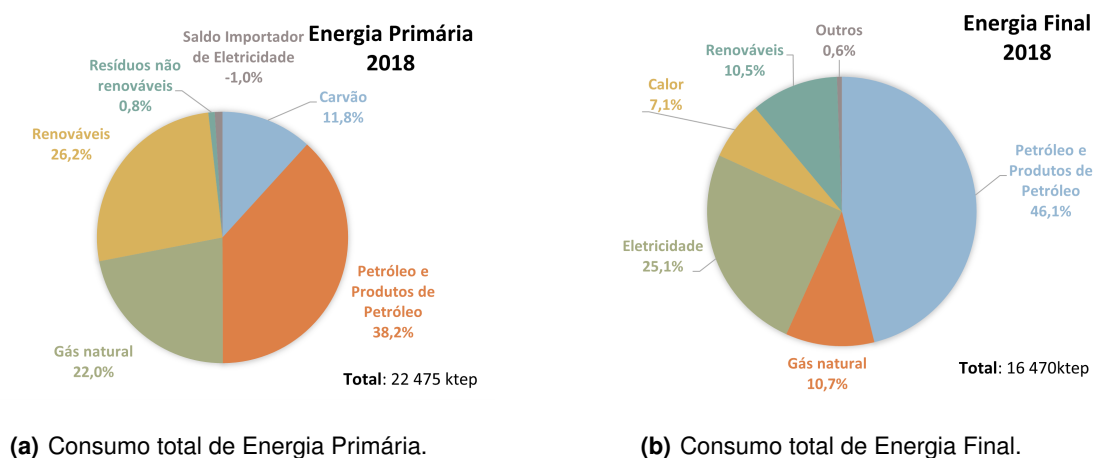


Figura 2.2: Consumos totais nacionais em 2018. Fonte: DGEG

Para satisfazer o consumo final de 16 470 ktep, foi necessário ter um consumo de energia primária de 22 475 ktep. O consumo de Petróleo tem vindo a diminuir ao longo dos anos, no ano 2002 o consumo foi máximo com um valor de cerca de 16,4 Mtep e no ano 2018 foi de apenas 8,7 Mtep. No entanto, com as figuras 2.2(a) e 2.2(b) fica claro que Portugal é ainda muito dependente dos combustíveis fósseis. [13]

Na tabela 2.2 tem-se a distribuição, por setor da atividade, do consumo de energia final.

	Consumo Total de Energia Final
Transportes	35,7%
Indústria	29,5%
Doméstico	17,7%
Serviços	14,2%
Agricultura e Pescas	2,9%

Tabela 2.2: Consumo de Energia Final por setor de atividade em Portugal, em 2018. Fonte: DGEG

Na figura 2.3 é possível observar a evolução temporal do consumo de energia final por setor de atividade. Desde o ano 2000, o setor dos transportes tem a maior quota de consumo, este setor tem como principal, e quase única, fonte de energia primária o petróleo e produtos de Petróleo. O setor da indústria tem, também, uma percentagem significativa do consumo total. Para este setor importa referir que o consumo tem tido tendência decrescente e o gás natural têm vindo a substituir o petróleo. Em 2000 a percentagem de petróleo era de cerca de 35% e a de gás natural era apenas 10%. Em 2018 esta situação inverteu-se, para 17% e 25% respectivamente.

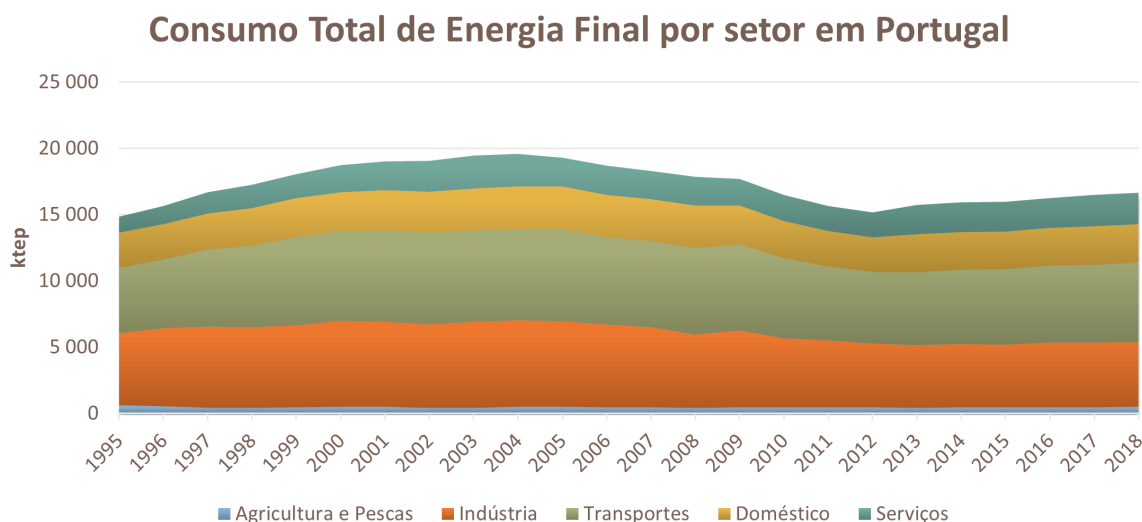


Figura 2.3: Evolução do Consumo de Energia Final por setor de atividade. Fonte: DGEG

Apesar de, durante os anos 2004 e 2012, o consumo ter tido tendência decrescente, voltou novamente a crescer e a previsão é de que continue assim. Desde as consequências das alterações

climáticas que irão provocar uma maior necessidade de aquecimento e arrefecimento dos edifícios até ao tratamento das águas e à eletrificação dos países mais pobres, não é possível acreditar num decréscimo do consumo mundial. Portugal tem como prioridade a eficiência energética, ambicionando não só controlar o crescimento do consumo de energia primária como a garantia de uma economia competitiva e um sistema energético seguro, autossuficiente e resiliente.

Tal como foi dito na secção 2.1 Portugal é um dos países da União Europeia com maior dependência energética apesar do notável decréscimo do consumo de combustíveis fósseis. A dependência energética é dada pela quantidade de energia que deve ser importada relativamente ao seu consumo. Este indicador mostra o nível de dependência de importações que uma economia tem para dar resposta às suas necessidades. Na tabela 2.3 é possível observar as importações, exportações e saldo importador (importações-exportações) por fonte de energia primária, em 2018. Neste ano a dependência energética foi de 75,9%. Comparando aos outros Estados Membros da UE27, Portugal foi o 7º país com maior dependência energética, com cerca de 20 Pontos Percentuais (p.p.) acima da média da UE27.

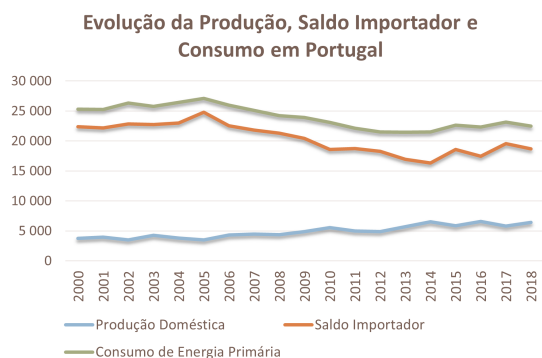
	Carvão	Petróleo	Gás Natural	Eletricidade	Renováveis	Resíduos	Total
Importações	2 780	16 772	5 098	487	102	19	25 258
Exportações	113	5 381		716		343	6 553
Saldo Importador	2 667	11 391	5 098	-229	-241	19	18 705

Tabela 2.3: Importações, Exportações e Saldo Importador em Portugal em 2018. Fonte: DGEG

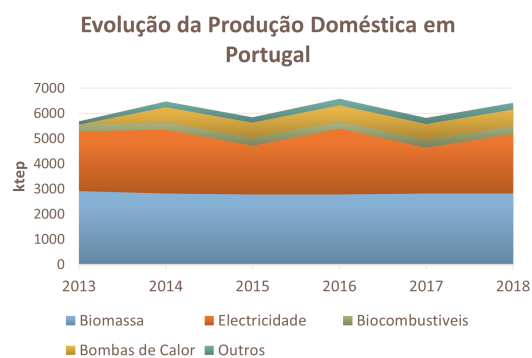
Nos últimos anos o saldo importador tem vindo a diminuir. Esta diminuição deve-se maioritariamente ao aumento da produção doméstica de energia, como é possível confirmar na figura 2.4(a). A produção doméstica de energia corresponde a toda a energia extraída e utilizável de recursos naturais de um país. Os recursos naturais podem ser provenientes de jazigos de petróleo ou gás natural, de centrais hídricas, eólicas ou fotovoltaicas, de biomassa, etc. O aumento de produção doméstica deve-se maioritariamente à tendência crescente da penetração de renováveis e à forte aposta e apoios para o autoconsumo.

Através da figura 2.4(b) conclui-se que, para o período analisado a principal fonte endógena para produção doméstica de energia foi a biomassa com um comportamento aproximadamente constante. A eletricidade engloba a produção de hidro-eletricidade, eólica, fotovoltaica e geotérmica e também tem tido grande destaque. As oscilações observadas na eletricidade devem-se à produção hídrica e são consequência de anos mais ou menos chuvosos. A Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG) disponibilizou o contributo das bombas de calor desde 2014, que têm contribuído em cerca de 10% da produção. Finalmente, outros diz respeito aos resíduos não renováveis e ao solar térmico que têm apresentado uma tendência ligeiramente crescente, representando cerca de 4% da produção em 2018.

Quando se produz uma forma energética a partir de outra dá-se uma transformação e, como tal, não



(a) Produção Doméstica, do Saldo Importador e do Consumo de Energia Primária.



(b) Evolução das fontes de Produção Doméstica.

Figura 2.4: Fonte: DGEG

se considera produção doméstica. Para a transformação tem-se observado um declínio na utilização de petróleo para a produção de eletricidade. O petróleo tem vindo a ser substituído pelo gás natural, principalmente em anos menos chuvosos.

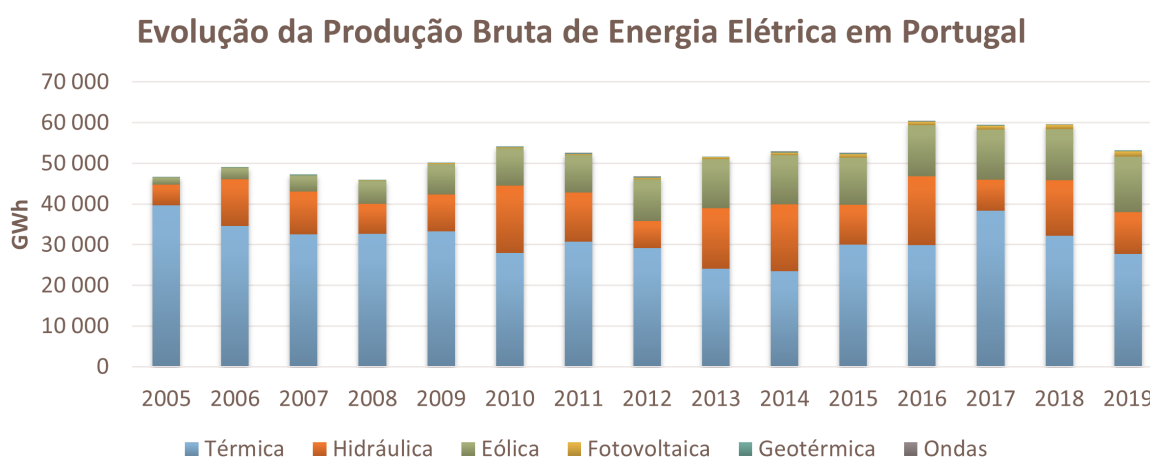


Figura 2.5: Evolução da Produção Bruta de Energia Elétrica por tipo de fonte em Portugal. Fonte: DGEG

Relativamente à produção bruta de eletricidade por tipo de fonte, apresenta-se a evolução da mesma na figura 2.5. Observa-se que, no geral, as centrais térmicas têm vindo a baixar a sua produção. As centrais hidráulicas têm um grande papel em Portugal e a sua produção depende da precipitação de cada ano. A partir de 2006 a Eólica foi ganhando um grande papel em Portugal, representando hoje cerca de 25% da produção de eletricidade. Apesar da Energia solar apenas representar cerca de 2,5% do total, importa referir que em 2005 produziram-se apenas 3 GWh de energia elétrica bruta e, em 2019 este valor foi de 1342 GWh, um aumento de 447 vezes. A energia fotovoltaica irá ganhar cada vez mais

espaço no mix energético.

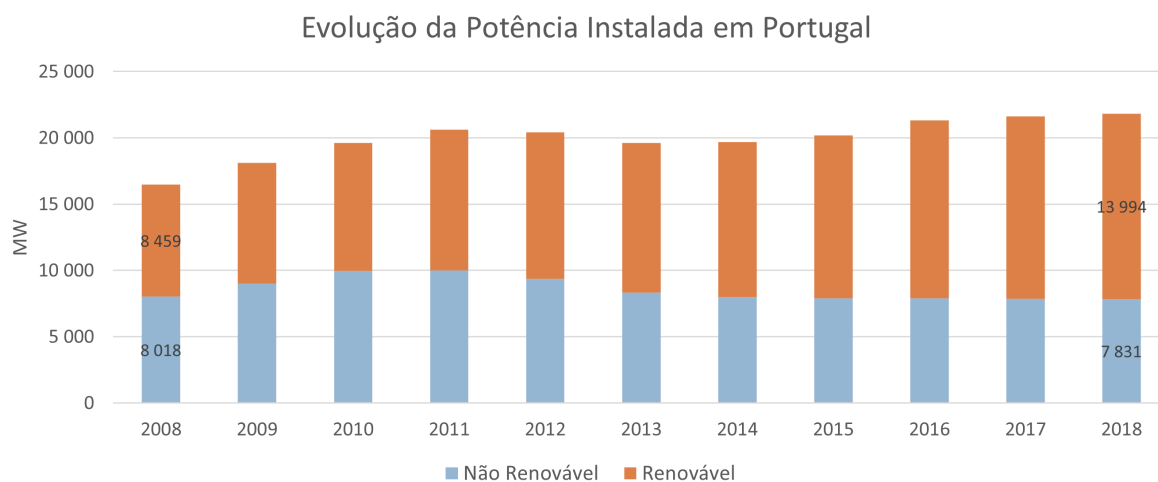


Figura 2.6: Evolução da Potência Instalada para produção de Eletricidade em Portugal. Fonte: DGEG

Ainda para a produção de eletricidade, a potência instalada tem vindo a aumentar, principalmente com fontes renováveis. Na figura 2.6 pode-se observar como tem evoluído a potência instalada para produção de energia elétrica. Nos últimos anos a produção de eletricidade a partir de fontes não renováveis tem sido praticamente constante, porém, desde 2008 a potência instalada aumentou cerca de 4GW consequência da aposta em fontes renováveis. Em 2018 a potência instalada em centrais de fontes renováveis era cerca de 64% contra os 36% de fontes não renováveis.

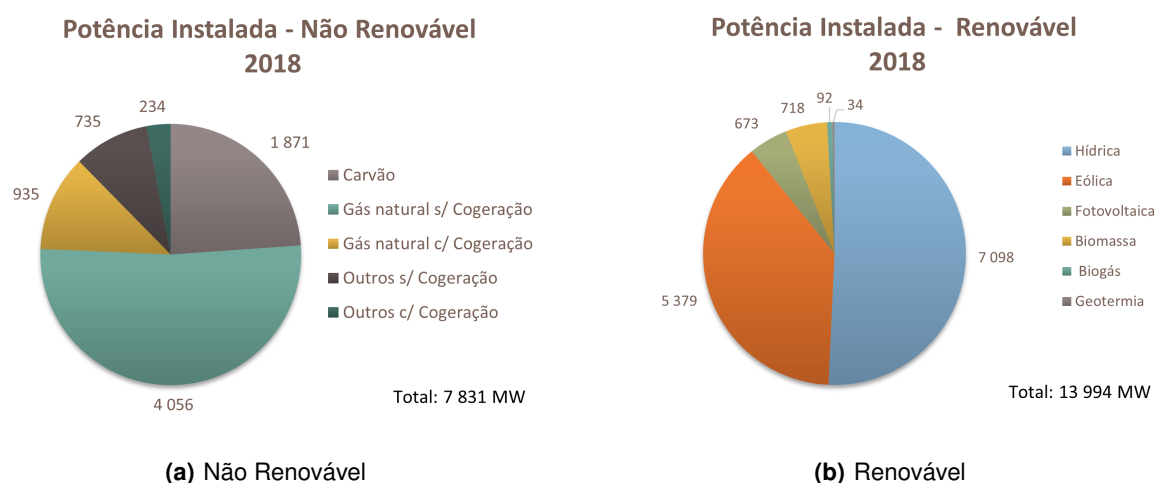


Figura 2.7: Potência Instalada em Portugal em 2018. Fonte: DGEG

Finalmente, em 2018 a potência instalada para produção de eletricidade em centrais de fontes não renováveis foi maioritariamente em centrais de gás natural sem cogeração como é visível na figura

2.7(a). Tal como já referido antes, o gás natural tem sido o combustível fóssil a ganhar mais expressão nos últimos anos, tendo tido um aumento de cerca de 2GW de potência instalada desde 2008. Na figura 2.7(b) observa-se que a fonte renovável com mais expressão para a produção de energia elétrica é a hídrica seguida da eólica. Todas as centrais de fontes renováveis, com maior ou menor expressão, têm visto a sua potência instalada aumentar. Porém, importa referir, que a produção através de fotovoltaica teve um aumento de quase 1000% relativamente aos valores de 2008.

2.3 Energia Nuclear

A energia nuclear pode ser obtida através de duas reações atômicas: fusão ou fissão. Atualmente, a energia nuclear provem maioritariamente de processos de fissão de Urânio.

Cerca de 90% dos reatores nucleares aquecem água num sistema em cadeia artificial e utilizam o isótopo Urânio 235 (U_{235}) como combustível. Dentro do núcleo do reator bombardeia-se o U_{235} com neutrões, o isótopo absorve o neutrão e esta reação tem um resultado instável com os seguintes produtos: o Urânio separa-se em elementos mais leves, obtêm-se neutrões adicionais e liberta-se energia na forma de radiação. Os neutrões adicionais irão provocar repetição do processo e a energia libertada fará aquecer a água e quando esta estiver na forma de vapor irá gerar eletricidade através de uma turbina. Com a ajuda de um moderador ¹ que controla a velocidade dos neutrões, é possível ter-se uma reação em cadeia controlada. Este tipo de reatores tem como grande vantagem o baixo custo, porém em termos de segurança e eficiência está longe de ser o melhor. [14]

O maior investimento em energia nuclear foi feito entre 1970 e 1985, com a construção de cerca de 63% do total dos reatores operacionais de hoje. A vontade de um futuro atómico era grande, porém, com as diversas dificuldades técnicas encontradas e principalmente com os fatídicos acidentes de Three Mile Island em 1979, Chernobyl em 1986 e Fukushima em 2011, muitos países concluíram que os riscos eram maiores do que os benefícios e, ao longo dos anos, a construção de novos reatores tem vindo a estagnar.

A nível mundial, em 2020 encontravam-se operacionais 442 reatores, sendo que 358 têm no mínimo 25 anos de operação. A eletricidade proveniente da energia nuclear representou, em 2019 cerca de 10% do total e a produção tem vindo a aumentar nos últimos anos. Há cerca de 50 reatores em construção em todo o mundo. Na figura 2.8 apresentam-se as potências instaladas dos reatores de todo o mundo em 2019 [15]

Na União Europeia, o país que mais aposta em energia nuclear é a França, com cerca de 52% de participação do total em 2019. Há 4 reatores em construção, um em França, um na Finlândia e dois na Eslováquia. A capacidade instalada destes novos reatores representa apenas cerca de 4% do total.

¹Sem o moderador a velocidade dos neutrões seria tão alta que a probabilidade de serem absorvidos pelo U_{235} seria praticamente nula

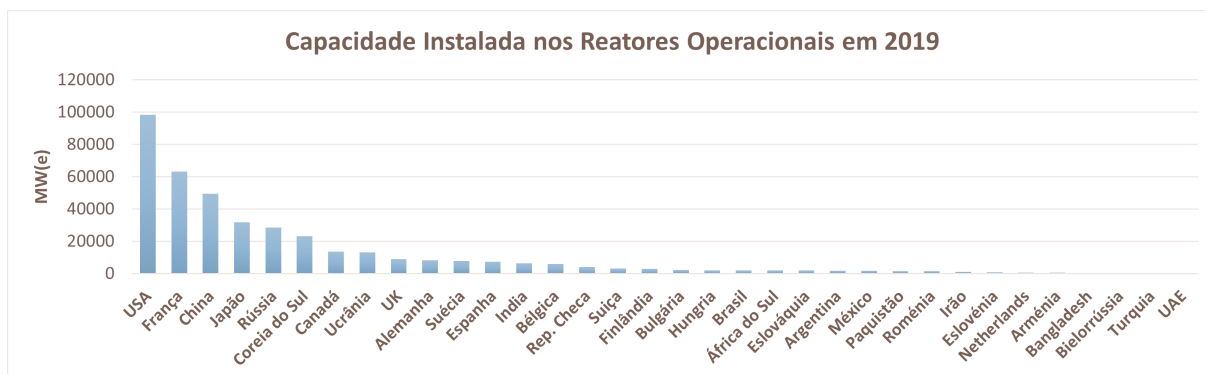


Figura 2.8: Capacidade Instalada dos reatores nucleares em 2019. Fonte: IAEA PRIS

No que diz respeito à produção de eletricidade, a quota de nuclear no mix energético de cada Estado Membro apresenta-se na figura 2.9.

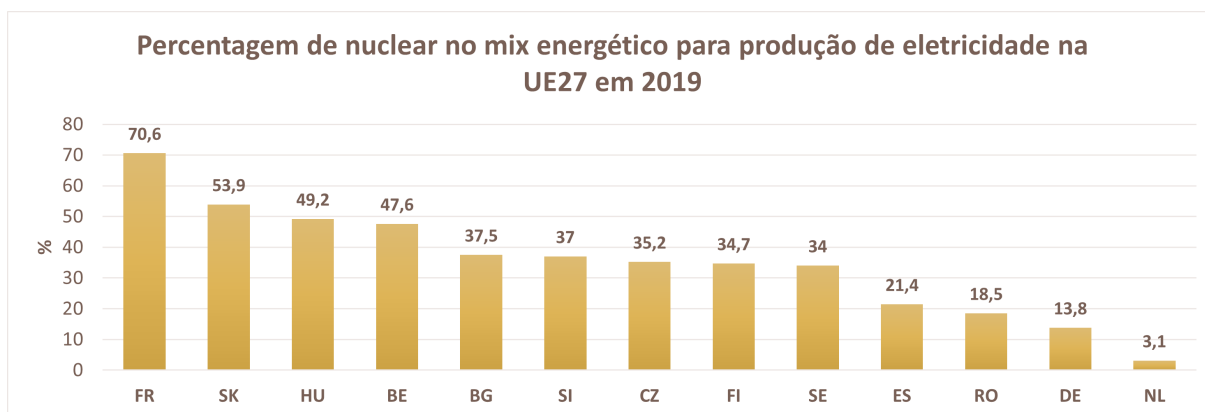


Figura 2.9: Percentagem de nuclear no mix energético para produção de eletricidade na UE27 em 2019

Tal como é sabido, o futuro terá de ser limpo em carbono. Ao momento, a energia nuclear é a segunda maior fonte de energia limpa do mundo e não pode ser descartada para atingir com sucesso a descarbonização. No relatório anual da Agência Internacional de Energia apresenta-se, como um dos caminhos para uma atmosfera neutra em carbono, o aumento em cerca de 55% da geração de eletricidade através de nuclear em 2040. A nível mundial, a produção de eletricidade proveniente de energia nuclear tem tido tendência crescente desde 2012, sendo que em 2019, a geração nuclear aumentou cerca de 17% na Ásia. Na África, América do Sul e Leste da Europa a geração também aumentou, mas com menos expressão. Na América do Norte, e na Europa central a geração nuclear diminuiu ligeiramente.

Na União Europeia a energia nuclear provoca algumas divergências nos planos e opiniões públicas, sendo que:

- A Alemanha tem 6 reatores em operação e, a atual determinação de fechar todos os reatores até

ao fim do ano de 2022. Ao contrário do que seria expectável, o fecho das centrais a carvão será mais lento, com permanência no mix energético até 2038

- Na Bélgica todos os 7 reatores irão fechar antes de 2026, segundo a lei atual. Porém prevê-se que o fecho terá de ser mais gradual para manter as emissões de GEE a níveis baixos. Este prolongamento conta com o apoio da opinião pública.
- A Bulgária tem 2 reatores operacionais com licença para operar até 2029. É expectável que os dois reatores atinjam os 60 anos de operação. A Bulgária não pretende abandonar a nuclear e já tem planos para a construção de uma nova central com 2 reatores com conclusão em 2030.
- Na Eslováquia existem 4 reatores operacionais e 2 em construção.
- A Eslovénia tem 1 reator que fornece eletricidade para o próprio país e para a Eslováquia e Croácia.
- Espanha conta com 7 reatores operacionais e término de operação previsto para o início da década de 2020, altura em que teriam 40 anos de operação. Os prazos foram prolongados e até 2035 Espanha continuará a ter energia nuclear no mix energético. O plano é cessar toda a produção de nuclear do país.
- A Finlândia tem 4 reatores operacionais, um reator em construção e mais um planeado.
- A França tem 56 reatores e 1 em construção. Tem planos para reduzir em 50% a quota de nuclear no mix energético em 2035, o que significa o fecho de 14 reatores até esse ano. Ainda assim está em estudo a construção de 6 reatores em instalações nucleares já existentes.
- A Holanda tem apenas 1 reator com término de operação expectável em 2033. Não planeia construir mais nenhum reator.
- Na Hungria existem 4 reatores operacionais e planeia-se a construção de mais 2
- A República Checa planeia aumentar a participação da nuclear no mix energético em 50%-55% em 2050. O país conta com 6 reatores operacionais neste momento.
- Na Roménia existem 2 reatores operacionais e está em estudo a construção de mais dois.
- Finalmente, a Suécia conta com 7 reatores operacionais. O país conta com forte apoio da opinião pública para a continuação da operação dos reatores existentes assim como a possível construção de mais. [16]

Relativamente às vantagens da energia nuclear, para além de ser considerada uma energia limpa é também uma ótima fonte base pois trabalha 24 horas por dia, 7 dias por semana a uma potência perto

da instalada. Tem um fator de utilização ² muito elevado, praticamente o dobro do carvão e gás natural e o triplo da energia solar e do vento. A energia nuclear tem custos de operação muito reduzidos e é, também, uma grande geradora de emprego. Estima-se que as reservas de Urânio sejam suficientes para mais 80 anos de produção. Juntando este facto à possibilidade de utilização de combustíveis alternativos (Tório) é seguro dizer que o aprovisionamento é sustentável. Por último a relação entrada de combustível/saída de potência é incrivelmente alta, uma pellet de combustível de Urânio (com cerca de 6 gramas) cria tanta energia como uma tonelada de carvão.

Também há desvantagens. Com a ocorrência dos 3 grandes acidentes geraram-se movimentos anti-nuclear por todo o Mundo que levaram muitos governos à decisão de abandonar esta energia. Apesar de ser uma energia limpa, o processo de mineração e refinação de Urânio está longe de ser limpo e tem grande impacto ambiental, deixando para trás partículas radioativas, provocando erosão dos solos, poluindo as fontes de água da vizinhança e pondo em risco a saúde dos mineiros, estando provado que aumenta o risco de cancro do pulmão para os trabalhadores nas minas subterrâneas. Se é verdade que os acidentes são raros, também é verdade que quando ocorrem são devastadores. Manter uma central nuclear é barato mas os custos de instalação são muito elevados e a construção de uma central demora cerca de 8 anos até ficar completamente operacional, se não houver atrasos. Ao contrário das energias renováveis, o combustível da nuclear é finito e as reservas irão eventualmente acabar. Também é preciso ter em conta a segurança mundial, uma central nuclear é atrativa para os terroristas e a corrida ao armamento nuclear é muito perigosa. Apesar dos esforços desenvolvidos e do tratado de não proliferação nuclear, em 40 anos, 5 países desenvolveram as próprias armas com a ajuda dos seus reatores. Finalmente, o que fazer ao lixo radioativo é o maior desafio da nuclear. O lixo nuclear é composto por partículas de Urânio que não conseguiram entrar no processo de fissão, por outros produtos da fissão e por Plutónio. O Plutónio tem uma meia vida de cerca de 24 mil anos e é extremamente perigoso e tóxico. É proibido despejar lixo nuclear no mar e enterrá-lo também já está provado não ser seguro. De todos os países com energia nuclear no seu mix energético, apenas a Finlândia está realmente empenhada em arranjar uma solução e foi o primeiro país a criar um repositório seguro, a cerca de 450 metros de profundidade. Apesar do lixo nuclear ser um problema, todo ele está contido e não é perigoso, ao contrário da poluição atmosférica causada pelos combustíveis fósseis.

Em muitos países a pressão da opinião pública tem vindo a obrigar ao fecho de muitas centrais. A energia nuclear sofre do mesmo problema dos acidentes de avião, eventos singulares catastróficos ficam muito na memória. Mas importa referir que apesar do medo da população e da crença de que a energia nuclear é muito perigosa e responsável por muitas mortes, a verdade não é bem assim, em 2013 a NASA apresentou um estudo que revela que, entre 1976 e 2009 a energia nuclear preveniu 1,8 milhões de mortes e emissão de 64 Gton de emissões de GEE de CO₂ equivalente que resultariam da

²O fator de utilização é dado pelo número de horas que uma central teria de trabalhar à potência nominal para produzir a energia que produz, efetivamente, num ano

queima de combustíveis fósseis [17]. Na figura 2.10 é possível observar que a percentagem de mortes causada pela energia nuclear é mínima, mesmo tendo em conta todas as mortes diretas e indiretas causadas por todos acidentes nucleares ocorridos até ao momento, o número de mortes por 1 TWh produzido é apenas 0,07, ou seja, 0,085% do total.

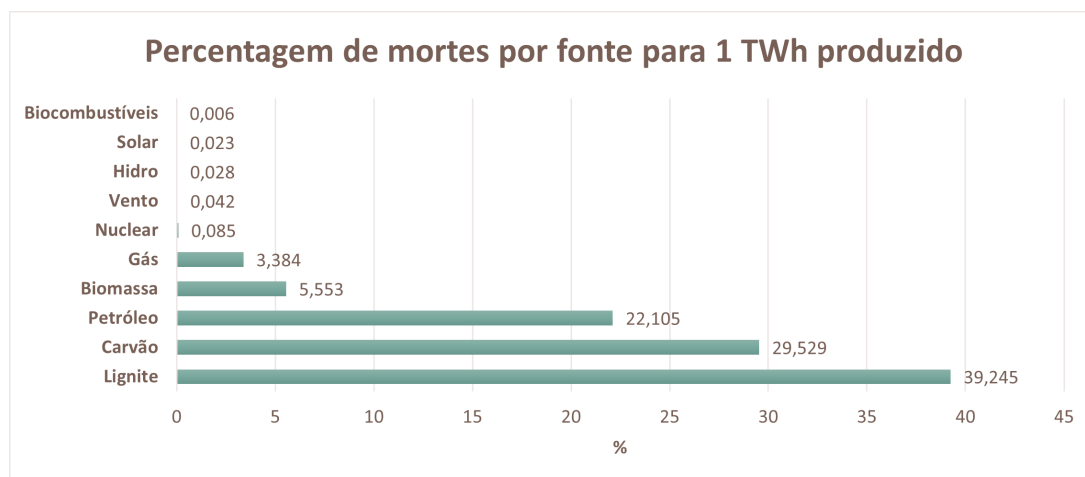


Figura 2.10: Percentagem de mortes por fonte por 1 TWh produzido Fonte: Markandya Wilkinson; Sovacool e outros; Our World In Data

Tal como foi dito no início desta secção, 90% dos reatores são à base de água e funcionam a Urânio. Estes reatores foram escolhidos principalmente devido ao seu baixo custo, mas em termos de segurança e eficiência não são os melhores. A verdade é que a aposta na investigação e desenvolvimento nuclear teve uma enorme quebra e desde 1970 pouco evoluiu. A aposta em novas tecnologias poderia acabar com muitas das desvantagens apresentadas. Para além do Urânio, o Tório apresenta grande potencial e consegue responder a muitas das dificuldades que hoje existem. Há duas grandes razões para a falta de investimento no Tório, a primeira é os altos custos no fabrico do combustível e no desenvolvimento da tecnologia. O segundo grande motivo é a incapacidade de fazer armas nucleares através do Tório, apesar de este facto aparentar ser uma grande vantagem a verdade é que a relação entre a produção de energia nuclear e a produção de armas atómicas está intimamente ligada e os países com mais poder decidiram apostar no que lhes daria ainda mais poder. As vantagens do Tório são muitas, é um elemento mais abundante do que o Urânio, é menos radioativo e muito mais seguro pois o grande perigo no Urânio é a dificuldade em parar a reação em cadeia e com o Tório esta reação pode ser interrompida a qualquer momento impedindo a explosão. No que diz respeito ao lixo, o Tório também aparenta ter melhor desempenho, permanece radioativo por menos tempo e uma tonelada de Tório equivale a 200 toneladas de Urânio e a 3 500 000 toneladas de carvão. Neste momento existem 7 tipos de reatores capazes de utilizar Tório e a Índia e a China têm apostado no desenvolvimento desta tecnologia. Um forte investimento resultaria numa grande descida dos custos, que por sua vez originaria, possivelmente, grande adesão. [18]

3

Previsão dos Consumos e Mix Energético nas próximas três décadas

Conteúdo

3.1 Critérios tidos em conta para a criação do modelo	22
3.2 Modelação de acordo com o plano nacional	26
3.3 Análise dos resultados obtidos	29

Para ser possível estudar a viabilidade da energia nuclear em Portugal foi necessário criar um modelo de previsão que estime o mix energético durante o período 2020-2050. Neste capítulo são descritos os critérios tidos em conta na criação do modelo, apresenta-se a previsão com base nas medidas e políticas de mitigação das emissões de GEE decididas pelo governo e analisa-se a exequibilidade das mesmas.

3.1 Critérios tidos em conta para a criação do modelo

Portugal tem como objetivo atingir a neutralidade carbónica em 2050. Para isto ser possível foi definido que em 2030 a redução tem de ser de -45% a -55%, em 2040 de -65% a -75% e, finalmente, de -80% a -90% em 2050. Na figura 3.1, apresentam-se os valores das emissões, contabilizando o setor do Uso do solo, alterações do solo e florestas (*Land Use, Land-Use Change and Forestry (LULUCF)*), até 2018 e as duas possíveis trajetórias para atingir a neutralidade carbónica. Assume-se que, em 2050 o sumidouro¹ irá absorver entre 9 a 13 Mt de CO₂eq².

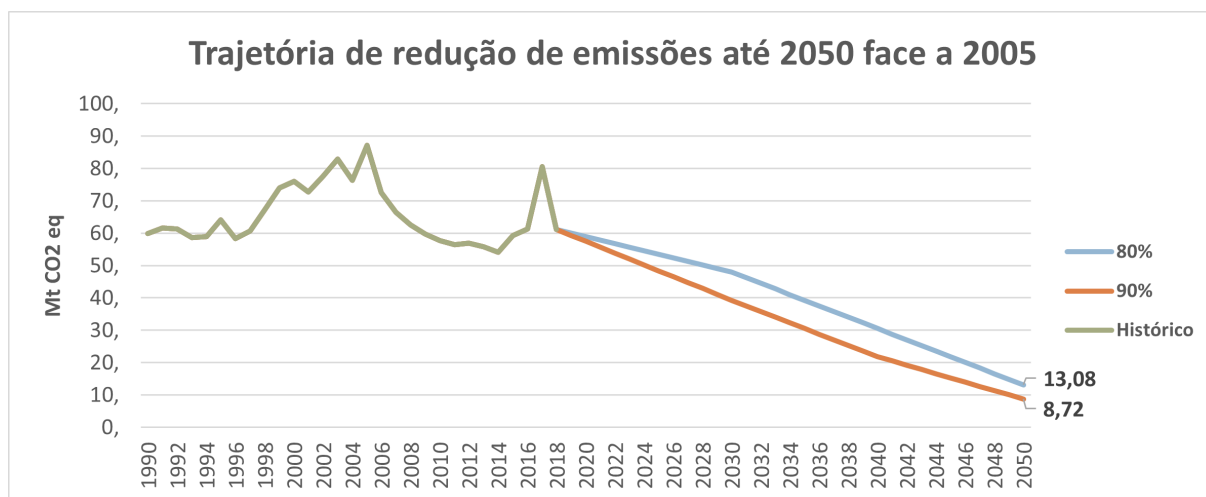


Figura 3.1: Trajetória de redução de emissões até 2050 face a 2005. Fonte: Eurostat

Para a criação do modelo foi utilizado o sistema de modelação OSeMOSYS que fornece não só uma avaliação integrada a longo prazo como também o planeamento do mix energético. O OSeMOSYS utiliza programação linear de forma a minimizar os custos do sistema de energia descontados dada a capacidade e as restrições tecnológicas. Para que o modelo desenvolvido seja fiável é necessário estimar o consumo energético até 2050. O primeiro fator a ter em conta é a trajetória de crescimento populacional em território nacional. A população portuguesa está cada vez mais envelhecida e, à exceção do

¹ Um sumidouro de carbono é a denominação dada aos lugares, atividades ou processos em que as absorções de dióxido de carbono (CO₂) são maiores do que as emissões. Neste caso, trata-se das áreas florestais.

² número de toneladas métricas de emissões de CO₂ com o mesmo potencial de aquecimento global que uma tonelada métrica de outro gás de efeito estufa

ano 2019, desde 2010 a população residente apresenta uma tendência decrescente. Vários estudos afirmam que esta tendência decrescente vai ser mantida e é inevitável. Contudo, com a implementação de algumas medidas que fomentem o crescimento populacional e com a diminuição da mortalidade será possível diminuir o declive da tendência [19].

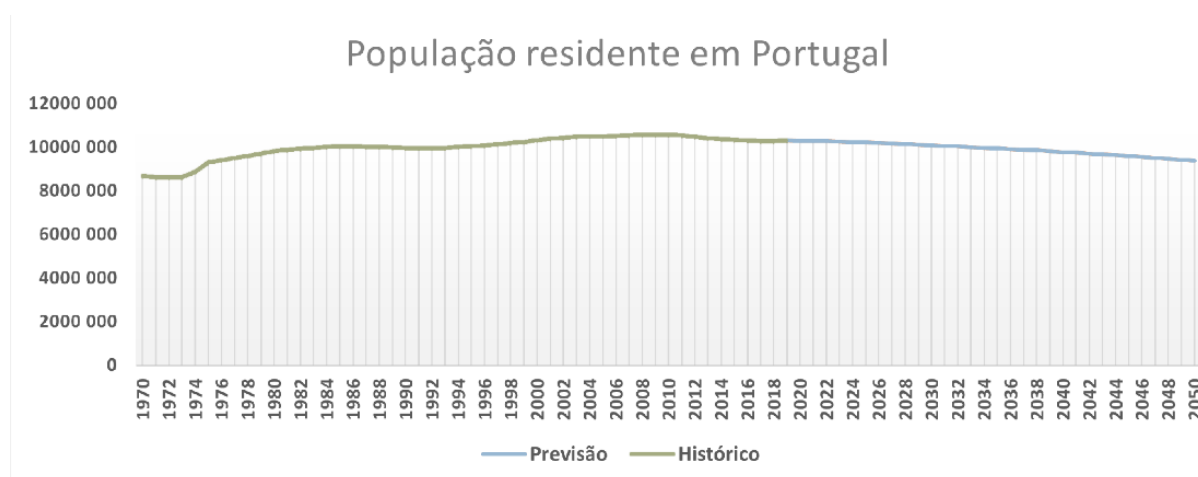


Figura 3.2: Previsão do crescimento da população residente em Portugal. Fonte: Pordata, Eurostat

Na figura 3.2, apresenta-se uma estimativa do crescimento populacional em Portugal realizada pela comissão Europeia que estima que em 2030 a população seja de cerca de 10,1 milhões e em 2050 cerca de 9,4 milhões.

É também necessário estimar o possível crescimento da economia pois o crescimento industrial varia em linha com o mesmo. Na figura 3.3, apresenta-se a previsão de crescimento do PIB a longo prazo.

Para além destes dois parâmetros teve-se em conta a previsão de consumo definida no RNC2050. Estima-se que o consumo final de eletricidade siga uma trajetória semelhante à da figura 3.4.

O modelo criado no OSeMOSYS é representado por tecnologias que produzem e utilizam diferentes fontes de energia (combustíveis). Todas as tecnologias definidas no modelo têm custos operacionais e de investimento associados para cada ano de modelação. O objetivo do OSeMOSYS é alocar, da melhor forma possível, o uso dessas tecnologias, dados os seus custos, características técnicas e parâmetros definidos pelo utilizador, de forma a cumprir os consumos de eletricidade determinados acima. Na criação deste tipo de modelos é de enorme importância a inserção de dados coerentes, pelo que valores referentes a custos, eficiências específicas, fatores de capacidade, tempos de construção e de vida e emissões foram definidos com recurso a folhas de dados da IEA-ETSAP E-TechDS [20].

O objetivo do modelo é minimizar o custo total descontado das tecnologias (t) utilizadas, durante todo o horizonte temporal modelado em anos (y), de tal forma que o consumo definido seja fornecido. O custo total descontado é dado pela soma dos custos de investimento, fixos e variáveis de todas

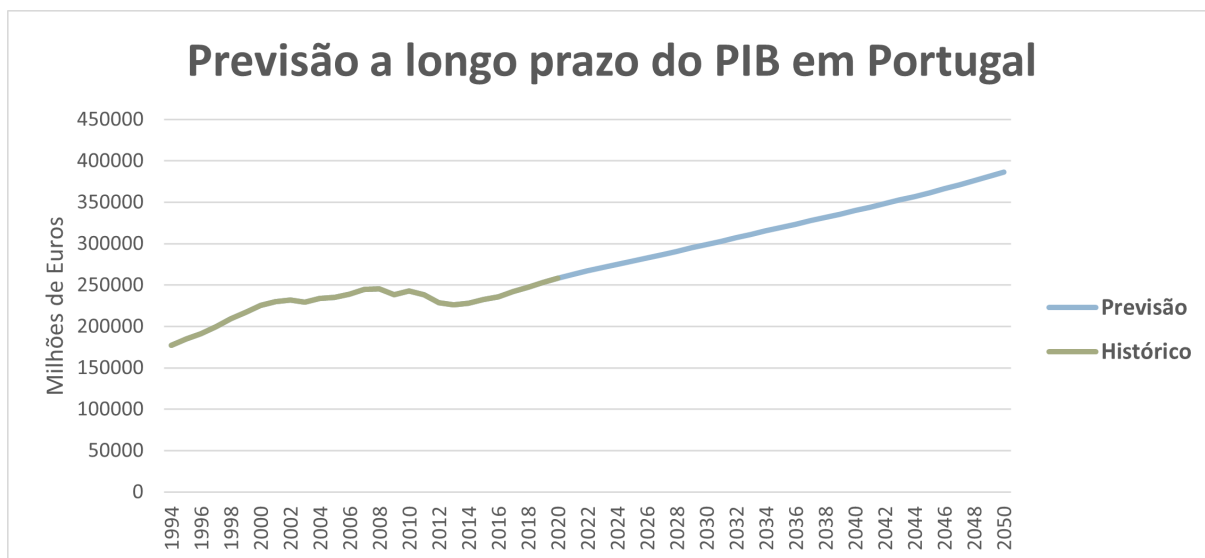


Figura 3.3: Previsão a longo prazo do crescimento do Produto Interno Bruto real em Portugal. Fonte: OCDE

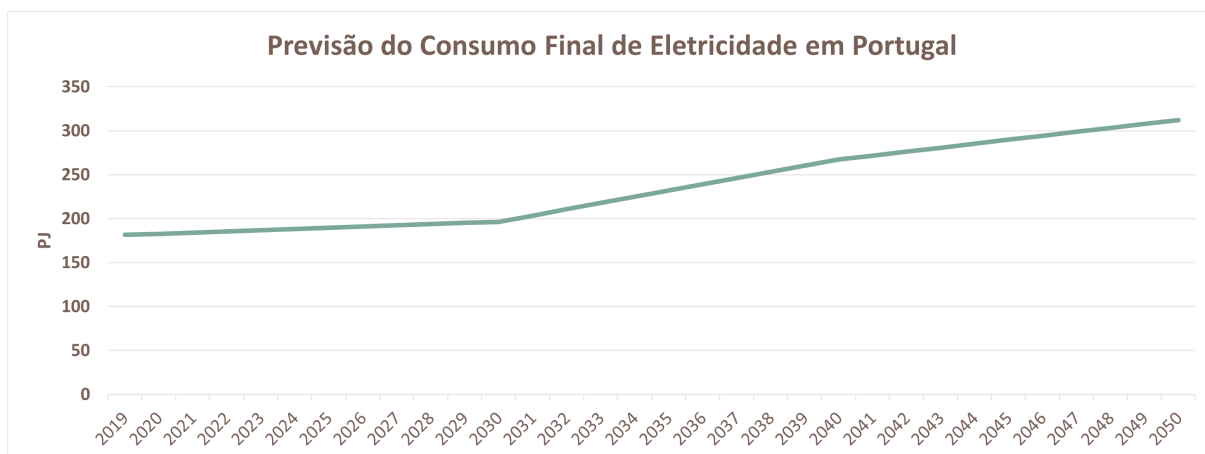


Figura 3.4: Previsão do consumo de eletricidade final em Portugal. Fonte: RNC2050

as tecnologias, assim como o custo das emissões (e) por tecnologia (Equação 3.1). As tecnologias são uma função do próprio fator de capacidade (c), eficiência na conversão de combustível (ϵ), tempo de vida operacional (yy) e emissões (e). Para garantir que o consumo seja fornecido, o modelo tem de observar a restrição na equação 3.2: ambos os consumos finais e intermédios de combustível das tecnologias em cada espaço de tempo (l) têm de ser inferiores ao fornecimento de combustível produzido pelo total de capacidade instalada das tecnologias (que multiplica um fator k que converte a capacidade em GW para PJ). Esta capacidade pode já existir num período anterior ao da modelação ou pode ser instalada a cada ano, conforme seja a necessidade. Para mais informação, consultar a documentação do OSeMOSYS [21] [22].

$$\begin{aligned}
\text{Min} \sum_y \text{CustoTotalDescontado}_y(t, (c, \varepsilon, yy, e)) \\
= \sum_y [\text{CustoInvestimentoDescontado}_y(t, (c, \varepsilon, yy, e)) \\
+ \text{CustoFixoDescontado}_y(t, (c, \varepsilon, yy, e)) \\
+ \text{CustoVariávelDescontado}_y(t, (c, \varepsilon, yy, e)) \\
+ \text{CustoEmissõesDescontado}_y(t, (c, \varepsilon, yy, e))]
\end{aligned}
\tag{3.1}$$

sujeito a

$$\text{ProcuraComb}_{y,t,l} \leq \text{OfertaComb}_{y,t,l} \leq \text{CapacidadeTotal}_{y,t,l}(t, (c, \varepsilon, yy, e))k, \quad \forall y, t, l
\tag{3.2}$$

Na figura 3.5, apresenta-se o Sistema Energético de Referência (SER) utilizado no modelo para caraterizar o sistema elétrico português. Como representação da realidade, o OSeMOSYS modela o sistema energético desde a energia primária, passando pela sua transformação em portadores de energia por diversas tecnologias até ao seu uso final.

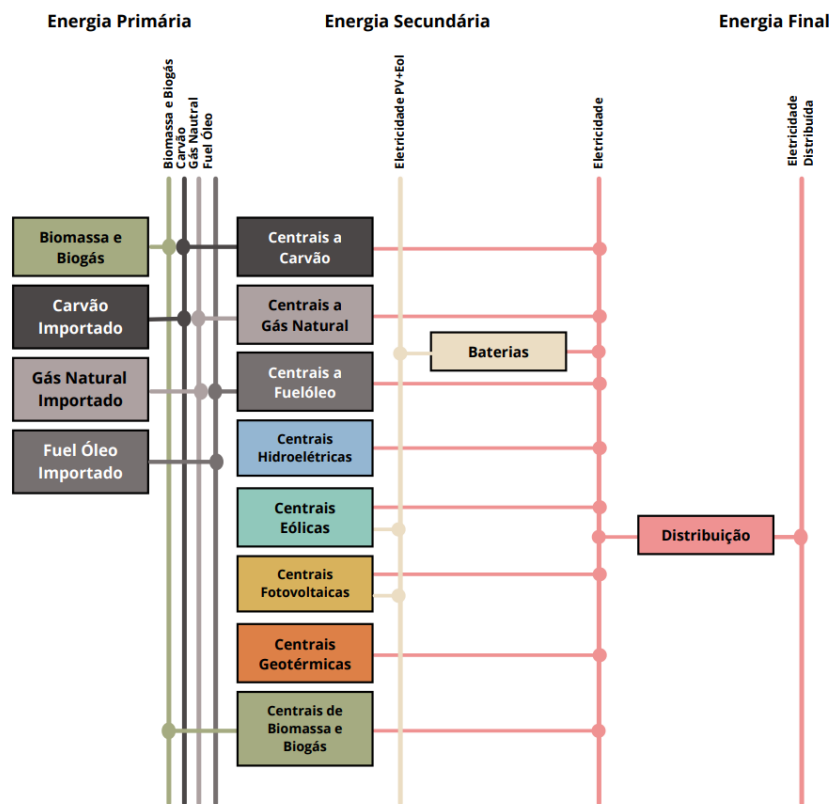


Figura 3.5: Sistema Energético de Referência para Portugal

Tecnologias		Custos [M€/GW]			Fator de capacidade
		Investimento	Fixos	Variáveis	
Produção ou Importação	Biomassa e Biogás			42,5	
	Carvão			21,3	
	Gás Natural			61,1	
	Fuel Óleo			74,4	
Geração	Centrais a Carvão	2125,2	85,0		0,85
	Centrais a Gás Natural	1062,6	42,5		0,9
	Centrais a Fuel Óleo	956,3	38,3		0,8
	Centrais Hidroelétricas	3825,3	76,5		[0,53 ; 0,87]
	Centrais Eólicas	1100,0	38,5		0,38
	Centrais Fotovoltaicas	1100,0	11,0		[0,13 ; 0,15]
	Centrais Geotérmicas	3719,1	130,2		1
	Centrais de Biomassa e Biogás	2890,3	105,4		0,8
Baterias	3000	80,0		1	

Tabela 3.1: Parâmetros definidos para o ano base (2019) do modelo. Fonte: ETSAP

Tal como foi mencionado, o modelo tem como componentes tecnologias e combustíveis. Os combustíveis são os portadores de energia e são representados pelas linhas verticais na figura 3.5. Importa referir que não se consideraram como combustíveis os recursos ilimitados tais como a água, o sol e o vento. As tecnologias são representadas por caixas e incluem qualquer elemento do sistema de energia que gera um combustível (por exemplo um parque eólico) ou que converte uma forma de energia em outra (por exemplo, uma central a carvão).

O modelo utiliza o ano de 2019 como ano base e foram inseridas as capacidades instaladas para cada tecnologia nesse mesmo ano. Foi também necessário inserir os custos de investimento, fixos e variáveis, valores das emissões de CO_{2eq} e outros valores referentes ao desempenho de cada tecnologia, como por exemplo, o fator de capacidade. Na tabela 3.1, apresentam-se alguns dos valores mais relevantes que foram definidos.

3.2 Modelação de acordo com o plano nacional

Após serem definidos os valores base do modelo, aplicaram-se algumas restrições e obrigações de forma a aproximar o modelo ao proposto pelo governo no RNC2050. Portugal cessou completamente a produção de eletricidade a partir de carvão no final de 2021. Segundo o plano governamental vai ser possível atingir a total descarbonização do setor eletroprodutor até 2050, sendo que as tecnologias solar fotovoltaico e eólica serão capaz de assegurar, em conjunto, 50% da eletricidade gerada em 2030 e 70% em 2050. Devido à natureza intermitente destes recursos é necessário garantir uma tecnologia base que forneça capacidade de despacho e segurança de abastecimento. Para solucionar este problema, Portugal admite que o gás natural permaneça na rede até 2040 e prevê ser possível que as baterias se tornem custo-eficaz já em 2025. Espera-se que, em 2050 o conjunto baterias e hídrica com bombagem

	RNC2050				Modelação			
[MW]	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050
Carvão	1,80	0,00	0,00	0,00	1,76	0,00	0,00	0,00
Gás Natural	4,90	3,75	2,40	0,20	4,73	3,38	2,65	0,00
Fuel Óleo	0,70	0,20	0,10	0,00	0,91	0,19	0,11	0,00
Hídrica	7,10	8,50	8,50	8,50	6,99	7,10	7,10	7,10
Eólica	5,20	7,90	10,00	13,25	6,24	9,73	11,75	15,6
Solar PV	1,90	7,10	16,95	26,20	2,28	9,60	16,91	17,42
Geotérmica	0,10	0,10	0,10	0,00	0,03	0,02	0,02	0,02
Biomassa e Biogás	0,90	1,50	1,40	1,60	0,81	0,52	0,44	0,52
Baterias	0,00	0,90	2,00	4,00	0,00	1,67	5,79	11,54
Total	22,6	30,0	41,5	53,8	23,7	32,2	44,8	52,2

Tabela 3.2: Evolução da capacidade instalada proposta no RNC2050 e obtida na modelação

represente cerca de 14% da capacidade instalada em Portugal.

Para ajustar o modelo criado no OSeMOSYS ao proposto pelo governo criou-se um cenário em que se assumiu que:

- O fator de capacidade da tecnologia solar fotovoltaico vai aumentar 30% na década de 2030 e 55% na década de 2040, atingindo o valor de 0,23 em dias de Verão (face aos 0,15 atuais);
- As centrais a carvão cessam atividade em 2021 e as centrais a gás natural em 2040;
- As centrais hidroelétricas não poderão exceder a capacidade atual de 7,1 GW devido à previsão de redução de disponibilidade hídrica;
- Forçou-se o modelo a garantir um máximo de capacidade instalada das tecnologias solar fotovoltaico e eólica de forma a garantir que as mesmas não ultrapassem mais de 1,2x o peso proposto.

Na tabela 3.2 e na figura 3.6 apresenta-se a evolução da capacidade instalada no setor eletroprodutor proposta pelo governo e a obtida através da modelação.

Numa primeira análise, a capacidade total obtida pela modulação é semelhante à capacidade total proposta no RNC2050. Relativamente à eletricidade proveniente da queima de combustíveis fósseis, o modelo foi forçado a cessar a atividade das centrais a carvão em 2021 e das centrais a gás natural em 2040, pelo que está em linha com o plano governamental. Tal como foi descrito acima, optou-se por limitar a capacidade instalada da tecnologia hídrica à presente atualmente, 7,1 GW, pois a expectativa é de que a disponibilidade hídrica seja cada vez menor. O RNC2050 considera ser possível aumentar esta capacidade com recurso à energia hídrica com bombagem. Para os parques eólicos a capacidade instalada atingiu o máximo possível (de acordo com as restrições definidas). Já nos parques solares, observa-se que até 2040 o modelo está ligeiramente acima do proposto no plano nacional, porém, na década de 2040-2050 a tecnologia solar deixa de ser custo-eficaz e estabiliza.

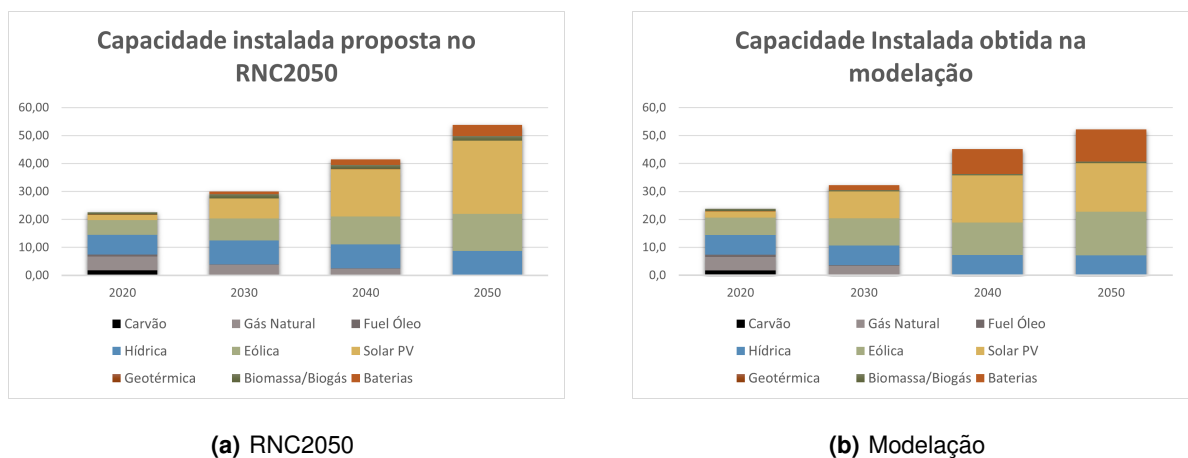


Figura 3.6: Evolução da Capacidade Instalada

A grande discordância entre a modelação e o RNC2050 prende-se com as baterias. Em 2040 o modelo estima serem necessários mais 5,8 GW do que o proposto no roteiro e em 2050 mais 6,2 GW.

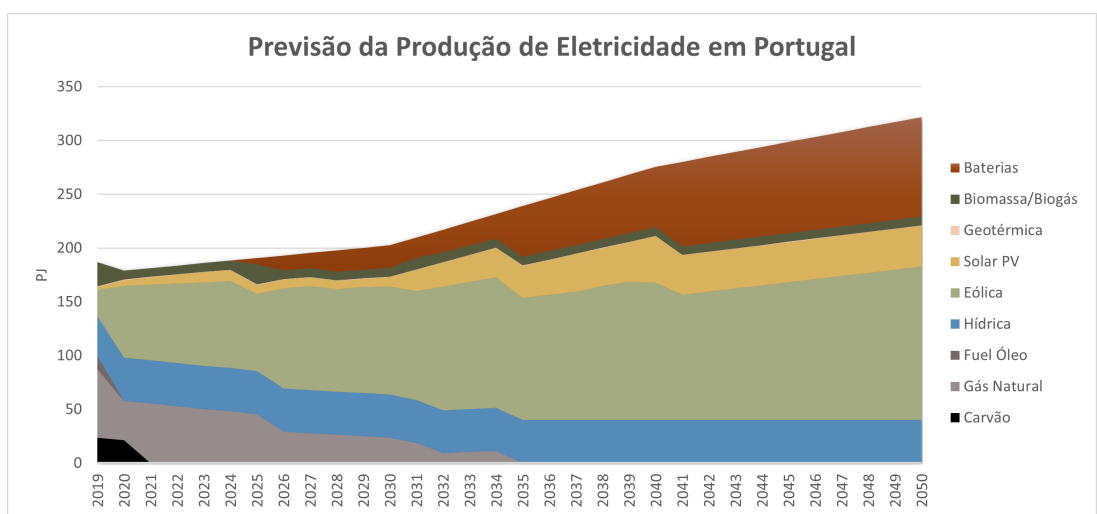


Figura 3.7: Previsão da Produção de Energia Elétrica em Portugal

Obteve-se também a previsão da produção de energia elétrica em território nacional (figura 3.7). Devido à incerteza associada à disponibilidade hídrica, estabeleceu-se um máximo de 40 PJ por ano (no ano de 2019 foram cerca de 39 PJ). Nos anos em que houver abundância de água este valor será superior e nos anos de seca o valor será inferior. Por ser uma tecnologia com poucos custos associados, o modelo considerou sempre a produção de 40 PJ/ano. Também estimou que a eletricidade nas baterias terá um peso significativo, e, juntamente com a tecnologia hídrica ter-se-ia uma base sólida no sistema elétrico português. As baterias carregariam com o excedente de produção dos parques solares e eólicos e alimentariam a rede quando estes não estivessem disponíveis.

3.3 Análise dos resultados obtidos

Torna-se importante refletir sobre o significado dos resultados obtidos. Tal como é sabido, as alterações climáticas irão alterar drasticamente o mundo como o conhecemos. É de extrema importância que existam planos e estratégias com o objetivo de encontrar soluções para tentar mitigar ao máximo as consequências do aquecimento global. Tal como foi referido, o roteiro para a neutralidade carbónica assume ser possível que o conjunto energia solar fotovoltaico e eólica representem 70% da geração de eletricidade nacional em 2050, sendo que a tecnologia eólica terá de ter cerca de 12,5 GW de capacidade instalada *onshore* e cerca de 0,7 GW *offshore* e a tecnologia solar fotovoltaico cerca de 13 GW centralizados e outros 13 GW descentralizados.

Relativamente à tecnologia eólica, espera-se que no período 2020-2050 sejam instalados mais 8 GW face aos 5 GW atuais. A colocação de turbinas eólicas requer o cumprimento de algumas normas e como tal só certas localizações justificam a sua instalação. Tendo em conta que as turbinas eólicas têm um tempo de vida de cerca de 20 anos e que atualmente o limite de novas localizações está perto de ser atingido é possível admitir que em 30 anos a capacidade instalada aumente 8 GW admitindo a substituição por novas turbinas com nova tecnologia e mais potência. Portugal quer também apostar nas turbinas *offshore*, porém de uma forma pouco expressiva pois a costa portuguesa enfrenta algumas dificuldades relativas à adequada colocação destas turbinas. O programa utilizado, OSeMOSYS, procura alocar da melhor forma possível o uso das tecnologias e os parques eólicos têm um bom rácio de custo-eficácia. Tal como foi referido anteriormente e pelas limitações relativas às localizações foi estabelecido um valor máximo relativo à capacidade instalada. Não estabelecendo nenhum teto máximo o programa alocaria 23 GW de capacidade instalada para esta tecnologia. Como a rede *onshore* está perto de atingir o seu máximo seria muito interessante estender as perspetivas de eólicas *offshore*.

O objetivo para a energia solar é muito ambicioso, Portugal pretende aumentar de 1 GW para 26 GW até 2050. Os resultados da modelação admitem ser possível que o conjunto eólica-solar forneça 50% do consumo final em 2030 mas não 70% em 2050. Para isso, a capacidade instalada de fotovoltaico teria de ser superior ao obtido. Os resultados da modelação sugerem que os parques solares não são das tecnologias mais rentáveis, mesmo assumindo uma melhoria de até 55% do fator de capacidade. É importante realçar que ao inserir esta melhoria, a modelação assume que a totalidade da capacidade instalada apresentará este aumento de eficiência, o que na realidade não irá acontecer. Garantir a capacidade instalada proposta no RNC2050 é possível mas ambicioso e acarreta custos que poderiam ser melhor alocados a outra tecnologia mais rentável.

Tal como referido anteriormente, o maior desafio da transição energética prende-se com a segurança no abastecimento, capacidade de despacho e flexibilidade. Os parques eólicos e fotovoltaicos são tecnologias intermitentes, ou seja, não são totalmente confiáveis e, como tal, é de extrema importância garantir que caso falhem nunca irão resultar em falhas de abastecimento na rede. O RNC2050 pretende

utilizar as barragens com bombagem e as baterias como armazenamento de eletricidade e, assim, servirem de tecnologia base garantindo a segurança no abastecimento em situações extraordinárias. O plano governamental apenas prevê uma necessidade 4 GW de baterias em 2050, mas os resultados da modelação sugerem uma necessidade de 11,5 GW em baterias. A concretização desta capacidade instalada no horizonte em questão poderá ser possível, porém, esta tecnologia ainda está sujeita a um grande período de Pesquisa, Desenvolvimento, Demonstração e Disseminação (PDDD) e há ainda muitas questões por responder. Como tal poderá não ser possível cumprir com a prontidão na instalação proposta no plano governamental. Com as previsões feitas acerca da futura disponibilidade hídrica é fundamental garantir que em anos de seca extrema, em que não se possa contar com a energia hídrica, não irá faltar eletricidade aos portugueses. Sem os combustíveis fósseis a dependência energética diminui significativamente porém, em anos com pouca água não poderemos depender da importação de eletricidade, pelo que é fundamental garantir a existência de uma tecnologia base pronta a debitar eletricidade quando as tecnologias intermitentes falharem.

4

Inserção de uma central Nuclear no Sistema Elétrico Português

Conteúdo

4.1 Dimensionamento da central nuclear	32
4.2 Resultados da Modelação	34
4.3 Análise dos resultados obtidos	35

Neste capítulo estuda-se a viabilidade da inserção de energia nuclear no mix energético. Faz-se o dimensionamento da possível central nuclear e apresentam-se os resultados da simulação.

4.1 Dimensionamento da central nuclear

Tal como foi referido anteriormente, o vento e o sol são fontes de energia intermitentes, ou seja, dependem das condições climáticas para produzirem energia. É preciso ter uma fonte de energia base que consiga garantir o consumo em períodos críticos. Em Portugal as centrais com capacidade de despacho são as centrais a combustíveis fósseis e as hídricas. Retirar os combustíveis fósseis levanta muitas questões de segurança no abastecimento, é necessário substituir a sua capacidade por outra fonte de energia igualmente confiável. No plano governamental RNC2050 pretende-se preencher esta lacuna com a instalação de baterias e com o aumento na capacidade instalada de hídrica com bombagem. Nesta dissertação pretende-se avaliar o uso de energia nuclear para que, em conjunto com a hídrica, representem a base do sistema eletroprodutor.

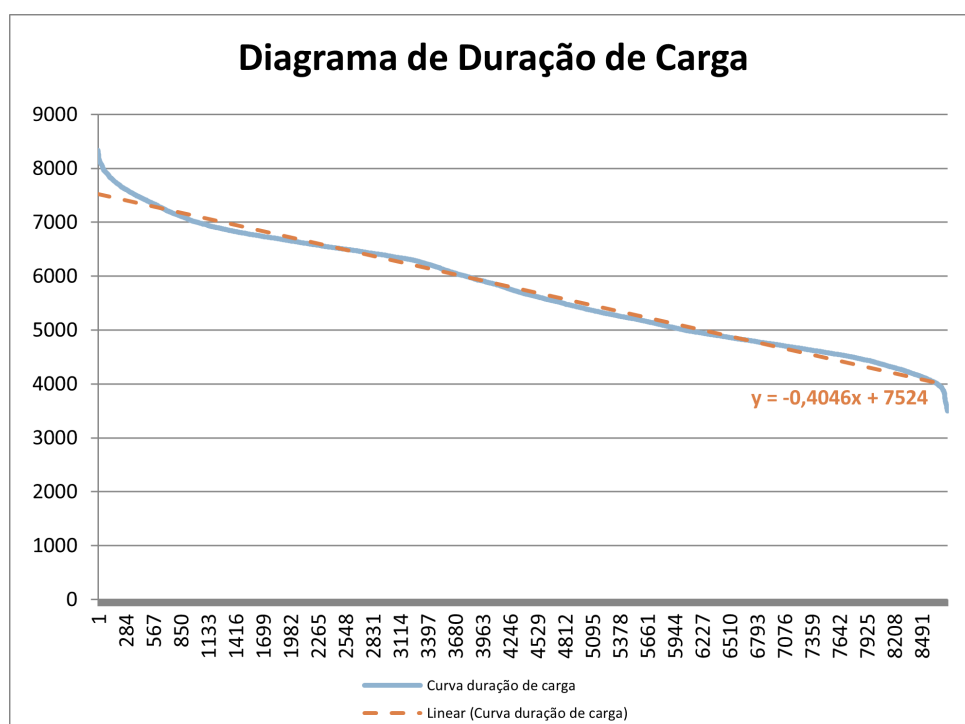


Figura 4.1: Diagrama de duração de carga para o ano de 2019

Para dimensionar a central nuclear construiu-se o diagrama de duração de carga ¹ para o ano de 2019 apresentado na figura 4.1. A azul está representada a curva de duração de carga bruta e a laranja

¹O diagrama de duração de carga consiste no consumo anual agregado de forma decrescente, relacionando a carga com o número de horas em que essa carga é excedida.

tracejado uma aproximação linear com a equação:

$$P = -0,4046h + 7524[MW] \quad (4.1)$$

A potência instalada de uma tecnologia base terá de ser, no mínimo, a suficiente para fornecer o mínimo a todas as horas do ano (8760), ou seja, $P_{min} = 4000MW$.

Para garantir a continuação da coerência dos dados inseridos no capítulo anterior, utilizou-se a folha de dados da IEA-ETSAP E-TechDS referente à energia nuclear [20] e assumiu-se um custo capital de $2700\text{€}/kW$. Multiplicando a potência instalada por este valor obtém-se um custo de investimento de $10.8000M\text{€}$. Para fazer uma previsão do número de anos de atividade da central necessários para amortizar o investimento é necessário calcular a energia produzida pela mesma por ano. O fator de utilização ² é dado pela equação 4.2, em que a é o fator de capacidade da central nuclear, considerado ser 0,88. A energia produzida anualmente pela central é dada pela equação 4.3, P representa a potência instalada.

$$h_a = 8760a = 7708,8h \quad (4.2)$$

$$W = P \times h_a \simeq 30835,2GWh \simeq 111PJ \quad (4.3)$$

No ano de 2019, o preço final médio da energia contratada por comercializadoras em mercado livre, regulado e consumidores diretos foi de $53,25\text{€}/MWh$. Para calcular o lucro da central por unidade de energia produzida é necessário descontar os custos de operação e manutenção (cerca de $14\text{€}/MWh$) e os custos do combustível (cerca de $10\text{€}/MWh$) [23]. Obtém-se um lucro de cerca de $29,25\text{€}/MWh$. Multiplicando este valor pela energia produzida pela central obtém-se uma receita líquida de $902M\text{€}/ano$. Por último, dividindo o custo de investimento pela receita anual concluí-se que em cerca de 12 anos o investimento estará pago.

Importa ainda referir que, o relatório de 2020, *Projected Costs of Generating Electricity* elaborado pela Agência Internacional de Energia, os custos de investimento nesse ano variaram entre $2157\$/kWe$ na Coreia do Sul e $6920\$/kWe$ na Eslováquia [24]. Considerando o pior caso possível, com custos capitais a rondarem os $6500\text{€}/kW$, o custo total da central seria de $26.000M\text{€}$ e este investimento estaria amortizado em cerca de 29 anos.

As centrais nucleares têm um tempo de operação base de 40 anos, mas com a tecnologia atual e com a devida manutenção as centrais conseguem operar durante 60 anos. Assim sendo, considerando os custos capitais mais elevados e atrasos na construção, a instalação de uma central nuclear em Portugal continuaria a ser rentável.

²O fator de utilização representa o nº de horas que a central teria de trabalhar à potência nominal para produzir a energia que produz efetivamente num ano.

4.2 Resultados da Modelação

Os parâmetros base do modelo foram definidos à semelhança da modelação sem nuclear. Inseriram-se os dados referentes ao consumo e potência instalada do ano base de 2019. No que diz respeito aos custos, considerou-se que os custos de investimento serão de 2700€/kW, os custos de operação e manutenção (fixos e varáveis) 14€/MW e os custos de combustível 10€/MWh. O fator de capacidade é de 0,88 pois as centrais nucleares trabalham continuamente apenas interrompendo para manutenção e abastecimento.

Tal como foi descrito na secção anterior, a central nuclear terá de ter no mínimo, 4 GW de capacidade instalada. Como uma central nuclear demora, entre 5 a 7 anos a ficar finalizada estabeleceu-se que só em 2030 é que a central estaria pronta a iniciar atividade (não considerando atrasos na construção). Admitiu-se também que, caso seja rentável, em 2040 e findos 10 anos, a central poderá aumentar a sua capacidade para os 6 GW. Como as centrais nucleares são tecnologias muito pouco flexíveis a sua produção será sempre estável e previsível, pelo que ficou definido que a central estará sempre a produzir no seu máximo.

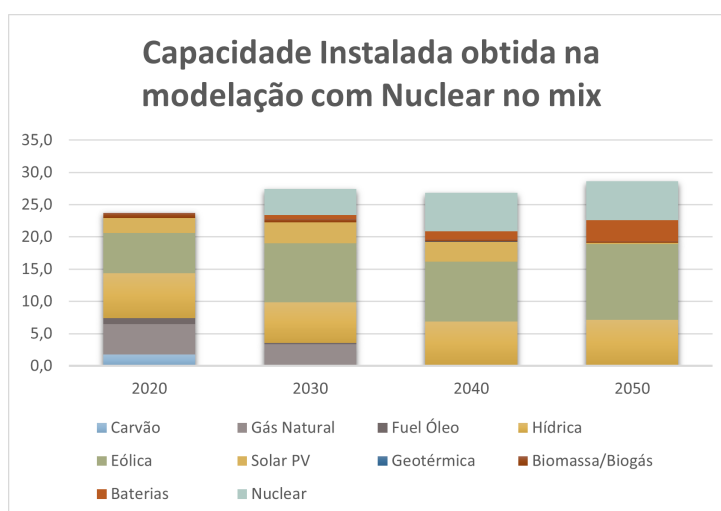


Figura 4.2: Previsão da Produção de Energia Elétrica em Portugal com Nuclear no mix energético

Na tabela 4.1 e na figura 4.2 apresentam-se os resultados obtidos relativos à incorporação da central nuclear no sistema elétrico português. É possível observar que a grande discrepância relativa ao roteiro para a neutralidade carbónica é a capacidade instalada total. Como a central nuclear tem uma produção sólida e constante, permite que o aumento previsto no consumo de eletricidade não resulte num aumento substancial de capacidade instalada. Relativamente à energia solar também se obteve um resultado interessante, com nuclear no mix a energia solar deixa de fazer sentido, porém a energia eólica continua a ter um peso relevante no mix energético. As baterias seguem em linha com o RNC2050 mas com menos importância e com o objetivo único de armazenarem o excedente dos

	RNC2050				Modelação			
[MW]	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050
Carvão	1,80	0,00	0,00	0,00	1,76	0,00	0,00	0,00
Gás Natural	4,90	3,75	2,40	0,20	4,73	3,38	0,00	0,00
Fuel Óleo	0,70	0,20	0,10	0,00	0,91	0,19	0,10	0,00
Hídrica	7,10	8,50	8,50	8,50	6,99	6,26	6,76	7,10
Eólica	5,20	7,90	10,00	13,25	6,24	9,19	9,32	11,80
Solar PV	1,90	7,10	16,95	26,20	2,28	3,23	3,06	0,18
Geotérmica	0,10	0,10	0,10	0,00	0,03	0,02	0,01	0,01
Biomassa e Biogás	0,90	1,50	1,40	1,60	0,81	0,52	0,36	0,28
Baterias	0,00	0,90	2,00	4,00	0,00	0,63	1,24	3,25
Nuclear	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00	6,00	6,00
Total	22,6	30,0	41,5	53,8	23,7	23,4	20,8	22,6

Tabela 4.1: Evolução da capacidade instalada proposta no RNC2050 e obtida na modelação com nuclear no mix energético

parque solares e eólicos.

Apresenta-se ainda a estimativa de produção de eletricidade em território nacional com a presença de uma central nuclear (figura 4.3).

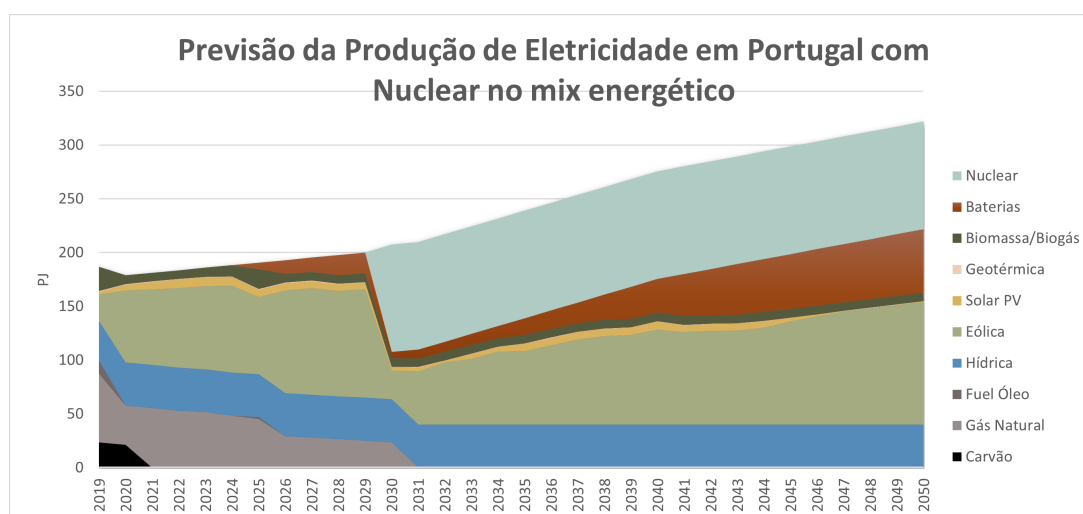


Figura 4.3: Previsão da Produção de Energia Elétrica em Portugal com Nuclear no mix energético

4.3 Análise dos resultados obtidos

A inserção de uma central nuclear em Portugal altera significativamente as previsões das necessidades energéticas elaboradas pelo roteiro para a neutralidade carbónica.

Tal como no plano, a utilização de combustíveis fósseis pode ser eliminada em 2040 com o abandono das centrais a gás natural. A dependência na energia hídrica seria reduzida e a modelação

sugere que poder-se-á reduzir a capacidade instalada relativamente à atual. A construção de barragens continuará a fazer sentido para armazenamento e regadio e, em anos com abundância de água, as barragens terão um peso importante no mix energético.

No que diz respeito às fontes de energia intermitentes, o conjunto solar fotovoltaico e parques eólicos passam a representar cerca de 53% em 2030 e 50% em 2050 (face aos 70% propostos no roteiro). Isto traduz-se numa menor dependência energética relativamente às condições atmosféricas e consequentemente num aumento na segurança no abastecimento.

Os resultados da modelação mostram que a instalação de uma central nuclear em Portugal irá abastecer entre 30% a 50% das necessidades de consumo. Funcionará como uma base sólida e segura de abastecimento de eletricidade e, aliada às renováveis poderá ser uma solução viável para atingir a neutralidade carbónica em 2050.

No futuro, o valor da eletricidade gerada dependerá da disponibilidade de uma central em fornecer energia em períodos críticos. As centrais nucleares fornecem eletricidade a qualquer hora do dia, numa base estável, independentemente das condições exteriores. A instalação de uma central nuclear em Portugal poderá resultar numa diminuição do custo da eletricidade.

A energia nuclear não só produz eletricidade como pode produzir hidrogénio. Os reatores nucleares de geração IV podem fornecer hidrogénio a nível mundial, integrando a energia nuclear com separação termo-química da água e eletrólise. [25].

A compatibilidade entre os reatores nucleares e grande parte das energias renováveis ainda não é completamente compreendida. As centrais nucleares não são flexíveis, ou seja, produzem sempre à potência máxima e, consequentemente, a mesma quantidade de eletricidade. As centrais eólicas e as solares são exatamente o contrário, produzem mais ou menos consoante as condições climáticas. A tecnologia solar tem ainda outra particularidade, apenas produz eletricidade quando há sol. Isto faz com que, durante a noite seja necessária outra fonte de energia que possa fornecer a quebra provocada pela falta de sol. Neste momento, a única fonte capaz de preencher tal requisito é o gás natural.

Para ilustrar esta situação, apresenta-se o caso da Califórnia, um dos locais com mais inserção de energia solar no seu mix energético, com cerca de 13 GW instalados - correspondentes a 70% do mix de renováveis. Na figura 4.4, é possível observar o mix energético no dia 20 de Abril de 2022. Neste dia, as fontes renováveis produziram, durante o pico de sol, cerca de 18 GWh, porém a partir das 18h há uma grande quebra na produção renovável que é compensada por um aumento nas importações e na produção através de gás natural. Importa referir que, na Califórnia, as baterias ainda têm pouco significado (apenas 0,13 GW instalados), no entanto, apesar de 70% da eletricidade na Califórnia ser renovável, está ainda muito dependente do gás natural e importações. O caminho para a neutralidade carbónica através de fontes renováveis não poderá estar dependente de combustíveis fósseis como o gás natural. Na figura 4.5, apresenta-se as emissões de CO_2 para o mesmo dia. Durante os períodos

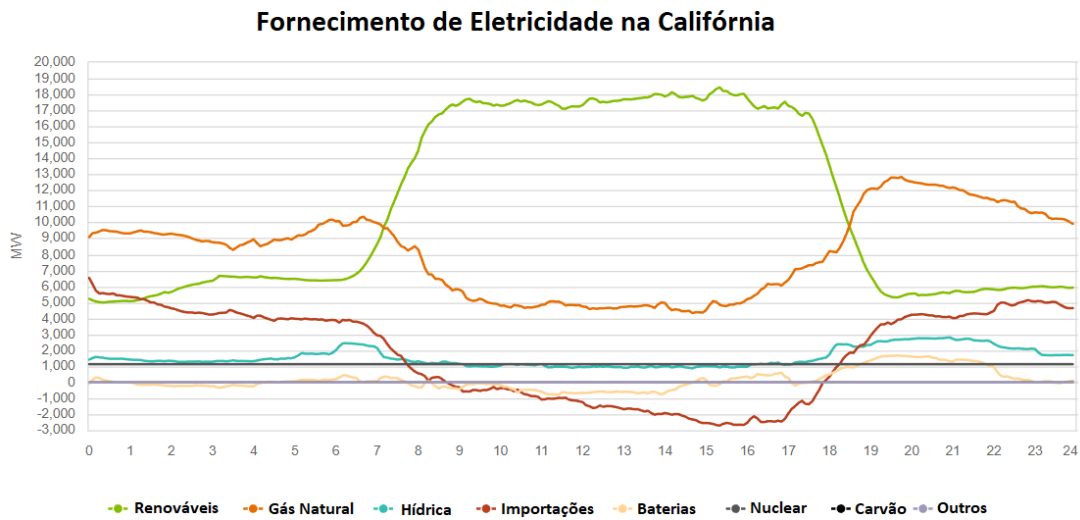


Figura 4.4: Produção de Eletricidade na Califórnia no dia 20/04/2022. Fonte: CAISO

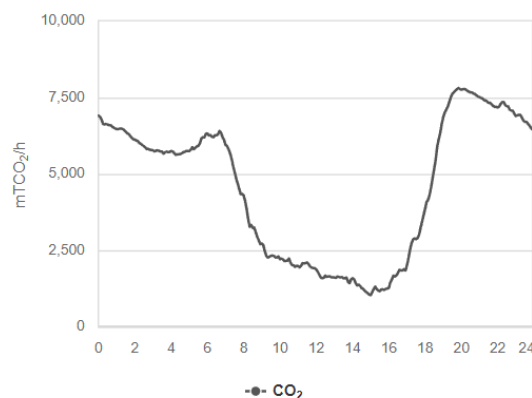


Figura 4.5: Emissões de CO_2 na Califórnia no dia 20/04/2022. Fonte: CAISO

de sol as emissões são baixas, mas a partir das 18h, altura em que o sol se põe e o consumo energético é muito elevado, as emissões triplicam.

O caminho para atingir a neutralidade carbónica ainda não é certo, e numa fase transitória poderá ser utilizado o gás natural, no entanto, no futuro teremos de abandonar esta fonte. Para que Portugal atinja os 70% do conjunto eólica-solar em 2050, será necessário que haja uma fonte de baixo carbono que possa compensar as oscilações destas tecnologias. Por enquanto as baterias ainda não são viáveis e existem muitas questões por resolver no que diz respeito ao armazenamento de longa duração. No entanto, até 2050 poderá ser uma possível solução.

A tecnologia nuclear poderá ser outra solução, estão em desenvolvimento reatores de pequenas dimensões ou microreatores que poderão satisfazer as renováveis. [26]

5

Análise Integrada para as tecnologias Solar, Eólica e Nuclear

Conteúdo

5.1	Custo Nivelado da Energia - LCOE	40
5.2	Emissões de Gases com Efeito de Estufa	41
5.3	Consumo de água	43
5.4	Utilização do solo	44
5.5	Materiais	45

Este capítulo procura fornecer uma análise integrada das tecnologias com maior peso no futuro mix energético nacional. Como as centrais térmicas deixarão de produzir energia e a tecnologia hídrica não irá sofrer aumentos significativos na sua capacidade instalada, apenas se fará a análise para as tecnologias solar fotovoltaico, eólica *onshore* e nuclear. Como o armazenamento em baterias ainda é uma tecnologia em desenvolvimento e ainda não há um plano definido sobre a inserção desta tecnologia em Portugal, também se excluiu da análise.

5.1 Custo Nivelado da Energia - LCOE

Na avaliação integrada de uma tecnologia de produção de eletricidade é de enorme importância a avaliação dos custos. Um dos cálculos mais utilizados é o LCOE, que representa o custo por unidade de eletricidade produzida durante um período de tempo definido (usualmente o tempo de vida da central). O LCOE avalia os custos de investimento, fixos e variáveis e serve de indicador para qual o preço da eletricidade mínimo de forma a que as receitas igualem os custos, incluindo uma taxa de retorno de capital igual à taxa de atualização. LCOE é dado pela equação 5.1 em que:

- C_T Custos Totais de Produção anuais
- W_a Eletricidade Produzida anualmente
- I : Custos de Investimento
- $FO\&M_t$: Custos Fixos de Operação e Manutenção (OM) no ano t
- $VO\&M_t$: Custos Variáveis de OM no ano t
- F_t : Custos de combustível no ano t
- W_t : Energia Produzida no ano t
- r : Taxa de Atualização
- n : Vida útil esperada

$$LCOE = \frac{C_T}{W_a} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I+FO\&M_t+VO\&M_t+F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{W_t}{(1+r)^t}} \quad (5.1)$$

Para o ano de 2018 e nas aplicações dentro da UE27, o LCOE da tecnologia eólica *onshore* variou entre 41-89 €/MWh e da tecnologia solar PV com capacidade instalada acima de 1MW variou entre 43-168 €/MWh. Entre 2008 e 2019 não foi feito nenhum comissionamento a uma central nuclear, apesar de estarem várias em construção. Nos Estados Unidos, o LCOE da tecnologia nuclear variou entre

72-82 €/MWh. Os altos custos de investimento são compensados pelo alto fator de capacidade desta tecnologia (cerca de 88%) [27].

Quanto mais altos são os custos de investimento mais alto será o LCOE, no entanto, o mesmo acontece para o fator de capacidade. Esta é a principal razão para alguns parques solares apresentarem valores de LCOE tão elevados, os custos de investimento e de OM têm vindo a diminuir bastante nos últimos anos, mas a melhoria no fator de capacidade têm sido difícil. Isto revela que, caso haja um aumento na procura e desenvolvimento da tecnologia nuclear e consequente diminuição de custos, o valor do LCOE das centrais nucleares poderá tornar-se altamente competitivo. Porém, na realidade, o LCOE da energia nuclear tem vindo a aumentar nas últimas décadas devido aos atrasos nas aprovações de projetos e na construção. Devido aos acidentes nucleares do passado as medidas de segurança têm vindo a aumentar e a ser cada vez mais restritas.

Importa referir que apesar do LCOE ser um indicador amplamente utilizado nos estudos e desenvolvimentos de projetos, é necessário ter em conta que não considera certos atributos importantes na geração de eletricidade. Não faz distinção nas energias que são despacháveis, não considera o valor da capacidade despacho com procuras de pico, não têm em conta as diferenças no valor da eletricidade (em horas de pico e no vazio), nos serviços auxiliares nem nos custos de integração na rede. Neste último ponto importa realçar que a criação de parques solares e eólicos descentralizados irá necessitar de um grande investimento em linhas de alta e média tensão [2].

5.2 Emissões de Gases com Efeito de Estufa

A análise das emissões de GEE de cada tecnologia não poder ser feita apenas para a produção de eletricidade. As centrais térmicas são as principais responsáveis pelas emissões de gases com efeito de estufa na atmosfera devido à combustão mas para analisar o impacto de cada tecnologia é preciso estudar as emissões ao longo de toda a vida útil da tecnologia em causa. As emissões podem ser definidas em quatro tipos [4]:

- Emissões *upstream*: emissões relativas à extração de matérias primas, fabrico de materiais e componentes e transporte (desde o fabrico até ao local da instalação). Apenas acontecem uma vez;
- Emissões de operação sem combustão: emissões que ocorrem durante a operação da central elétrica não resultantes de combustão e incluem o ciclo de combustível e as emissões resultantes das atividades de OM;
- Emissões de operação com combustão: emissões resultantes da geração de eletricidade;

	One time upstream (g CO₂e/kW)	One time downstream (g CO₂e/kW)
Solar PV	1 630 000	37 800
Éolica	619 000	22 400
Nuclear	350 000	175 000

Tabela 5.1: Emissões resultantes do ciclo de vida das tecnologias solar PV, eólica e nuclear [4]

- Emissões *downstream*: emissões relativas ao fim de vida de uma central, provocadas pelo desmantelamento e descomissionamento, transporte para eliminação de todos os resíduos, reciclagem, etc.

Como as tecnologias em análise são energias limpas, apenas interessa estudar o impacto das emissões *upstream* e *downstream*, representados na tabela 5.1 e na figura 5.1. Entre as três tecnologias em análise, a solar PV é a que mais emite GEE, principalmente na parte de fabrico e matérias-primas. Todas as tecnologias têm mais emissões na fase de *upstream* mas, no que diz respeito ao final de vida, a tecnologia nuclear é a mais emissora.

Importa ainda referir que no que diz respeito às emissões em operação, a central nuclear emite cerca de $10,6gCO_2eq/kWh$, os parque eólicos cerca de $1,61gCO_2eq/kWh$ e, no fotovoltaico, são desprezáveis [4].

Como irá ser referido na secção 5.5, a construção de um parque solar exige muita quantidade de materiais por unidade de eletricidade produzida. Todo o processo de extração, fabrico e instalação destes materiais resulta no elevado valor de emissões de GEE referido na tabela 5.1.

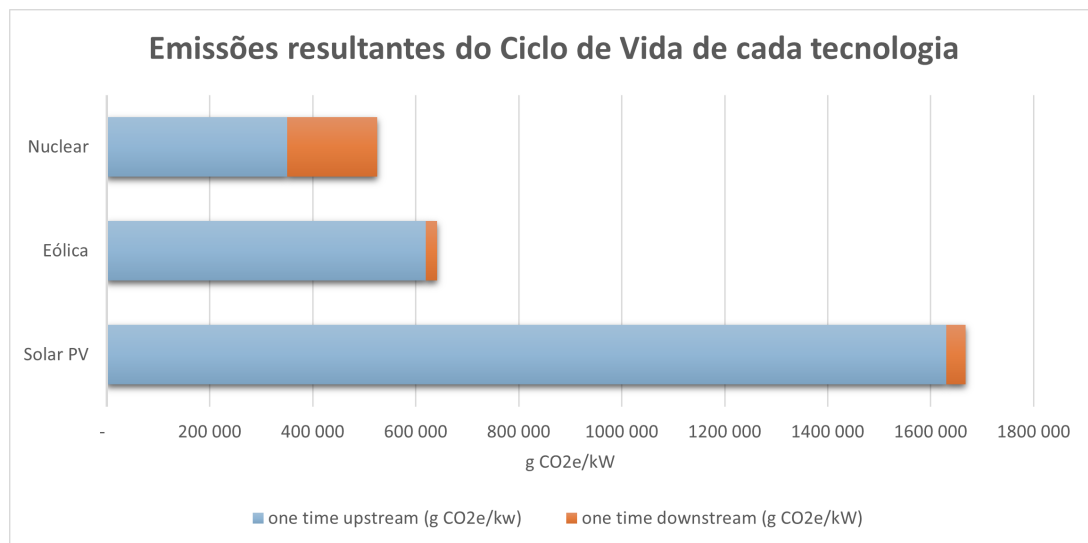


Figura 5.1: Emissões resultantes do ciclo de vida das tecnologias solar PV, eólica e nuclear

	Ciclo de Combustível (gal/MWh)	Central Elétrica (gal/MWh)	Operação (gal/MWh)
Solar PV	-	81	6
Éolica	-	1	<1
Nuclear	143	-	1 730

Tabela 5.2: Consumo de água no ciclo de vida das tecnologias solar PV, eólica e nuclear [1]

5.3 Consumo de água

A água é um dos recursos mais importantes da Natureza, e em qualquer fase do ciclo de vida de uma tecnologia de produção de eletricidade é necessário água, desde a extração de recursos à produção e ao descomissionamento. Um dos efeitos das alterações climáticas será a escassez dos recursos hídricos, como tal, é de enorme importância estudar o impacto que cada uma das tecnologias terá.

Na tabela 5.2 e na figura 5.2, apresenta-se o consumo de água consoante o estágio do ciclo de vida de cada tecnologia. Para a central nuclear foi apenas considerado o ciclo de combustível e a operação. No ciclo de combustível está incluída a extração, armazenamento e eliminação do combustível utilizado. A operação inclui a normal utilização da central e o consumo de água relativos ao *upstream* e *downstream*. Nas tecnologias solar e eólica considerou-se que a operação é apenas a produção de eletricidade e a central elétrica o conjunto de operações de *upstream* e *downstream* [1].

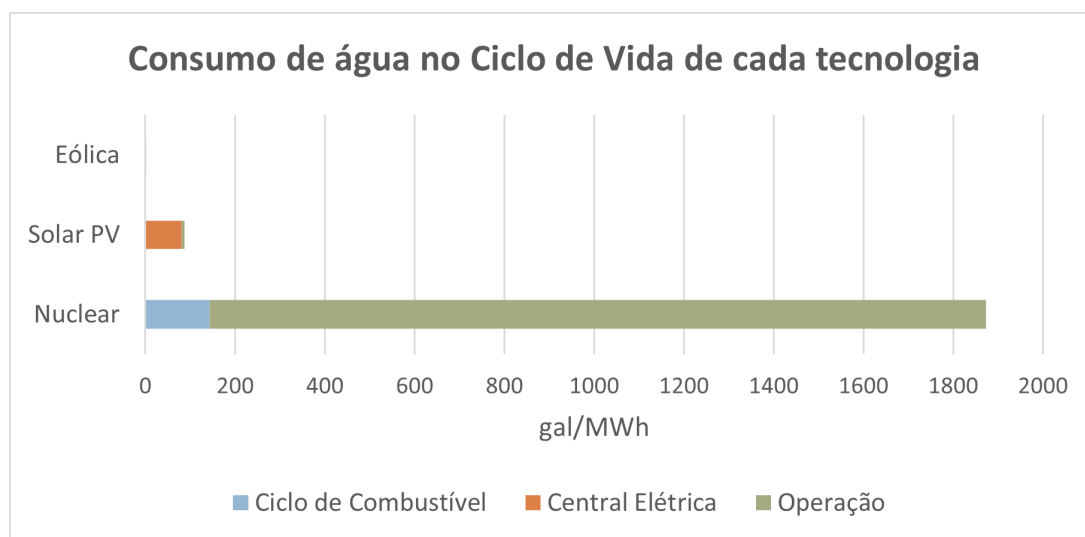


Figura 5.2: Consumo de água no ciclo de vida das tecnologias solar PV, eólica e nuclear [1]

A análise ao uso de água em cada tecnologia apresenta algumas dificuldades. O consumo de água não é linear e ao contrário das emissões de GEE, os impactos hídricos são locais. A análise ao consumo de água deve ser feita regionalmente e tendo em conta outros fatores, como a disponibilidade hídrica e a fauna e flora do local.

	m2/MW	Definição
Solar PV	10 000 - 60 000	Território utilizado pelo parque solar para a produção de eletricidade.
Éolica	2 600 - 1 000 000	O limite inferior apenas diz respeito ao parque eólico, conjunto turbina mais estrada de acesso. O limite superior representa a área entre turbinas, tipicamente utilizada para agricultura
Nuclear	6 700 - 13 800	O limite inferior representa apenas a central nuclear. O limite superior inclui a central, linhas de transmissão, fornecimento de água e linhas ferroviárias mas exclui o solo utilizado para mineração, processo e depósito de resíduos

Tabela 5.3: Requisitos de solo das tecnologias solar PV, eólica e nuclear [2]

No caso da energia nuclear, o consumo de água é bastante significativo, as centrais nucleares necessitam de estar próximas de uma fonte de água abundante, seja um rio ou mar. A localização de uma central nuclear está fortemente dependente da disponibilidade de água, mas também da sismicidade do local e a proximidade do mercado consumidor e como tal, apesar de Portugal ter uma vasta costa, a localização ideal poderá ser junto a um rio. As centrais nucleares utilizam água em forma de vapor para produzir eletricidade. Nas centrais mais comuns (*Pressurized Water Reactors (PWR)*) a água está separada do reator e como tal, está livre de radioatividade. Os sistemas de arrefecimento são feitos de forma a que, caso haja fugas, a água é encaminhada para a central e não para o exterior, de forma a minimizar as fugas de radioatividade. A água contaminada também é tratada antes de ser reintroduzida no rio ou mar. Também é necessária água para arrefecimento do combustível [28].

A instalação de uma central nuclear em Portugal necessitaria de uma forte investigação relativa ao uso da água e ao impacto na fauna e flora perto da central.

5.4 Utilização do solo

Outro fator crítico a ter em conta na avaliação de tecnologias de produção de eletricidade prende-se com os requisitos que cada tecnologia tem no que respeito à utilização do solo. Definir o uso de território de uma tecnologia não é linear, na tabela 5.3 faz-se uma breve análise dos requisitos de solo por MW de capacidade instalada [2]. Na análise do uso do território, os resultados são sempre binários, ou o solo está utilizado ou não. É importante definir o território que será para uso exclusivo de produção de eletricidade e aquele que pode ter mais do que uma utilização.

Para as centrais nucleares, a área da central será exclusiva e não poderá ser utilizada para outro fim, porém, a zona de segurança ao redor da central continuará a ser passível de fauna e flora. tendo em conta as restrições de segurança.

A instalação de turbinas eólicas e dos parques solares tem provado ter um impacto ambiental muito grande, quer seja para a fauna e flora no local, como para a vida urbana que os rodeia. As turbinas

estão associadas a poluição sonora, diminuição da vida selvagem e diminuição no valor dos terrenos ao redor destes parques. As centrais solares exigem uma área extensa e exclusiva para a produção de eletricidade, o terreno utilizado fica com pouca permeabilização e a temperatura no local pode sofrer um aumento de 2-3°C perto das células solares pois estas atingem facilmente temperaturas de 65°C em dias de Verão [29].

A instalação de qualquer uma destas tecnologias necessita de ter um forte estudo sobre qual o impacto ambiental no terreno e na vida animal e vegetal. Importa referir que o Roteiro para a Neutralidade Carbónica em Portugal pretende instalar 26 GW em solar fotovoltaico e 13 GW em eólico, face aos 1,1 GW e 5,5 GW instalados atualmente, respetivamente.

Faz-se uma estimativa bruta de qual a área necessária para satisfazer a potência proposta no RNC2050 utilizando a equação 5.2, em que P_p é a potência de pico dos painéis, G^r a irradiância em condições *Standard Test Conditions* (STC) ($G^r = 1000W/m^2$ e η^r o rendimento nestas condições). Considerou-se um rendimento médio de 15%.

$$A = \frac{P_p}{G^r \eta^r} \quad (5.2)$$

Assumindo que não irá haver melhorias na eficiência dos painéis, obteve-se então que, para satisfazer a capacidade de 26 GW proposta no plano governamental, será necessária uma área de cerca de $173km^2$, equivalente a 1,7 vezes o concelho de Lisboa. Este resultado comprova a forte necessidade de um estudo que revele o verdadeiro impacto de ter esta área utilizada unicamente para produção de eletricidade através da energia solar.

5.5 Materiais

Por último, faz-se uma análise aos materiais utilizados em cada tecnologia. Na tabela 5.4 e na figura 5.3, apresenta-se a decomposição dos materiais para as tecnologias solar, eólica e nuclear.

Em 2015, o setor da indústria foi responsável por cerca de 13% das emissões nacionais. Este setor representa um dos principais desafios para a descarbonização, pois as opções tecnológicas que permitem reduzir as emissões são ainda muito limitadas [11]. No entanto, e dada a importância em encontrar soluções alternativas, tem sido feita bastante investigação principalmente no sentido de reduzir a pegada ecológica do cimento e do betão [30]. Para Portugal, a captura e armazenamento de carbono poderá ter um papel importante na descarbonização no setor do cimento. Porém ainda terá de haver muito desenvolvimento nesta área até se tornar custo-eficaz [11].

A tecnologia solar não só é das tecnologias com mais requisitos por TWh produzidos como também exige muita diversidade de materiais. A otimização e investigação em novos materiais é relevante uma vez que alguns dos materiais utilizados na produção de painéis solares são críticos e não existem em

Materiais (ton/TWh)	Tecnologia		
	Nuclear	Solar PV	Eólico
Alumínio	0	680	35
Cimento	0	3 700	0
Betão	760	350	8 000
Cobre	3	850	23
Vidro	0	2 700	92
Ferro	5	0	120
Chumbo	2	0	0
Plástico	0	210	190
Silício	0	57	0
Aço	160	7 900	1 800
Total	930	16 447	10 260

Tabela 5.4: Requisitos de materiais das tecnologias solar PV, eólica e nuclear [2]

abundância na Natureza. A reciclagem dos painéis é, também, de enorme importância.

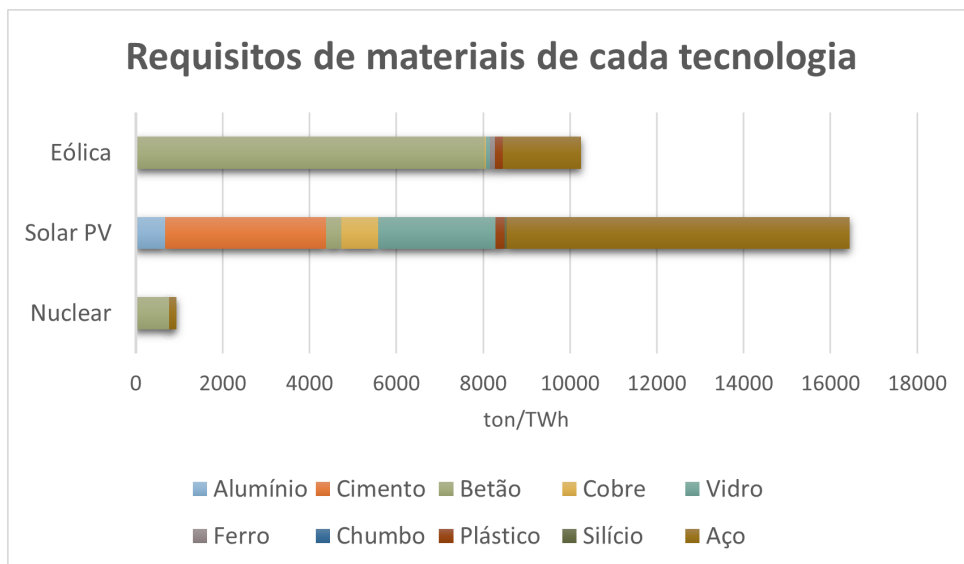


Figura 5.3: Materiais utilizados pelas tecnologias solar PV, eólica e nuclear [2]

6

Conclusão

Conteúdo

6.1 Conclusões Finais	48
6.2 Trabalho Futuro	50

6.1 Conclusões Finais

Este trabalho teve como objetivo analisar a viabilidade do plano português para atingir a neutralidade carbónica em 2050 e estudar a possibilidade da inserção de uma central nuclear em Portugal na década 2030-40. Utilizou-se o sistema de modelação OSeMOSYS de forma a, numa primeira fase, criar um modelo com os objetivos do RNC2050 e, numa segunda fase, introduzir uma central nuclear em Portugal. Ao introduzir-se nuclear no mix energético, as grandes diferenças surgiram na percentagem de eólica e solar e, como tal, fez-se uma avaliação integrada durante todo o tempo de vida útil destas três tecnologias.

Numa primeira fase, procurou-se criar um modelo que fosse o mais próximo possível do proposto pelo governo e analisar os resultados obtidos. Tiveram de ser impostas algumas restrições para que o modelo produzisse resultados semelhantes, forçou-se o modelo a cessar as centrais térmicas de acordo com o RNC2050 e limitou-se a potência instalada em hídrica, eólica e solar, face às limitações que estas tecnologias têm. Concluiu-se que, apesar do custo da tecnologia solar fotovoltaico ter vindo a diminuir significativamente, devido ao seu baixo rendimento (fator de capacidade de 13-15%), o modelo não considerou que esta tecnologia fosse custo eficaz, e deixa de investir em nova capacidade instalada na década de 2040-2050. A simulação também resultou numa necessidade maior em baterias do que a estipulada pelo governo.

De seguida dimensionou-se potência necessária para uma central nuclear em Portugal e obteve-se que, numa primeira fase seriam necessários 4 GW instalados e, posteriormente, poderia-se aumentar esta capacidade para 6 GW. Apesar dos altos custos de investimento, o modelo considera a tecnologia custo eficaz. Nesta fase obtêm-se resultados muito diferentes dos propostos no RNC2050. O modelo considera que a nuclear não só é economicamente viável, como será economicamente mais interessante do que a tecnologia solar fotovoltaico. As baterias continuam a fazer sentido, numa perspetiva de armazenarem o excesso produzido pelo solar e eólico.

Fez-se ainda uma avaliação integrada e análise do ciclo de vida das tecnologias solar, eólica e nuclear. No que diz respeito ao LCOE, a tecnologia eólica é a que representa menores custos, o que está em linha com os resultados obtidos na simulação. Quer seja com ou sem nuclear no mix, o modelo procura sempre alocar a máxima capacidade possível a esta tecnologia. Relativamente ao LCOE da nuclear e solar, os resultados não são lineares. Há aplicações de solar com LCOE bastante reduzidos porém, para certas aplicações, o LCOE pode ser inferior ao solar. Este resultado revela que se fosse feita investigação e investimento em nuclear, esta tecnologia poderia ter os seus custos de investimento mais reduzidos e torná-la tão competitiva como a solar. Avaliaram-se também as emissões de GEE para toda a vida útil das tecnologias em causa. Aqui, tanto a tecnologia eólica como a solar têm valores de emissões superiores aos da nuclear, maioritariamente causados pelas atividades de *upstream*. Os requisitos hídricos também foram apresentados e, neste caso, a tecnologia nuclear apresenta necessi-

dades superiores às das restantes tecnologias em análise. A instalação de uma central nuclear tem de ser feita próxima de uma fonte de água abundante, seja ela o rio ou o mar. Os reatores mais utilizados separam a água do reator, pelo que parte da água utilizada pela central volta à sua origem. Analisaram-se também os recursos de solo das tecnologias. As necessidades de território são difíceis de analisar pois muitas vezes o solo pode ser utilizado para mais do que um fim. Aqui importa realçar o impacto que os parques solares e eólicos têm para a fauna e flora ao seu redor. Por último, apresentaram-se os requisitos de materiais que cada tecnologia tem. As necessidades de materiais estão em linha com as emissões de *upstream*. As fontes renováveis necessitam, significativamente, de mais materiais do que a instalação de uma central nuclear. Enquanto a central nuclear só necessita de betão e aço (cobre e chumbo em pouca quantidade), os parques solares necessitam de alumínio, cimento, betão, cobre, vidro, plástico, silício e aço, e em muito mais quantidade por unidade de energia produzida. Um parque eólico também apresenta mais necessidades do que uma central nuclear.

Após toda a análise realizada, levantam-se algumas dúvidas sobre a exequibilidade do proposto no RNC2050, principalmente no que diz respeito ao solar fotovoltaico. Na secção 5.4, faz-se uma estimativa da área necessária para a instalação dos 26 GW propostos. Obtém-se que serão necessários, no total, cerca de $173km^2$ de área instalada. Importará perceber o impacto que esta área terá para Portugal, não só na ocupação da área que poderia ter outros fins, como nos ajustes que a rede elétrica portuguesa terá de fazer. No entanto, a maior questão que se levanta, relativamente ao plano governamental, é a questão da percentagem de eólica e solar. Ter 70% do total da capacidade instalada neste conjunto só poderá ser possível havendo outra fonte de energia que assegure a segurança no abastecimento, dada a intermitência destas tecnologias. No RNC2050 esta base será feita através das centrais hídricas e das baterias. No final do ano de 2021, Portugal cessou a atividade das últimas centrais a carvão, considerando que o país teria recursos suficientes para compensar esta perda, principalmente com energia hídrica. O ano de 2022 tem sido um ano de seca e, como tal, a produção de eletricidade a partir das barragens está limitada. A recessão provocada pela pandemia Covid19 e todo o conflito entre a Rússia e Ucrânia que se seguiu têm provocado um grande aumento na inflação e uma grande tensão no abastecimento de gás natural. O fecho das centrais a carvão revelou-se precipitado e provocou um aumento na dependência energética de Portugal e numa diminuição da segurança do abastecimento.

Também é possível concluir que a instalação de uma central nuclear apesar de aumentar a dependência energética devido às importações de Urânio, é, não só economicamente viável, como pode ser um fator importante no caminho para a descabornização. No entanto, seriam necessárias muitas mudanças, a opinião pública teria de mudar e os custos de investimento e atrasos teriam de ser reduzidos. Seria também necessário encontrar uma solução segura para os resíduos radioativos. Para a América do Norte e Europa, os tempos de construção têm excedido os 13-15 anos e os custos finais têm excedido 3 a 4 vezes os orçamentos iniciais. Em contraste, a maior parte dos projetos na Ásia

Oriental (com início da construção em 2012) foram finalizados entre 5 a 6 anos e não tiveram grandes derrapagens de custos [26].

O apoio público à energia nuclear é maior quando as pessoas estão preocupadas com a segurança energética, incluindo preocupações com a disponibilidade de energia e os altos preços de eletricidade. O apoio público também aumenta quando a confiança nos órgãos gestores é maior. Da mesma forma, processos de tomada de decisão transparentes e participativos melhoram a percepção da justiça processual e o apoio público [31].

Em conclusão, atingir a neutralidade carbónica em 2050 terá de garantir segurança, fiabilidade e não poderá ser feito com altos custos de eletricidade. O plano nacional proposto apresenta um possível caminho para a descarbonização, em que a maioria da eletricidade gerada seria de origem solar e eólica e a dependência energética nacional seria mínima relativamente à atual. A inserção de uma central nuclear traduzir-se-ia num aumento da dependência energética mas também no aproveitamento dos recursos de Urânio do país. Significaria apostar numa tecnologia que não é bem vista pela opinião pública, aceitar os riscos de um possível acidente nuclear na possível diminuição na segurança do país. Por outro lado, a instalação de uma central nuclear em Portugal traria não só mais segurança no abastecimento, como poderia aumentar a riqueza do país.

6.2 Trabalho Futuro

Após a conclusão deste trabalho, torna-se necessário discutir o trabalho que poderá ser realizado no futuro. Seria importante:

- Realizar um estudo económico sobre os investimentos necessários para completar o proposto no Roteiro para a Neutralidade Carbónica em Portugal e para a solução proposta com nuclear no mix energético;
- Encontrar uma solução de baixo carbono que seja custo eficaz e se ajuste à energia solar e produza eletricidade quando não houver sol, sejam reatores nucleares flexíveis ou baterias. Neste momento, e como foi apresentado na secção 4.3, este ajuste é feito através de gás natural. No futuro não poderá ser assim e esta situação só é viável numa fase de transição;
- Realizar um estudo sobre o impacto que terá a instalação da capacidade proposta no RNC2050 em solar e eólico. Este estudo terá de ter em conta todos os pontos discutidos no capítulo 5 juntamente com impactos na saúde pública, fauna e flora e segurança no abastecimento;
- Realizar um estudo sobre localização e impacto ambiental e socioeconómico da instalação de uma central nuclear em Portugal, considerando novamente os itens definidos no ponto acima;

- Desenvolver a tecnologia nuclear, seja em microreatores seja nos processos de eletrólise ou separação termo-química da água.

Bibliografia

- [1] J Meldrum, S Nettles-Anderson, G Heath and J Macknick, “Life cycle water use for electricity generation: a review and harmonization of literature estimates,” Mar. 2013.
- [2] D. of Energy USA, “Quadrennial Technology Review: An Assessment of Energy Technologies and Research Opportunities,” Oct. 2015.
- [3] “Plano Nacional Energia e Clima 2021-2030 (PNEC2030),” Dec. 2019. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/pt_final_necp_main_pt.pdf
- [4] NREL, “Renewable Electricity Futures Study Volume 1: Exploration of High-Penetration Renewable Electricity Futures,” Jun. 2012.
- [5] UNO, “Alterações climáticas,” Sep. 2017. [Online]. Available: <https://unric.org/pt/mundo-espera-solucao-para-alteracoes-climaticas-diz-ban-ki-moon-7/>
- [6] IPCC, “IPCC Press Release 2022/15/PR,” Apr. 2022. [Online]. Available: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2022/04/IPCC_AR6_WGIII_PressRelease_English.pdf
- [7] —, “Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change.” [Online]. Available: https://report.ipcc.ch/ar6wg3/pdf/IPCC_AR6_WGIII_FinalDraft_FullReport.pdf
- [8] Comissão Europeia, “Pacto Ecológico Europeu, Bruxelas, COM(2019) 640 final,” Dec. 2019. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/HTML/?uri=CELEX:52019DC0640&from=EN>
- [9] European Commission, “EU Taxonomy: Commission presents Complementary Climate Delegated Act to accelerate decarbonisation,” Feb. 2022.
- [10] —, “Questions and Answers on the EU Taxonomy Complementary Climate Delegated Act covering certain nuclear and gas activities,” Feb. 2022.
- [11] “Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050),” Jun. 2019. [Online]. Available: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/RNC2050_PT-22-09-2019.pdf

- [12] Comissão Europeia, “Reforçar a ambição climática da Europa para 2030, Bruxelas, COM(2020) 562 final,” Sep. 2020. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0562>
- [13] Observatório da Energia, DGEG, ADENE, “Energia em Números - Edição 2020,” Jun. 2020. [Online]. Available: <https://www.dgeg.gov.pt/media/43zf5nvd/energia-em-n%C3%BAmoros-edi%C3%A7%C3%A3o-2020.pdf>
- [14] “How does a nuclear reactor work - World Nuclear Association.” [Online]. Available: <https://www.world-nuclear.org/nuclear-essentials/how-does-a-nuclear-reactor-work.aspx>
- [15] IAEA, *Nuclear Power Reactors in the World 2020 Edition*. Vienna: IAEA, 2020, oCLC: 1202467149. [Online]. Available: <http://public.eblib.com/choice/PublicFullRecord.aspx?p=6358653>
- [16] World Nuclear Association, *World Nuclear Performance Report 2020*, Aug. 2020. [Online]. Available: <https://www.world-nuclear.org/getmedia/3418bf4a-5891-4ba1-b6c2-d83d8907264d/performance-report-2020-v1.pdf.aspx>
- [17] P. A. Kharecha and J. E. Hansen, “Prevented Mortality and Greenhouse Gas Emissions from Historical and Projected Nuclear Power,” *Environmental Science & Technology*, vol. 47, no. 9, pp. 4889–4895, May 2013. [Online]. Available: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es3051197>
- [18] M. Katusa, “The Thing About Thorium: Why The Better Nuclear Fuel May Not Get A Chance.” [Online]. Available: <https://www.forbes.com/sites/energysource/2012/02/16/the-thing-about-thorium-why-the-better-nuclear-fuel-may-not-get-a-chance/>
- [19] Fundação Francisco Manuel dos Santos, “Projeções 2030 e o Futuro,” 2012.
- [20] “IEA-ETSAP | Energy Supply Technologies Data.” [Online]. Available: <https://iea-etsap.org/index.php/energy-technology-data/energy-supply-technologies-data>
- [21] N. S. C. H. H. S. K. A. H. S. S. J. D. M. B. A. R. Mark Howells, Holger Rogner, “OSeMOSYS: The Open Source Energy Modeling System: An introduction to its ethos, structure and development,” Oct. 2011.
- [22] KTH-dESA, “OSeMOSYS Documentation: Release 0.0.1,” May 2021. [Online]. Available: <https://buildmedia.readthedocs.org/media/pdf/osemosys/latest/osemosys.pdf>
- [23] ETSAP, “Technology Brief EO3 - Nuclear Power,” Apr. 2010. [Online]. Available: https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/E03-Nuclear-Power-GS-AD-gct_FINAL.pdf

- [24] International Energy Agency, Nuclear Energy Agency, "Projected Costs of Generating Electricity - 2020 Edition," 2020. [Online]. Available: https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2020-12/egc-2020_2020-12-09_18-26-46_781.pdf
- [25] S. Şahin and H. M. Şahin, "Generation-IV reactors and nuclear hydrogen production," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 57, pp. 28 936–28 948, Aug. 2021. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319920348175>
- [26] A. Berger, T. Bles, F. M. Bréon, B. W. Brook, P. Hansen, R. B. Grover, C. Guet, W. Liu, F. Livet, H. Nifenecker, M. Petit, G. Pierre, H. Prévot, S. Richet, H. Safa, M. Salvatores, M. Schneeberger, and S. Zhou, "How much can nuclear energy do about global warming?" *International Journal of Global Energy Issues*, vol. 40, no. 1/2, p. 43, 2017. [Online]. Available: <http://www.inderscience.com/link.php?id=80766>
- [27] European Commission, "Final Report - Cost of Energy (LCOE)," Oct. 2020.
- [28] J. Meldrum, S. Nettles-Anderson, G. Heath, and J. Macknick, "Life cycle water use for electricity generation: a review and harmonization of literature estimates," *Environmental Research Letters*, vol. 8, no. 1, p. 015031, Mar. 2013. [Online]. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/8/1/015031>
- [29] A. R. Amelia, Y. M. Irwan, W. Z. Leow, M. Irwanto, I. Saftwati, M. Zhafarina, "Investigation of the Effect Temperature on Photovoltaic (PV): Panel Output Performance."
- [30] L. Reichenberg, F. Hedenus, M. Odenberger, and F. Johnsson, "The marginal system LCOE of variable renewables – Evaluating high penetration levels of wind and solar in Europe," *Energy*, vol. 152, pp. 914–924, Jun. 2018. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544218302895>
- [31] V. Knapp and D. Pevec, "Promises and limitations of nuclear fission energy in combating climate change," *Energy Policy*, vol. 120, pp. 94–99, Sep. 2018. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421518303318>