




O impacto ambiental da descarbonização do sistema elétrico português: Avaliação do Ciclo de Vida


Este estudo foi desenvolvido pelo programa *Future Energy Leaders* Portugal, da Associação Portuguesa da Energia e tem por objetivo perspetivar a sustentabilidade ambiental do Setor Elétrico Nacional.

Pontos-Chave

 A Avaliação do Ciclo de Vida é uma metodologia robusta, que permite quantificar os potenciais impactos ambientais de diversas tecnologias de produção elétrica, tendo em consideração as matérias-primas utilizadas, bem como as diferentes etapas até ao desmantelamento.

 A penetração de tecnologias de origem renovável contribui para a neutralidade carbónica, não obstante, outros impactos que emergem durante as diversas etapas do ciclo de vida, nomeadamente o uso do solo, o uso de metais e o consumo de água.

 É imperativo reforçar as políticas ambientais, bem como fomentar estratégias de economia circular, para a reutilização de resíduos em substituição de recursos naturais e matérias-primas (ex.: água e minérios), como forma de garantir a sustentabilidade da sua exploração, bem como de minimizar a dependência externa.

 Medidas de eficiência energética ao longo de todas as etapas do ciclo de vida destas tecnologias (extração, transporte, produção, desmantelamento), permitem reduzir os respetivos impactos ambientais, nomeadamente o potencial de aquecimento global.

RESUMO

A descarbonização do sistema elétrico nacional, aliada ao aumento da segurança de abastecimento e equidade no consumo, é uma prioridade no delineamento das políticas energéticas em Portugal. O Plano Nacional de Energia e Clima 2030 (PNEC 2030) prioriza a eficiência energética e a aposta nas fontes de origem renovável.

Este estudo analisa os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida - Construção, Operação e Desmantelamento - das tecnologias de produção renovável prioritárias no contexto nacional: hidroelétrica, eólica *onshore*, solar fotovoltaico e solar concentrado, por comparação ao gás natural (CCGT). São analisadas as seguintes categorias de impacto: o potencial de aquecimento global, o uso de recursos fósseis e minerais, o uso do solo e o consumo de água. Os impactos destas tecnologias na matriz energética de 2020 são comparados com uma projeção elaborada para 2030, segundo as metas do PNEC 2030.

Os resultados demonstram que, com incremento da geração de origem renovável, os impactos do aquecimento global e o uso de recursos fósseis diminuem consideravelmente. No entanto, os impactos de uso do solo e do uso de recursos minerais aumentam. Enquanto os impactos associados ao gás natural estão maioritariamente associados à etapa de operação, incluindo os que estão associados à extração, processamento e transporte do combustível, os impactos das fontes de origem renovável, na sua generalidade, predominam na etapa de construção, tendo pouca expressividade nas etapas de operação e desmantelamento.

As políticas de clima e de independência energética, bem como os objetivos traçados no PNEC 2030, viabilizam a diminuição da pegada de carbono do sistema elétrico português. No entanto, a inserção, em larga escala, das tecnologias de origem renovável deve ser realizada de forma que sejam mitigados os impactos identificados, - uso dos recursos minerais, consumo de água e uso do solo, - principalmente aquando da implementação das metas mais ambiciosas para 2050. Estes impactos devem ser considerados no planeamento energético nacional e promovidos a nível intersectorial, no delineamento de políticas reguladoras e mitigadoras, fomentando estratégias de sustentabilidade integrada e de economia circular. Assim, as diretrizes que visam a neutralidade carbónica devem também atender a outras categorias de impacto ambiental, numa perspetiva do ciclo de vida.

INTRODUÇÃO

"A expansão do uso de energia renovável é muito positiva em termos de alterações climáticas, mas deve ser acompanhada de um programa de economia circular para minimizar o uso intensivo de recursos naturais no fabrico dos equipamentos que estão associados ao aproveitamento das energias renováveis. "

- Paulo Ferrão, Prof. Catedrático no Instituto Superior Técnico-

A situação de emergência climática global acelerou o processo de transição energética, num esforço global e multilateral para mitigar os efeitos nefastos da utilização acentuada dos recursos naturais pelo Homem. No caso português, o setor energético representa cerca de 70% [1] das emissões de Gases com Efeito de Estufa (GEE), sendo muito relevante a sua descarbonização pela penetração de fontes de origem renovável.

O Governo Português tem vindo a consolidar, no plano legislativo, um conjunto abrangente de políticas públicas orientadas para uma estratégia de crescente descarbonização da economia, assegurando a penetração de tecnologias de origem renovável ou de baixas emissões em carbono, alicerçando a eletrificação em solar fotovoltaico, eólico *onshore* e *offshore*, hídrico e algumas centrais de solar térmico concentrado [2].

O PNEC 2030 é o principal instrumento nacional de política energética e climática até 2030, em articulação com o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050. A sua concretização permitirá a Portugal assumir o compromisso da transição energética, com o objetivo de reduzir as suas emissões de GEE [3].

Para que os objetivos da agenda 2030 sejam atingidos a nível global, tem de ocorrer uma mudança fundamental nas práticas utilizadas para a gestão dos recursos. Os países têm de partilhar informação, bem como alinhar as políticas industriais e de comércio de acordo com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). O sistema financeiro deve adotar, como primeira responsabilidade, o bem-estar global e reger-se pelos "Equator Principles"¹ que visam incluir nas suas análises a gestão responsável dos riscos ambientais e sociais.

O paradigma de mudança do setor energético nacional, consubstanciado nas metas do PNEC 2030, encerra desafios de natureza económica e operacional para os diversos atores envolvidos, o que implicará um esforço da sociedade para assegurar a redução dos GEE entre 45% e 55% até 2030 (com referência a 2005) e a incorporação de 47% de energia de fontes de origem renovável no consumo final bruto de energia.

Pese embora o cariz renovável das novas centrais de produção, o seu impacto no meio ambiente não é

negligenciável. Neste estudo revela-se a importância de se realizar a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para cada tecnologia que integra o plano de investimentos nacional. Neste sentido, a metodologia de ACV é usada com o objetivo de aferir o desempenho ambiental das principais tecnologias de origem renovável preconizadas no PNEC para alavancar a independência energética e a neutralidade carbónica do setor energético português. Com base no roteiro elaborado para a matriz energética para 2030, são quantificados os principais impactos e benefícios ambientais das tecnologias eólica *onshore*, solar fotovoltaica, solar concentrado e hidroelétrica, nas categorias de impacto no aquecimento global, uso de recursos fósseis e minerais, uso do solo e consumo de água.

Embora existam já estratégias viáveis de mitigação de alguns impactos, tais como uma adequada articulação entre a atividade agrícola e a implantação de centrais fotovoltaicas, a quantificação do impacto destas estratégias de mitigação está igualmente fora do âmbito deste estudo. Deste modo, estratégias como a valorização dos resíduos, economia circular, ou outras que permitam a minimização destes impactos, não foram avaliadas.

A ACV possibilita a identificação das potenciais consequências da estratégia delineada para 2030, permitindo no futuro, incluir estes dados no processo de tomada de decisão quanto à prevenção da poluição e à otimização de utilização de recursos para o horizonte 2050.

- O PNEC 2030 ambiciona o reforço da produção energética através de fontes de origem renovável em 47%

- A análise do ciclo de vida é um instrumento importante para a avaliação e quantificação dos impactos ambientais de cada tecnologia.

¹ Uma diretiva de gestão de risco usada para avaliar o risco social e ambiental de projetos financeiros

METODOLOGIA

A ACV, normalizada pela ISO 14040 e 14044, é uma metodologia para a quantificação de potenciais impactos ambientais de sistemas (produto, processo, serviços, etc.) ao longo do seu ciclo de vida, ou de parte deste [4]. No presente estudo, primeiramente, analisou-se o desempenho ambiental das tecnologias eólica *onshore*, solar fotovoltaica, solar concentrado e hidroelétrica por comparação ao gás natural na tecnologia ciclo combinado (CCGT), que constituiu o cenário de referência, para a produção de 1 MWh de eletricidade. Por último, foram avaliadas as variações dos impactos resultantes da penetração das fontes de origem renovável preconizadas no PNEC 2030 [2], face à matriz energética de 2020 (Tabela 2).

Quantificação dos impactos

As categorias de impacto ambiental em análise foram as indicadas na Tabela 1. Apresenta-se também, para além das unidades de cálculo de cada categoria, a forma como os impactos ambientais foram quantificados em ciclo de vida, isto é, impactos desagregados por etapa - Construção, Operação e Desmantelamento - ou total de impacto do ciclo de vida.

Tabela 1| Categorias de impacto em estudo.

Categoria de Impacto	Unidade	Ciclo de Vida
Aquecimento global	kg CO ₂ eq.	Por etapa do ciclo de vida (construção, operação, desmantelamento) ¹
Uso de recursos fósseis	kg petróleo eq.	
Uso de recursos minerais	kg Cu eq.	
Uso do solo	m ² × ano solo agrícola eq.	Total do ciclo de vida ²
Consumo de água	m ³ água eq. consumida	

¹ Exceto para a categoria de uso de recursos minerais da tecnologia de Solar Concentrado

² A etapa de desmantelamento não é considerada na tecnologia gás natural

A quantificação dos impactos ambientais foi efetuada com base numa combinação de resultados dos seguintes estudos.

i) Kabayo et al. (2019) [5]

Este estudo é contextualizado para o cenário nacional e quantifica os impactos, na fase de produção e nas fases de construção e desmantelamento, em conjunto para as várias tecnologias, com exceção do solar concentrado. O uso do solo e consumo de água não são contemplados neste estudo.

ii) Heath e Turchi (2011) [6]

A tecnologia de solar concentrado é abordada através deste estudo, em que os impactos da tecnologia são quantificados, com exceção de uso do solo, consumo de água e recursos minerais.

iii) Šerešová et al. (2020) [7]

A desagregação dos impactos nas fases de construção e desmantelamento do estudo de Kabayo et al. é feita

através deste artigo, onde são apresentados os impactos nessas fases de ciclo de vida das tecnologias em estudo, mas para o contexto na República Checa. Assim, são assumidas as mesmas proporções de impactos ao longo das fases de ciclo de vida e extrapolados para o total em Kabayo et al.

iv) Ecoinvent [8], ReCiPe [9], SimaPro

Para as limitações identificadas, nomeadamente, os impactos das várias tecnologias no uso do solo e consumo da água, foi utilizada a base de dados ecoinvent, delimitada para o contexto nacional, o método ReCiPe, e o software SimaPro. Por forma a avaliar o uso de recursos minerais, as unidades de impacto dos vários estudos foram normalizadas para kg Fe_{eq}.

Cenário de referência

O cenário de referência foi caracterizado pela matriz energética de 2020. Todavia, não foi considerado o carvão neste estudo, uma vez que a última central a carvão a operar foi desativada em 2021.

Este estudo não contempla o contributo da eletricidade importada, nem o impacto das respetivas fontes de produção. Com o propósito de estimar os impactos da matriz energética preconizada no PNEC 2030, foi utilizada a potência e geração correspondente a 2020, extrapolando linearmente para as potências a serem instaladas até 2030. De acordo com os dados publicados pela Direção Geral de Energia Geologia [10]–[12], a matriz energética de 2020 apresentava os seguintes valores:

Tabela 2| Matriz energética em 2020

Tecnologia	MW	GWh
Gás natural	5021	17599
Hídrica	7129	13633
Eólica	5502	12299
Fotovoltaica	1076	1691
Solar concentrado	0	0

Assumindo uma extrapolação linear, tendo como referência os valores de produção de 2020, para a potência instalada considerada no PNEC 2030, obtiveram-se os valores indicados na Tabela 3. Uma vez que o solar concentrado contemplava a matriz energética de produção nacional de 2020, foi considerado o fator de capacidade da central de produção solar térmica em Almería (Espanha), de modo a estimar a produção expetável para os 300 MW preconizados no PNEC 2030 [13].

Tabela 3| Matriz energética prevista em 2030

Tecnologia	MW	GWh
Gás natural	3800	13319
Hídrica	8200	15681
Eólica	9000	20118
Fotovoltaica	9000	14144
Solar concentrado [13]	300	696

DESAFIO



Quantificar os impactos ambientais das renováveis no âmbito das metas do PNEC 2030



Identificação e quantificação de categorias de impacto ambiental nas diferentes etapas do ciclo de vida das tecnologias renováveis estabelecidas como prioritárias no PNEC 2030.

SOLUÇÃO



Implementar ACV em tecnologias renováveis



Avaliação do ciclo de vida (construção, operação e desmantelamento) das fontes renováveis: solar fotovoltaico e concentrado, hídrica e eólica *onshore* em comparação com a produção fóssil – gás natural.

RESULTADOS

Esta seção analisa os resultados da ACV aplicados às várias tecnologias de produção de electricidade, considerando os impactos definidos, que são, primeiramente, apresentados com uma normalização por MWh, sendo posteriormente extrapolados para a matriz energética de 2030.

Impactos totais

A análise dos impactos totais relativos ao longo do ciclo de vida de cada tecnologia permite obter uma visão geral da contribuição de cada uma para cada categoria de impacto, cujos resultados são apresentados na Figura 1.

É de notar que, uma vez que não foi possível fazer a desagregação dos impactos para uso do solo e consumo de água pelas três etapas de ciclo de vida (Construção, Operação e Desmantelamento), estes indicadores não foram analisados nos subcapítulos seguintes.

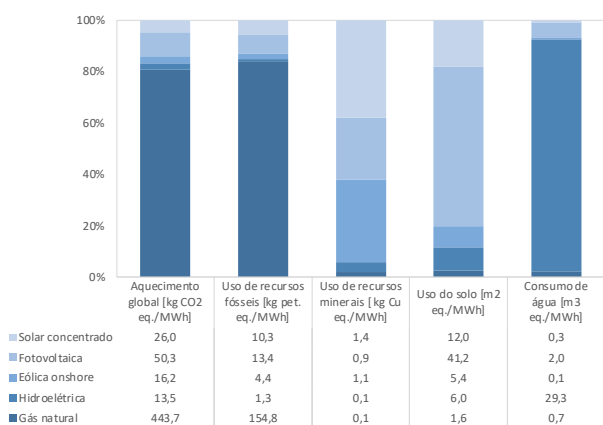


Figura 1| Impactos totais das várias tecnologias de produção

Pela observação da Figura 1, pode verificar-se que a tecnologia solar fotovoltaica revela um impacto maior em termos de uso do solo arável (associado à etapa de Operação), correspondendo a um impacto de 41,2m²/MWh. A segunda tecnologia com maior impacto no uso de solo é o solar concentrado com 12,0m²/MWh. Como referido anteriormente, não são quantificadas estratégias de mitigação de impactos tais como a combinação de explorações agrícolas com a instalação de centrais fotovoltaicas, o que fará com que

o potencial impacto desta tecnologia no uso do solo decresça significativamente.

No consumo de água, ao longo de todo o ciclo de vida, a tecnologia com maior impacto é a hidroelétrica, superando largamente as restantes tecnologias. Importa realçar que as centrais hidroelétricas, durante a fase de operação, permitem transformar a força da água em energia elétrica, sendo, portanto, um uso de água sem contaminação e não um consumo efetivo de água. O gás natural, o solar concentrado e a eólica *onshore* são as tecnologias com menor impacto no consumo de água.

Tendo em consideração o potencial de aquecimento global e ao uso de recursos fósseis, o gás natural é a tecnologia com maior impacto.

Na categoria de uso de recursos minerais, entre as tecnologias comparadas, o solar concentrado é aquele que apresenta maior impacto, com 1,4 kg de cobre equivalente por MWh produzido (kg Cu_{eq}/MWh), devido, essencialmente, à utilização de nitratos minerados no sistema de armazenamento térmico. Novas tecnologias de CSP utilizam sais sintéticos em vez de minerados, o que diminui o seu impacto consideravelmente.

Gás natural

i) Introdução

O gás natural é analisado como sendo o cenário de referência base fóssil. Este vetor energético representa, em Portugal, um volume de energia veiculado, essencialmente, para a geração elétrica em centrais de ciclo combinado e redes de distribuição. As centrais de ciclo combinado constituem uma parcela muito relevante da potência firme no sistema electroprodutor, complementado a produção renovável variável.

Portugal registava, em 2020, uma potência instalada 4,6 GW, tendo sido responsável por 17,6 TWh de electricidade gerada nesse ano [14]. Note-se que, da potência instalada, 3,8 GW referem-se a centrais de ciclo combinado (Lares, Pego, Ribatejo e Tapada do Outeiro) e as restantes unidades são cogerações descentralizadas pelo Sistema Nacional de Gás.

ii) Impactos de cada ciclo de vida por unidade de produção

Analisando o peso dos impactos do potencial de aquecimento global e de uso de recursos fósseis, por etapas do ciclo de vida, nota-se que a etapa mais significativa é a de Operação – 443,4 kg CO_{2eq}/MWh e 154,7 kg de petróleo equivalente por MWh produzido (kgep/MWh) – sendo a etapa de Construção e Desmantelamento meramente residuais.

O uso de recursos minerais é uma categoria de impacto com pouca relevância para esta tecnologia, tendo apenas expressão durante a etapa de Construção com um impacto de 0,1 kg Cu_{eq}/MWh.

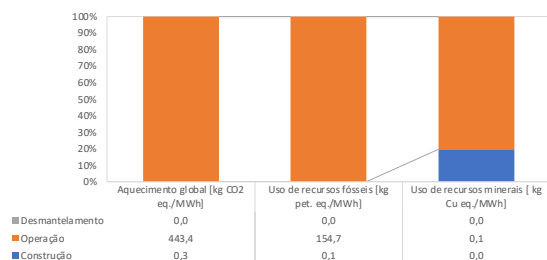


Figura 2| ACV por MWh produzido da tecnologia de gás natural²

iii) Extrapolação dos impactos para a matriz energética de 2020 e 2030

Havendo uma previsão de redução de 5 GW para 3,8 GW entre 2020 e 2030, prevê-se que o impacto de aquecimento global desça de 7,9 Mton CO_{2eq}. para 5,9 Mton CO_{2eq}., e o uso de recursos fósseis reduza de 2,7 toneladas equivalentes de petróleo (tep) para 2,0 tep. Por outro lado, o impacto no uso de recursos minerais mitigar-se-á de 1,2 kg Cu_{eq}. para 0,9 kg Cu_{eq}.

Tabela 4| Extrapolação dos impactos totais da tecnologia a gás natural para 2020 e 2030

Categoria de impacto	Potencial de aquecimento global [kton CO _{2eq} .]	Uso de recursos fósseis [kgep.]	Uso de recursos minerais [ton Cu _{eq} .]
Total em 2020	7807,9	2724,6	1,2
Total em 2030	5909,2	2062,0	0,9

Hídrica

i) Introdução

Do total da potência instalada de fontes de origem renovável no final de 2020, 49% (7129 MW) correspondia a hídrica [11], com uma perspectiva de aumento de 1 GW no horizonte 2030.

De acordo com os objetivos traçados pelo PNEC 2030, o reforço do aproveitamento do potencial hidroelétrico nacional será concretizado através da conclusão da construção do complexo hidroelétrico do Alto Tâmega, constituído por três aproveitamentos hidroelétricos — Gouvães, Alto Tâmega e Daivões — que, no seu conjunto, representam uma potência de 1158 MW e uma capacidade de bombagem de 880 MW, que contribuirá igualmente para melhorar a segurança do

abastecimento por via do seu potencial de armazenamento energético.

ii) Impactos de cada ciclo de vida por unidade de produção

As etapas de Construção e Operação são as que apresentam maior impacto relacionado com o potencial de aquecimento global, sendo a etapa de Construção a única responsável por impactos no uso de recursos fósseis e minerais. Comparando com a tecnologia de referência fóssil, o gás natural, a hídrica apresenta impactos muito inferiores na etapa de Operação, correspondendo a 6,4 kg CO_{2eq}/MWh, cerca de 1,5% do impacto do gás natural. Em relação aos recursos fósseis, apenas a etapa de Construção apresenta um potencial impacto (de 1,3 kgep/MWh), o que corresponde a 0,8% do impacto total de uso de recursos fósseis do gás natural. Já nos recursos minerais, o impacto total é idêntico em ambas as tecnologias (0,1 kg Cu_{eq}/MWh).

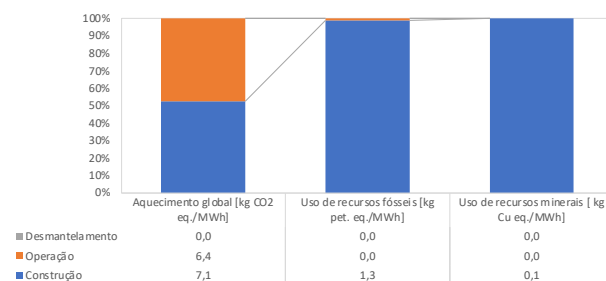


Figura 3| ACV por MWh produzido da tecnologia hídrica

iii) Extrapolação dos impactos para a matriz energética de 2020 e 2030

Uma vez que as perspectivas para 2030 são de aumento de 7,1 para 8,2 GW de potência instalada, também os seus impactos irão aumentar. Assim, o potencial de aquecimento global aumentará de 184 kton CO_{2eq}. para 212 kton CO_{2eq}., e, o uso de recursos fósseis, de 17,4 para 20 kgep. Os impactos no uso de minerais irão aumentar de 1,9 para 2,2 ton Cu_{eq}. entre 2020 e 2030.

Tabela 5| Extrapolação dos impactos totais da tecnologia hídrica para 2020 e 2030

Categoria de impacto	Potencial de aquecimento global [kton CO _{2eq} .]	Uso de recursos fósseis [kgep.]	Uso de recursos minerais [ton Cu _{eq} .]
Total em 2020	183,9	17,4	1,9
Total em 2030	211,5	20,0	2,2

Eólica Onshore

i) Introdução

Da capacidade instalada em 2020, 65 % corresponde a fontes de origem renovável (14609 MW), representando a eólica 25% (5502 MW) [11]. A perspectiva de evolução da capacidade instalada para a

² Apesar de os valores representados como nulos não serem rigorosamente iguais a zero, são de facto desprezáveis face aos restantes.

produção de eletricidade por eólica *onshore* em Portugal, no horizonte 2030, corresponde a 9 GW.

O país dispõe ainda de um significativo potencial eólico por explorar, não descurando os atuais parques eólicos, uma vez que existem estratégias de reforço dos parques existentes, aproveitando a infraestrutura montada, aumentando a sua potência instalada sem custos marginais elevados. Para o efeito, a estratégia para reforçar a eólica *onshore* passará pelo sobre-equipamento e pelo reforço de potência, criando as necessárias condições para a viabilização destas opções, o que oferece condições para esta tecnologia se tornar mais competitiva (PNEC, 2030).

ii) Impactos de cada ciclo de vida por unidade de produção

Embora o propósito dos parques eólicos seja geração de energia elétrica através de recurso renovável, isso não implica que essa transformação ocorra sem impactos negativos no ambiente, à semelhança do que ocorre nas centrais convencionais. Como se pode observar na Figura 4, uma parte significativa dos impactos ambientais da eólica *onshore* estão associados à etapa de Construção, correspondente a aproximadamente 15,1 kgCO_{2eq.} por MWh produzido. Isto deve-se à energia e materiais requeridos durante a construção, incluindo a extração de matérias-primas e o transporte destas até ao local da instalação. Contudo, os impactos reduzem significativamente nas etapas posteriores, nomeadamente na Operação e Desmantelamento, que apresentam parcelas muito inferiores, sendo que a etapa de Operação apresenta valores mínimos.

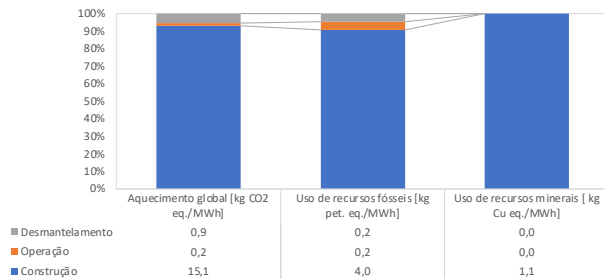


Figura 4| ACV por MWh produzido da tecnologia eólica *onshore*

Esta tecnologia apresenta impactos superiores em relação à tecnologia de gás natural na fase de Construção, nomeadamente 15,1 tonCO_{2eq.} em comparação com 0,3 tonCO_{2eq.} e 4,0 kgep em comparação com 0,1 kgep do gás natural por cada MWh produzido. Contudo, na etapa de Operação, a tecnologia de produção a gás natural apresenta impactos significativamente superiores à tecnologia de eólica *onshore*, nomeadamente 443,4 tonCO_{2eq.} em comparação com 0,2 tonCO_{2eq.} e 154,7 kgep em comparação com 0,2 kgep da eólica *onshore* por cada MWh produzido.

iii) Extrapolação dos impactos para a matriz energética de 2020 e 2030

Considerando a evolução da capacidade instalada desta tecnologia de acordo com o PNEC, em 2030, a Eólica *onshore* corresponderá a 9 GW, o que se traduz em impactos totais de 325,6 kton CO_{2eq.}, 88,9 kgep e 23,1 ton Cu_{eq.}

Tabela 6| Extrapolação dos impactos totais da tecnologia eólica *onshore* para 2020 e 2030

Categoria de impacto	Potencial de aquecimento global [kton CO _{2eq.}]	Uso de recursos fósseis[kgep.]	Uso de recursos minerais [ton Cu _{eq.}]
Total em 2020	199,1	54,3	14,1
Total em 2030	325,6	88,9	23,1

O previsto aumento da capacidade instalada de eólica de 9 GW para mais de 20 GW em 2030 irá provocar um aumento dos respetivos impactos, embora a uma taxa inferior à taxa de crescimento da capacidade instalada. De facto, o potencial de aquecimento global irá subir de 199 kton CO_{2eq.} para 326 kton CO_{2eq.}, o uso de recursos fósseis aumentará de 54,3 para 88,9 kg_{ep} e os impactos no uso de minerais irão subir de 14.1 para 23.1 ton Cu_{eq.} entre 2020 e 2030.

Solar Fotovoltaica

i) Introdução

A redução muito significativa dos custos e o extraordinário potencial de Portugal para o aproveitamento do sol, enquanto fonte para a produção de eletricidade, fazem com que esta tecnologia desempenhe um papel estratégico para o cumprimento dos objetivos do PNEC 2030. As duas principais ferramentas a ser usadas para acelerar o desenvolvimento da capacidade solar em Portugal serão: (i) leilões para atribuição de capacidade de injeção na rede; e (ii) possibilidade de promotores desenvolverem, juntamente com o operador da rede, reforços de rede nas situações em que não haja capacidade de receção (idealmente para projetos de grandes dimensões)[2]. O PNEC 2030 pretende aumentar a capacidade das centrais solares fotovoltaicas instaladas em Portugal de 1,1 GW para 9 GW.

ii) Impactos de cada ciclo de vida por unidade de produção

Os impactos da tecnologia fotovoltaica nas diferentes etapas do ciclo de vida são apresentados na Figura 5.

Verifica-se que a etapa com maior impacto é a Construção, onde o potencial de aquecimento global é de 48kg CO_{2eq.}/MWh, sendo o uso de recursos fósseis de 12,8 kgep/MWh e o uso de recursos minerais de 0,9 kg Cu_{eq.}/MWh.

O impacto do potencial de aquecimento global e uso de recursos fósseis é consideravelmente inferior

comparativamente ao da tecnologia fóssil de referência, o gás natural, correspondendo a 9,5% e 8,7% dos seus impactos, respetivamente. Já o uso de recursos minerais apresenta um impacto 9 vezes superior na tecnologia fotovoltaica quando comparada com a tecnologia de gás natural.

A etapa de Operação praticamente não apresenta impactos, uma vez que se trata de uma tecnologia que exige pouca manutenção, e o Desmantelamento tem apenas um impacto ligeiro no potencial de aquecimento global e no uso de recursos fósseis.

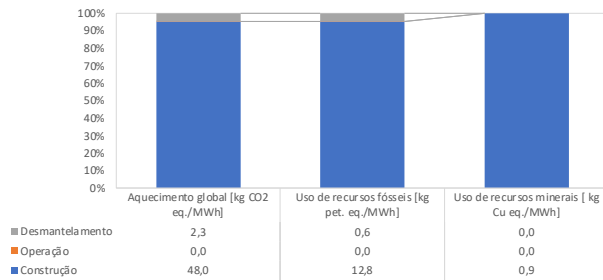


Figura 5| ACV por MWh produzido da tecnologia fotovoltaica

iii) Extrapolação dos impactos para a matriz energética de 2020 e 2030

Em 2020, a tecnologia fotovoltaica foi responsável por uma produção de quase 1,7 TWh. A nível do ciclo de vida, foi responsável por um potencial de aquecimento global de mais de 86 kg CO_{2eq.} e quase 23 kgep de uso de recursos fósseis. O impacto no uso de recursos minerais foi de 1,5 kg Cu_{eq.}

Tabela 7| Extrapolação dos impactos totais da tecnologia solar fotovoltaica para 2020 e 2030

Categoria de impacto	Potencial de aquecimento global [kton CO _{2eq.}]	Uso de recursos fósseis [kgep.]	Uso de recursos minerais [ton Cu _{eq.}]
Total em 2020	85,1	22,6	1,5
Total em 2030	711,7	189,1	12,2

Solar Concentrado

i) Introdução

As tecnologias de concentração de energia solar utilizam a radiação solar para aquecer um fluido que pode ser conservado num sistema de armazenamento de energia térmica para uso posterior ou utilizado num ciclo termodinâmico para produção de eletricidade. O PNEC 2030 contempla a promoção de projetos-piloto com base nas tecnologias de Solar Térmico Concentrado, enquanto tecnologia que permite o armazenamento de energia, estando prevista a instalação de 300 MW na próxima década.

ii) Impactos de cada ciclo de vida por unidade de produção

Comparativamente ao cenário de referência, o gás natural, o solar concentrado apresenta uma redução

significativa do potencial de aquecimento global (27 kg CO_{2eq.}/MWh). A etapa de Construção é a responsável pelo maior impacto, sendo a produção do sistema de espelhos parabólicos, do fluido de transmissão térmica e dos sais utilizados no sistema de armazenamento os principais contribuintes para um impacto de 14.8 kg CO_{2eq.}/MWh [15]. De salientar que a utilização de sais sintéticos, em alternativa a sais minerados, tem um impacto positivo de 52 % no potencial de aquecimento global durante a etapa de Construção [15]. Durante a Operação, o potencial de aquecimento global é de 11 kg CO_{2eq.}/MWh, devido, essencialmente, à necessidade de utilizar energia da rede elétrica para satisfazer consumos de sistemas auxiliares quando a central não está a produzir energia térmica. O potencial de aquecimento global durante a Operação revela-se bastante dependente da matriz energética da rede elétrica da região onde a unidade é instalada. No uso de recursos fósseis, a tecnologia de solar concentrado apresenta valores consideravelmente mais baixos que o cenário base (gás natural).

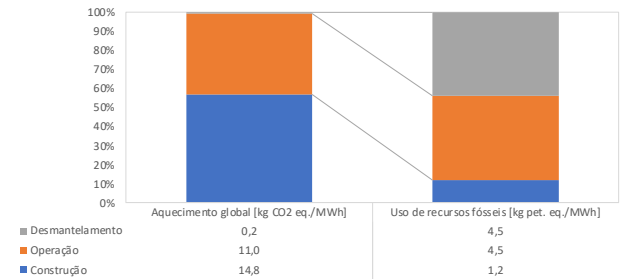


Figura 6| ACV por MWh produzido da tecnologia solar concentrada

iii) Extrapolação dos impactos para a matriz energética de 2020 e 2030

Atualmente não existe em Portugal nenhuma central de produção de eletricidade utilizando a tecnologia de solar concentrado. Apesar de, no passado, se ter tentado promover este tipo de projetos de carácter experimental, nenhum avançou por falta de viabilidade económica, tendo transitado para projetos de solar fotovoltaico. Contudo, se os objetivos do PNEC 2030 forem alcançados, os impactos totais são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8| Extrapolação dos impactos totais da tecnologia solar fotovoltaica para 2020 e 2030

Categoria de impacto	Potencial de aquecimento global [kton CO _{2eq.}]	Uso de recursos fósseis [kgep.]	Uso de recursos minerais [ton Cu _{eq.}]
Total em 2020	85,1	0,0	0,0
Total em 2030	711,7	81,5	10,8

ANÁLISE ESTRATÉGICA

A integração de fontes renováveis de produção no sistema elétrico nacional apresenta um conjunto de vantagens estratégicas, ao nível da segurança de abastecimento e da independência energética, bem como ao nível da descarbonização do setor energético. Os objetivos traçados no PNEC 2030 estão alinhados com este enquadramento estratégico, reforçando a penetração das fontes de origem renovável em detrimento das fontes convencionais, de origem fóssil. O presente estudo permite concluir que, durante a etapa de Operação, as tecnologias de origem renovável apresentam impactos consideravelmente inferiores ao nível do potencial de aquecimento global e de uso de recursos fósseis, quando comparadas com a tecnologia de gás natural. Na Figura 7 apresentam-se os valores de impacto totais da matriz energética de 2020 e de 2030, das cinco categorias de impacto em análise. Na Figura 8 são apresentados os valores de impactos ambientais para o cenário de referência – a matriz energética de 2020 – e o cenário extrapolado para a matriz energética de 2030, utilizando unidades equivalentes com o intuito de facilitar a interpretação e comunicação dos resultados.

Pela análise da Figura 7, verifica-se que a projeção efetuada para a matriz energética 2030 evidencia um decréscimo de 14% e 16% respetivamente para o potencial de aquecimento global e uso de recursos fósseis. No entanto, ao nível do uso de recursos minerais, do uso do solo e consumo de água, o acréscimo de fontes de origem renovável em 2030 provoca um aumento de impactos na ordem de 105% (predominante da eólica, e do solar fotovoltaico e concentrado), 227 % (predominante do solar fotovoltaico) e 20% (predominante da hídrica), respetivamente. O impacto no consumo da água não sofre um aumento tão significativo como as outras duas categorias, pois é maioritariamente originado pela hídrica, que não é a tecnologia com maior crescimento planeado no PNEC 2030 (apenas um aproveitamento hidroelétrico). Já o uso de recursos minerais é sobretudo afetado pela eólica *onshore*, pelo solar concentrado e pela fotovoltaica. Estes impactos requerem uma atenção mais profunda, visto que tanto o solar fotovoltaico como a eólica são tecnologias que se preveem predominantes nas próximas décadas e os impactos associados à fase de construção, com relevância para a extração das matérias-primas para a sua construção, são, portanto, significativos.

As matérias-primas necessárias para a construção destas tecnologias são sobretudo importadas, pelo que apresentam uma componente associada ao respetivo transporte, o que aumenta o impacto. É imperioso aplicar medidas de economia circular, nomeadamente soluções tecnológicas que permitam a recuperação destes minerais no fim de vida dos ativos, que devem ser aprimoradas e largamente implementadas, para garantir a sustentabilidade destas tecnologias, face à potencial escassez destas matérias-primas ou à alteração de políticas de importação, que se possam observar. Relativamente ao uso do solo, a tecnologia mais impactante é a fotovoltaica, pelo que a instalação de grandes parques solares deve ser priorizada em localizações em que o uso do solo não compete com outros tipos de utilização (ex.: agrícola e agroflorestal) e privilegiar a sua instalação no edificado, embora seja necessário considerar a sua localização em pontos geográficos concordantes com as necessidades elétricas locais e com as necessidades da rede elétrica.

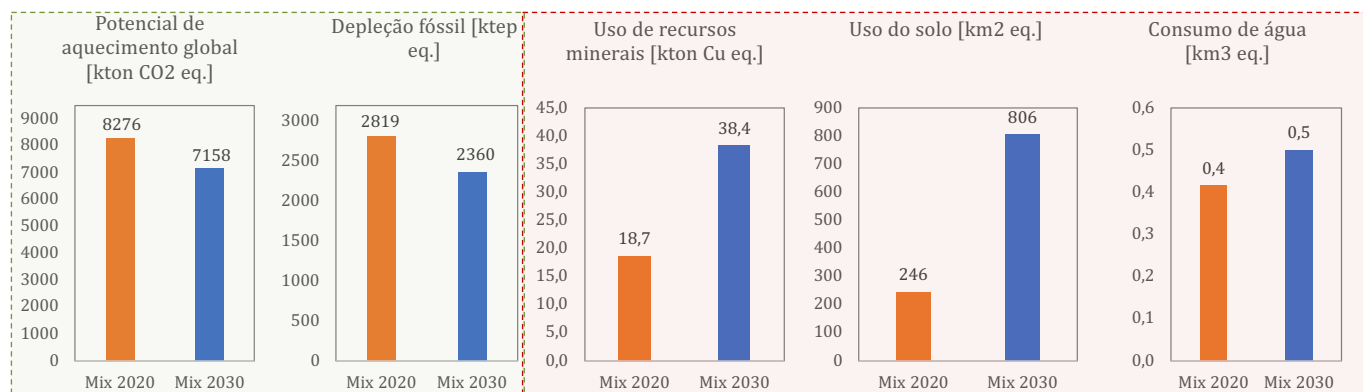


Figura 7 | Impactos totais para a matriz energética de 2020 e 2030

Utilizando indicadores de perceção geral com grandezas equivalentes, os impactos positivos correspondem às emissões evitadas de 1,7 milhões de carros conduzidos anualmente e da extração de 18 milhões de barris de petróleo. No entanto, os seus impactos negativos podem ser comparados com 9 megatoneladas de solo extraído de minas, com o equivalente a 500 mil piscinas cheias com água doce, e 538 km² de terreno agrícola ocupado, o que é equivalente à área do concelho de Santarém.

“

A sustentabilidade alicerça-se na responsabilidade.

- Teresa Ponce de Leão, Presidente do Conselho Diretivo do LNEG-

”

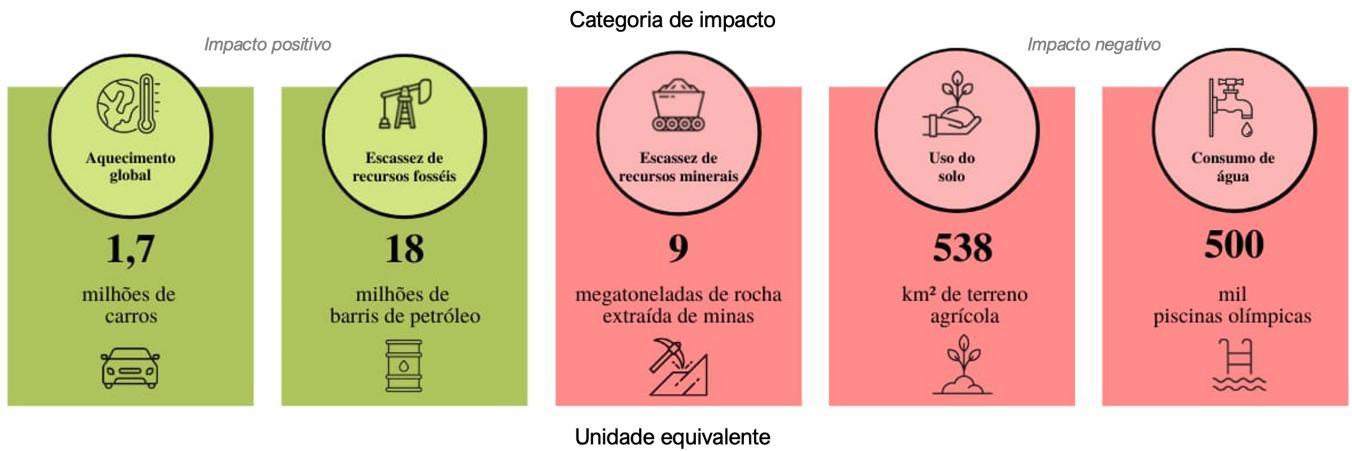


Figura 8| Estimativa de potenciais poupanças ambientais anuais com base nas metas preconizadas no PNEC para a matriz energética nacional em 2030 por comparação ao ano de 2020

Nota:

1 carro viaja em média 20.000 km por ano (4,2 ton CO₂ eq.). Fonte: [16]

1 barril de petróleo tem 5858 MJ de energia primária (1 kg petróleo - 41 MJ). Fonte: [17]

1 kg Cu minerado corresponde a 500 kg de rejeitados. Fonte: [18]

1 piscina olímpica tem 2.500 m³ de água. Fonte: [19]

Conclui-se que, relativamente às diretrizes políticas de clima e de independência energética, o PNEC 2030 promove a neutralidade carbónica e fomenta a independência da base fóssil. No entanto, a inserção em larga escala das tecnologias de origem renovável deve ter em conta a mitigação dos impactos ambientais a nível do uso dos recursos minerais, do uso do solo e do consumo de água. Para estas categorias de impacto apresentam-se 4 possíveis soluções de mitigação de impactos:



Solução 1 – Integração preferencial da produção fotovoltaica no edificado e em terrenos não produtivos. Quando em solo agrícola, deve ser coordenada com plantações compatíveis com o sombreamento ou permitindo entrada de sol nos períodos adequados.



Solução 2 – Hibridização dos sistemas de produção de energia, nomeadamente hídrica e fotovoltaica flutuante, numa simbiose que permita minorar as perdas de água da albufeira por evaporação e aproveitar o espaço disponível e sem outra utilização, para instalação dos painéis fotovoltaicos.



Solução 3 – Estabelecimento de programas de recuperação dos materiais durante a fase de desmantelamento, diminuindo, assim, a dependência externa de matérias-primas. Conceder, paralelamente, apoio a medidas de fiscalização e responsabilidade social para a atividade de extração de minérios, nos vários países com exploração.



Solução 4 – Implementação de estratégias de eficiência energética nas várias etapas do ciclo de vida das tecnologias de fontes renováveis, assim como no lado do consumo.

RECOMENDAÇÕES

As diretrizes que promovem a neutralidade carbónica do setor energético português devem garantir que o desenvolvimento sustentável e, em particular a economia circular, acompanhe a implementação das metas para 2050. Um dos fatores chave identificados foi a importância da quantificação dos impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida das diversas tecnologias de produção elétrica (desde a extração das matérias-primas até ao desmantelamento).

O presente estudo permitiu identificar os impactos ambientais que podem advir das metas estabelecidas no PNEC 2030. Neste sentido, recomenda-se que as políticas estratégicas no setor energético tenham em consideração soluções que minimizem esses impactos, promovendo a utilização racional e eficiente da energia elétrica. Adicionalmente, recomenda-se a análise de outros indicadores de impacto de sustentabilidade – sociais e económicos – permitindo uma quantificação de maior profundidade dos impactos destas tecnologias, agilizando a transição para uma economia efetivamente verde, sustentável e justa.

Por último, é altamente recomendável que as políticas de desenvolvimento energético sejam intersectoriais, elaboradas em articulação com os diversos planos nacionais de desenvolvimento económico, procurando sinergias que permitam alavancar a elaboração de políticas de economia circular, potenciando a sustentabilidade do sistema energético português.

Referências

- [1] Observatório da Energia, DGEG - Direção Geral de Energia e Geologia, and ADENE - Agência para a Energia, “Energia em Números - Edição 2020,” Lisboa, 2020.
- [2] Presidência do Conselho de Ministros, Ed., “Plano Nacional Energia e Clima 2030 (PNEC 2030) - Resolução do Conselho de Ministros n.º 53/2020,” in *Diário da República*, Série I., vol. n.º 133, Diário da República, 2020, pp. 2–158.
- [3] Ministério do Planeamento, “Plano de Recuperação e Resiliência - Recuperar Portugal, Construindo o futuro,” Lisboa, Apr. 2021.
- [4] G. Rebitzer *et al.*, “Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications,” *Environment International*. 2004.
- [5] J. Kabayo, P. Marques, R. Garcia, and F. Freire, “Life-cycle sustainability assessment of key electricity generation systems in Portugal,” *Energy*, vol. 176, pp. 131–142, 2019.
- [6] M. B. Whitaker, G. A. Heath, J. J. Burkhardt, and C. S. Turchi, “Life cycle assessment of a power tower concentrating solar plant and the impacts of key design alternatives,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 47, no. 11, pp. 5896–5903, 2013.
- [7] M. Šerešová, J. Štefanica, M. Vitvarová, K. Zakuciová, P. Wolf, and V. Kočí, “Life cycle performance of various energy sources used in the Czech Republic,” *Energies*, vol. 13, no. 21, 2020.
- [8] Ecoinvent, “Documentation of changes implemented in ecoinvent,” 2020.
- [9] M. Huijbregts *et al.*, “ReCiPe 2016 - A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Report I: Characterization,” 2016.
- [10] Direção-Geral de Energia e Geologia, “Produção anual e potência instalada,” 2020. [Online]. Available: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/energia/eletricidade/producao-anual-e-potencia-instalada/>. [Accessed: 22-Nov-2021].
- [11] Direção-Geral de Energia e Geologia, “Potência Instalada nas Centrais Produtoras de Energia Elétrica (1995-2020),” 15-Oct-2021. [Online]. Available: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/energia/renovaveis/>. [Accessed: 22-Nov-2021].
- [12] Direção-Geral de Energia e Geologia, “Produção de Energia Elétrica a partir de FER (1995-2020),” 2021. [Online]. Available: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/energia/renovaveis/>.
- [13] R. Gómez-Calvet and J. M. Martínez-Duart, “On the Assessment of the 2030 Power sector Transition in Spain,” *Energies*, vol. 12, no. 7, p. 1369, Apr. 2019.
- [14] Redes Energéticas Nacionais (REN), “Dados Técnicos 2020 (Eletricidade e Gás Natural),” Lisboa, Jan. 2021.
- [15] P. A. Garvin Heath, C. S. Turchi, and J. J. Burkhardt III, “Life Cycle Assessment of a Parabolic Trough Concentrating Solar Power Plant and Impacts of Key Design Alternatives: Preprint,” 2011.
- [16] “Calculation Tools | Greenhouse Gas Protocol,” 2011. [Online]. Available: <https://ghgprotocol.org/calculation-tools>. [Accessed: 22-Nov-2021].
- [17] “Convert barrels of oil equivalent to megajoules - energy converter,” 2021. [Online]. Available: <https://www.unitjuggler.com/convert-energy-from-boe-to-MJ.html>. [Accessed: 22-Nov-2021].
- [18] J. Santos, *Recuperação e Reabilitação de Áreas Degradadas pela Mineração*, UAB; SEAD; 2017.
- [19] “Just in Tools, Olympic Size Swimming Pool.” [Online]. Available: <https://www.justintools.com/unit-conversion/volume.php?k1=olympic-size-swimming-pool&k2=cubic-meters>. [Accessed: 22-Nov-2021].

AUTORES

ANA SOUSA

BRUNO HENRIQUE SANTOS

FRANCISCO BOTELHO CARLOS

HENRIQUE POMBEIRO

JOÃO GRAÇA GOMES

MARGARIDA GONÇALVES

MURIEL ITEN

NUNO CARVALHO

AGRADECIMENTOS

Os membros do programa Future Energy Leaders Portugal agradecem a revisão cuidada do relatório realizada pela Professora Teresa Ponce de Leão, Professor Paulo Ferrão e Engenheiro Pedro Amaral Jorge.

Os agradecimentos estendem-se à Professora Teresa Margarido e ao Engenheiro Bento Morais Sarmento.

Sobre a APE – Associação Portuguesa de Energia

A Associação Portuguesa de Energia é uma instituição privada, de utilidade pública, sem fins lucrativos, constituída em 1989 que desenvolve atividade na área da energia sustentável, procurando dinamizar a reflexão e o debate em áreas ligadas à evolução do setor energético e desenvolver ações que reforcem o seu papel na economia e na qualidade de vida em Portugal. A APE assegura a representação nacional no Conselho Mundial de Energia (World Energy Council), tendo como associados as principais empresas e organismos públicos do setor energético, bem como da indústria transformadora e dos serviços. Mais informação disponível em www.apenergia.pt

Sobre o FELPT

O FELPT é uma iniciativa da APE que visa promover o debate sobre questões prementes do setor energético, ajudar a moldar soluções para o futuro do setor no contexto português.

O programa FELPT assenta em ideias criativas com potencial inovador para desafiar o pensamento convencional e explorar novas estratégias para o futuro dos sistemas energéticos, oferecendo aos jovens profissionais uma oportunidade única de aprender, desenvolver competências e participar no debate de questões de energia.

Para mais informação sobre o programa FELPT siga-nos em:



Contactos:

FELPT Board E-mail: felpt@apenergia.pt

Associação Portuguesa de Energia E-mail: geral@apenergia.pt