



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Cátia Marisa Ramos Pinto

CONTRIBUIÇÃO PARA A ANÁLISE DO IMPACTE
AMBIENTAL DAS TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO DE
ENERGIA DAS ONDAS

Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente, na área de Especialização em Território e Cidades Sustentáveis, orientada pelo Professor Doutor José Paulo Pereira de Gouveia Lopes de Almeida e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Setembro de 2022

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Civil

Cátia Marisa Ramos Pinto

CONTRIBUIÇÃO PARA A ANÁLISE DO IMPACTE AMBIENTAL DAS TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS

CONTRIBUTION TO THE ENVIRONMENTAL IMPACT ANALYSIS OF WAVE ENERGY CONVERSION TECHNOLOGIES

Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente, na área de Especialização em Território e Cidades Sustentáveis,
orientada pelo Professor Doutor José Paulo Pereira de Gouveia Lopes de Almeida

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC
declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Setembro de 2022



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

AGRADECIMENTOS

As primeiras palavras de agradecimento vão para o orientador desta dissertação de mestrado, Prof. Doutor José Lopes de Almeida, pelas enriquecedoras sugestões e críticas com que me presenteou ao longo deste trabalho. Pela sua constante presença e empenho e, do que destes gestos o trabalho agora apresentado possa refletir, lhe exprimo cordial gratidão e admiração.

Histórias não se contam sem vivências, por isso quero agradecer a todas as amizades que criei durante o meu percurso académico e todos os momentos incríveis proporcionados. Uma palavra especial aos que estiveram sempre presentes, em situações de alegria e tristeza, pelo companheirismo, apoio, incentivo e compreensão, a vocês dirijo o meu sincero “muito obrigada”, que a nossa amizade só termine no dia em que o Mondego deixar de refletir a Cabra. F-R-A!

Àqueles que sentiram mais as minhas prolongadas ausências, que sempre me refletiram um exemplo de garra, vontade e perseverança, nunca medindo esforços para me apoiar em todas as etapas, exibindo incondicional carinho e conforto quando necessário, acreditando e investindo nos meus sonhos. Aos meus pais e mana, por tudo, para sempre!

Não resisto, em prestar um agradecimento à Universidade de Coimbra, em especial à Faculdade de Ciências e Tecnologia, representada por todos os seus funcionários, que possibilitam a todos os seus estudantes um exímio ensino e que a tornam uma instituição referência no mundo académico.

Limitar os agradecimentos às modestas palavras aqui redigidas nunca será justo. O conhecimento adquirido até esta etapa final, que contribuiu inegavelmente para execução desta dissertação, contou com a construtiva contribuição de uma vasta gama de pessoas e fatores. A tudo e todos, obrigada!

RESUMO

A situação de emergência climática global tem suscitado a necessidade de estabelecer estratégias para viabilizar uma trajetória sustentável e irreversível de redução das emissões de gases de efeito de estufa. Promover respostas efetivas à problemática das alterações climáticas passa, inegavelmente, pelo aproveitamento das energias de fonte renovável e a sua integração no sistema energético nacional. A energia elétrica renovável marinha, nomeadamente, a energia das ondas, tem-se destacado nestas estratégias pelo seu forte potencial, ainda inexplorado, de contribuir proativamente para uma economia sustentável.

A investigação, idealização e desenvolvimento de conversores de energia das ondas ganhou expressão essencialmente a partir da década de 70 do século passado e, desde então, não mais parou até aos nossos dias. Uma fase determinante do seu processo de desenvolvimento consiste na avaliação do impacto ambiental das soluções propostas. Para isso, é essencial conhecer os materiais, equipamentos e processos envolvidos na sua produção, manutenção e exploração, bem como, o modo de funcionamento dos conversores de energia das ondas e sua interação com o ambiente envolvente. A natureza de muitos destes fatores depende do tipo e grau de maturidade das tecnologias subjacentes às soluções propostas, bem como das características biológicas (fauna e flora) e sedimentares do local de instalação.

A presente dissertação teve como objetivo sintetizar os potenciais impactos ambientais das tecnologias mais relevantes de aproveitamento de energia das ondas. A análise prospetiva, para organização da informação recolhida e comparação das tecnologias de conversão de energia das ondas, foi realizada através de matrizes de impacto.

A revisão da bibliografia sobre avaliação de ciclo de vida a conversores de energia das ondas realizada, apurou que a fase do ciclo de vida mais impactante em termos ambientais é a materiais e manufatura do dispositivo. De entre os efeitos ambientais no meio marinho, o ruído subaquático foi o mais frequentemente referido nos trabalhos consultados.

Relativamente à análise prospetiva efetuada, a tecnologia do tipo *Submerged Pressure Differential* foi a que se destacou mais positivamente do ponto de vista ambiental.

Palavras-chave: energias renováveis marinhas; conversores de energia das ondas; avaliação de ciclo de vida; avaliação de impacto ambiental.

ABSTRACT

The global climate emergency situation has raised the need to establish strategies to enable a sustainable and irreversible path to reduce greenhouse gas emissions. Promoting effective responses to the problem of climate change undeniably involves the use of renewable energy sources and their integration into the national energy system. Marine renewable electric energy, namely wave energy, has stood out in these strategies due to its strong potential, still unexplored, to proactively contribute to a sustainable economy.

The research, idealization and development of wave energy converters gained expression essentially from the 70s of the last century and since then has not stopped until today. A decisive phase of the development process consists in the evaluation of the environmental impact of the proposed solutions. For this it is essential to know the materials, equipment and processes involved in their production, maintenance and exploitation, as well as how the wave energy converters work and their interaction with the surrounding environment. The nature of many of these factors depends on the type and maturity degree of the technologies underlying the proposed solutions, as well as the biological (fauna and flora) and sedimentary characteristics of the installation site.

The present dissertation had the objective to synthesize the potential environmental impacts of the most relevant wave energy technologies. The prospective analysis, for organization of the collected information and comparison of wave energy conversion technologies, has been done through impact matrices.

The revision of the bibliography on life cycle assessment of wave energy converters has shown that the phase of the life cycle with the most environmental impact is materials and manufacturing of the device. Among the environmental aspects in the marine environment, the underwater noise was the most frequently mentioned in the consulted works.

In relation to the prospective analysis carried out, the *Submerged Pressure Differential* technology was the one that stood out most positively from the environmental point of view.

Keywords: marine renewable energy; wave energy converters; life cycle assessment; environmental impact assessment.

ÍNDICE

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract.....	iii
Índice	iv
Índice de Figuras	vi
Índice de Quadros	vii
Abreviaturas.....	viii
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Estrutura.....	3
2 Tecnologias de conversão de energia das ondas e seus potenciais impactes no ambiente .4	
2.1 Principais tipos de tecnologias de conversão de energia das ondas	4
2.2 Potenciais impactes ambientais associados a tecnologias de conversão de energia das ondas	8
2.2.1 Ruído subaquático	9
2.2.2 Campos eletromagnéticos emitidos por cabos elétricos submarinos.....	10
2.2.3 Alterações dos habitats bentónicos e pelágicos	13
2.2.4 Alterações dos sistemas oceanográficos.....	15
2.2.5 Encontro dos animais marinhos com o sistema de ancoragem	16
2.2.6 Impactes paisagísticos, sociais e económicos.....	18
3 Instrumentos aplicáveis à avaliação ambiental de tecnologias de conversão de energia das ondas.....	20
3.1 Avaliação de ciclo de vida	20
3.1.1 Processo metodológico de avaliação de ciclo de vida.....	22
3.1.2 Revisão da bibliografia sobre avaliação de ciclo de vida de conversores de energia das ondas	23

3.2	Avaliação de impacto ambiental	29
3.2.1	Processo metodológico de avaliação de impacto ambiental	30
3.2.2	Avaliação de incidências ambientais	33
3.2.3	Enquadramento no caso dos conversores de energia das ondas em Portugal	33
4	Análise do potencial impacto ambiental dos conversores de energia das ondas.....	37
4.1	Descritores e hipóteses base	37
4.2	Apresentação e discussão de resultados.....	40
5	Conclusões e trabalhos futuros.....	43
5.1	Conclusões	43
5.2	Notas e pistas para futuros desenvolvimentos	44
	Referências Bibliográficas.....	45
Anexo A	Informação adicional dos dispositivos com ACV completa.....	A-1
Anexo B	Matriz dos potenciais impactes da tecnologia <i>Point Absorber</i>	B-1
Anexo C	Matriz dos potenciais impactes da tecnologia <i>Oscillating Wave Surge</i>	C-1
Anexo D	Matriz dos potenciais impactes da tecnologia <i>Submerged Pressure Differential</i>	D-1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Tipos de tecnologias de conversão de energia das ondas, considerando a sua localização em relação à linha costeira. [Fonte: Adaptado de (Bald et al., 2010)]	4
Figura 2.2 - <i>Oscillating Water Column</i> [Fonte: (EMEC@, 2012)].....	7
Figura 2.3 - <i>Submerged Pressure Differential</i> [Fonte: (EMEC@, 2012)]	7
Figura 2.4 - <i>Buoy bodies activated by waves</i> [Fonte: (EMEC@, 2012)]	7
Figura 2.5 - <i>Overflowing/Overtopping and/or impact systems</i> [Fonte: (EMEC@, 2012)]	7
Figura 2.6 - <i>Point Absorber</i> [Fonte: (EMEC@, 2012)]	7
Figura 2.7 - <i>Oscillating Wave Surge</i> [Fonte: (EMEC@, 2012)]	7
Figura 2.8 - Ruído antropogénico e sons naturais no ambiente marinho. [Fonte: Adaptado de (JPI Oceans, 2022)]	9
Figura 2.9 - Fenómeno de criação de campos elétricos induzidos por cabos submarinos de transmissão direta e alternada. [Fonte: Adaptado de (Copping & Hemery, L.G., 2020)].....	12
Figura 2.10 - Boia de medição de ondas em águas profundas. (a) Equipamento antes da sua instalação em outubro de 2012. (b) Boia após desinstalação em janeiro de 2015, com elevado grau de bioincrustação (<i>Biofouling</i>). [Fonte: (J. Thomson et al., 2015)]	13
Figura 2.11 - Colonização das superfícies submersas de um dispositivo de conversão de energia eólica offshore. Efeito de recife artificial ao longo da coluna de água. [Fonte: Adaptado de (Steven Degraer et al., 2020)].....	14
Figura 2.12 - Esquema de um <i>array</i> de aproveitamento de energia eólica <i>offshore</i> através de plataformas flutuantes. [Fonte: Adaptado de (Maxwell et al., 2022)].....	17
Figura 3.1 - Ciclo de vida de um conversor de energia das ondas. [Fonte: Adaptado de (Zhai et al., 2021)].....	21
Figura 3.2 - Fases da ACV de acordo com a ISO 14040. [Fonte: Adaptado de (Apolonia & Simas, 2021; Walter Klöpffer, 2014)]	22
Figura 3.3 - Processo metodológico de AIA para o quadro legal nacional. [Fonte: Adaptado de (CCDR-LVT@, 2022)]	30

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 - Análise do estado da arte da avaliação de ciclo de vida a conversores de energia das ondas.	28
Quadro 3.2 - Tipologia de projeto 3.a) constante no anexo II do RJAIA e respetivos limiares. [Fonte: Transcrito do Decreto-Lei n. °152-B/2017 de 11 de dezembro].....	34
Quadro 3.3 –Tipologias de projeto constante no anexo I e II do RJAIA e respetivos limiares. [Fonte: Transcrito do Decreto-Lei n. °152-B/2017 de 11 de dezembro].....	34
Quadro 4.1 - Predição dos potenciais aspetos ambientais	38
Quadro 4.2 - Critério de classificação do potenciais impactes	39
Quadro 4.3 - Resultado da análise realizada às três tecnologias	40

ABREVIATURAS

ACV: Avaliação de ciclo de vida

AIA: Avaliação de impacto ambiental

AIncA: Avaliação de incidências ambientais

APA: Agência Portuguesa do Ambiente

CCDR: Comissões de coordenação e desenvolvimento regional

CE: Comissão Europeia

CEM: Campos eletromagnéticos

CEO: Conversor de energia das ondas

CES: Cabo elétrico submarino

CPT: Carbon payback time

DIA: Declaração de impacto ambiental

EIA: Estudo de impacto ambiental

EIncA: Estudo de incidências ambientais

EMEC: European Marine Energy Centre

EPT: Energy payback time

GEE: Gases com efeito estufa

OWS: Oscillating Wave Surge converter

PA: Point Absorber converter

PDA: Proposta de definição de âmbito

RECAPE: Relatório de conformidade ambiental do projeto de execução

RJAIA: Regime jurídico da avaliação de impacto ambiental

SPS: Submerged Pressure Differential converter

UE: União Europeia

ZEE: Zona económica exclusiva

ZPP: Zona Piloto Portuguesa

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

As alterações climáticas e a poluição ambiental são dos maiores desafios do século XXI. A energia utilizada para sustentar as atividades diárias da população mundial contribui com três quartos das emissões globais de gases com efeito estufa (Akar & Akdoğan, 2016). Esta avultada contribuição, por parte do setor energético, deve-se à dominante utilização dos combustíveis fósseis, *e.g.* o carvão, o gás natural e o petróleo. Segundo o relatório global sobre o estado das energias renováveis, da REN (REN21, 2021), a energia total final consumida em 2018, proveio 79,9% de combustíveis fósseis, 11% de energias renováveis modernas, 6,9% de biomassa tradicional e 2,2% de energia nuclear.

A crise económica global, provocada pela pandemia do Covid-19, criou um impacto significativo no setor energético alterando o panorama de produção, fornecimento e consumo. De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA@, 2020), a procura de energia primária reduziu cerca de 4% em 2020 e as emissões globais de CO₂, relacionadas com a energia, diminuíram 5,8%, tendo este sido o maior declínio percentual desde a Segunda Guerra Mundial. Durante este período, a produção de energia a partir de energias renováveis foi o único combustível que sofreu um aumento de produção (3%). Este aumento foi um dos principais motivos para a redução das emissões do setor energético, apesar da diminuição da procura de eletricidade. Estes dados consolidam a relevância da transição energética global para energias renováveis, em prol da diminuição dos impactos negativos no ambiente.

O lamentável conflito geopolítico entre a Ucrânia e a Rússia veio abalar fortemente as relações internacionais, transformando o alinhamento político, económico e energético do território europeu. A posição russa descortinou um cenário de instabilidade energética na União Europeia (UE), consequência da sua exagerada dependência em recursos externos oriundos deste país. De acordo com as declarações de imprensa da Comissão Europeia (CE), «A UE importa 90% do gás que consome, sendo a Rússia responsável por cerca de 45% dessas importações, cujo nível varia entre os Estados-Membros. A Rússia representa também cerca de 25% das importações de petróleo e 45% das importações de carvão». Em resposta, a CE elaborou um plano estratégico/audacioso, denominado "*REPowerEU*: Ação europeia conjunta para uma energia mais acessível, segura e sustentável", com medidas destinadas a guiar a Europa para a desassociação progressiva dos combustíveis fósseis russos, que terá um horizonte, preferencialmente, anterior a 2030. A curto-prazo, os objetivos governamentais são para a transformação do atual paradigma de consumo de gás, procurando a redução da utilização, a sua substituição nos mais diversos fins e a diversificação do aprovisionamento do mesmo. Esta

nova realidade infortuna veio realçar os inconvenientes e vulnerabilidades da economia baseada em combustíveis fósseis e, paralelamente, fortalecer os argumentos a favor de uma rápida transição energética, com base em fontes renováveis (CE@, 2022).

O Acordo de Paris visa alcançar a descarbonização das economias mundiais, fomentando uma transição sustentável, com vista ao combate às alterações climáticas. Em complemento, a UE adotou um plano ambicioso, para redução das emissões de Gases com Efeito Estufa (GEE) de pelo menos 40% até 2030, em comparação com os níveis de 1990, e a neutralidade carbónica em 2050. Na UE, o desenvolvimento de tecnologias de produção de energias renováveis irá contribuir significativamente para o crescimento económico, postos de trabalho e poupança energética (Ramos et al., 2021).

O crescimento exponencial da população global, o aquecimento global e o esgotamento das reservas energéticas convencionais são fatores que têm estimulado e fomentado o interesse por novas tecnologias em energias renováveis. Nos últimos anos, têm ocorrido desenvolvimentos tecnológicos significativos, particularmente na Europa, no aproveitamento da energia das ondas. Esta fonte apresenta amplas vantagens relativamente às restantes tecnologias renováveis. As ondas são um fenómeno natural, geralmente ininterrupto, como tal, o recurso energético é vasto. De acordo com *Pelc & Fujita (2002)*, «a energia das ondas num determinado local está disponível até 90 % do tempo, enquanto a energia solar e eólica tendem a estar disponíveis apenas 20-30 % do tempo». A elevada precisão da previsão energética e a densidade superior da água do mar em relação à do ar/vento são outras vantagens relevantes (Bahaj, 2011; Chozas, 2013; Cruz, 2008).

A energia das ondas está dividida em duas componentes: a potencial, associada ao deslocamento da superfície livre da água em relação ao nível médio das águas do mar; e a cinética, associada à velocidade das partículas fluídas que participam no movimento ondulatório. O conteúdo energético da agitação marítima é expresso, por norma, em potência média anual por unidade de comprimento de uma linha de fase da onda, por exemplo, por metro de largura de crista de onda, sendo usuais as unidades (W/m ou kW/m, no sistema SI). As estimativas de potência média anual disponível para Portugal indicam valores de cerca de 30 kW/m, fazendo da nossa costa marítima um bom recurso energético, tornando-a centro de interesse para investigação e investimento de dispositivos de aproveitamento de energia das ondas (Falcão, 2020).

De acordo com o EMEC (European Marine Energy Centre), um total de 256 empresas são elencáveis no campo do desenvolvimento de conversores de energia das ondas (CEO) de diversas tipologias (EMEC@, 2020). Face ao surgimento destas tecnologias, surge uma consequente necessidade de analisar os possíveis impactos ambientais que estas poderão

provocar no ambiente marinho durante a instalação, funcionamento e desativação. Contudo, são poucos os estudos de impacto ambiental sobre esta temática, devido à fase preliminar em que se encontram estas tecnologias e à carência de casos de referência. A legislação aplicável a parques de energia das ondas, no âmbito da avaliação de impacto ambiental, é ainda incerta em diversos países.

1.2 Objetivos

Nesta dissertação, propõe-se uma análise dos mais relevantes tipos de conversores de energia das ondas, visando compilar os principais potenciais impactos ambientais, positivos e negativos, a eles associados. Com base neste levantamento, será esboçada uma análise crítica, levando em conta os diversos tipos de conversores de energia das ondas existentes. Os resultados serão sintetizados em matrizes de impacto, organizadas para assim determinar quais as tecnologias de produção de energia das ondas, atualmente em desenvolvimento, que apresentam maior potencial do ponto de vista ambiental.

Nesse âmbito, o presente trabalho tem por objetivo contribuir para a síntese do conhecimento nesta temática e para a análise crítica das mais significativas tecnologias em jogo, para as quais se disponha de suficiente informação.

1.3 Estrutura

O presente capítulo introdutório (Capítulo 1) expõe o contexto em que se insere esta dissertação, onde é evidenciada a problemática e a consequente importância da investigação ambiental sobre conversores de energia das ondas.

De seguida, no Capítulo 2, são apresentadas previamente as tecnologias de conversão de energia das ondas mais relevantes. Nesta secção, são também organizados os potenciais impactos ambientais associados à presença do sistema de conversão no meio marinho, com base na bibliografia mais relevante para esta temática.

No Capítulo 3, são evidenciados os instrumentos de avaliação ambiental, que podem ser aplicados às tecnologias de conversão de energia das ondas, assim como o seu enquadramento legal em Portugal.

De forma a organizar a informação recolhida anteriormente, o Capítulo 4 incide numa análise comparativa prospetiva dos potenciais impactos ambientais de conversores de energia das ondas.

Por fim, o Capítulo 5 realça as conclusões sobre o trabalho realizado e destaca sugestões para trabalhos futuros neste âmbito.

2 TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS E SEUS POTENCIAIS IMPACTES NO AMBIENTE

2.1 Principais tipos de tecnologias de conversão de energia das ondas

O impacto ambiental de um conversor de energia das ondas depende das características técnicas do dispositivo, do seu posicionamento no ecossistema marinho presente na área de operação, bem como do critério eleito como referencial.

Os conversores de energia das ondas podem ser classificados de acordo com o local de instalação face à linha de costa, de acordo com o tipo de tecnologia de aproveitamento de energia das ondas, orientação em relação à direção de propagação da onda e outras funcionalidades.

Local de instalação

Os dispositivos *onshore* são instalados na costa, integrados nos elementos construtivos de proteção costeira ou alojados, por exemplo, em zonas rochosas.

Os equipamentos *nearshore* estão localizados em águas de profundidade intermédia (10-30 m) próximo da costa, na superfície das águas ou fixos ao fundo do mar.

Já os equipamentos *offshore* localizam-se longe da costa, podendo ser do tipo flutuante ou submerso, e encontram-se em profundidades mais elevadas, tipicamente entre 40 e 100 metros (Bald et al., 2010). Na Figura 2.1, apresenta-se uma síntese dos conceitos mencionados anteriormente.

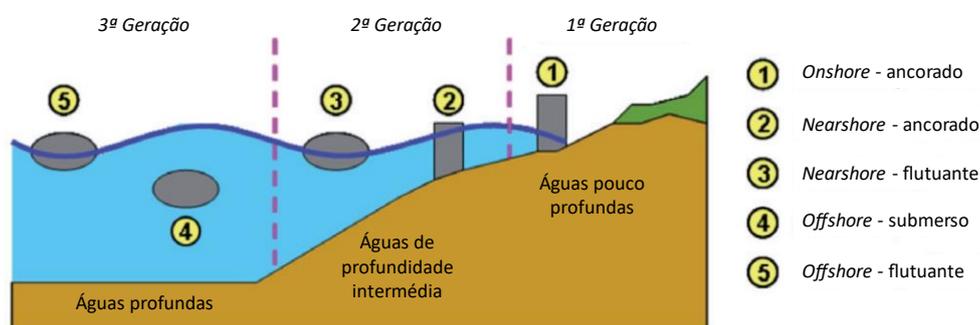


Figura 2.1 - Tipos de tecnologias de conversão de energia das ondas, considerando a sua localização em relação à linha costeira. [Fonte: Adaptado de (Bald et al., 2010)]

Tipo de tecnologia

De uma forma sumária os diversos CEO podem ser simplifadamente classificados, atendendo ao seu princípio básico de funcionamento. Dada a extrema atualidade desta temática optou-se por seguir a denominação internacional em língua inglesa associada a cada tipo de tecnologia, como de seguida se apresenta.

A tecnologia de aproveitamento de energia das ondas do tipo *Oscillating Water Column* (Figura 2.2) consiste numa estrutura aberta, parcialmente submersa e oca onde se cria uma coluna de água oscilante. O movimento das ondas, faz variar o nível da água dentro da estrutura, alterando o volume interno de ar, direcionando-o para um turbo-gerador acionado por este fluxo pneumático alternado.

Os dispositivos com tecnologia do tipo *Submerged Pressure Differential* (Figura 2.3) consistem numa estrutura submersa e fixa no fundo do mar, à qual está associado um corpo que se move na vertical. A propagação das ondas provoca uma variação cíclica da massa de água acumulada por cima do dispositivo, induzindo um diferencial temporal de pressão, que pode ser aproveitado para fazer subir e descer o corpo móvel. Este corpo móvel pode estar associado a um gerador de indutância linear.

A tecnologia de aproveitamento de energia das ondas do tipo *Buoy bodies activated by waves* (Figura 2.4) tem na sua constituição uma estrutura do tipo boia, com corpos que podem ser acionados pela ação das ondas. Basicamente, a oscilação da boia pode instabilizar um corpo localizado no seu interior, induzindo assim o seu movimento rotativo, que pode ser aproveitado para gerar energia.

A tecnologia de aproveitamento de energia das ondas do tipo *Overflowing/Overtopping and/or impact systems* (Figura 2.5) consiste em dispositivos que direcionam a água para zonas mais elevadas da estrutura, gerando um aumento da sua energia potencial de posição. Nessa zona mais alta, está localizado um reservatório de armazenamento, de onde se escoar a água que, posteriormente, atravessa uma turbina gerando energia.

Os dispositivos com tecnologia do tipo *Point Absorber* (Figura 2.6) ou *Multi-punctual Absorber* (múltiplos flutuadores) são equipamentos com estruturas flutuantes e que, através dos seus movimentos verticais de vaivém, indiferentes à direção de onda, convertem a sua energia em movimento mecânico, associável a geradores de indutância linear.

Os dispositivos com tecnologia do tipo *Oscillating Wave Surge* (Figura 2.7) possuem uma pá ou asa dotada de uma charneira da parte inferior, onde faz ligação a uma estrutura horizontal fixa ao fundo do mar. Por ação do campo de velocidades gerado pela passagem da onda, a pá (ou asa) adquire um movimento rotativo alternado em torno da charneira, que pode ser

aproveitado para gerar energia. Estas tecnologias fazem o aproveitamento do movimento de vai e vem, quase horizontal, gerado pela onda (*surge*) quando se propaga a baixas profundidades.

Orientação face à onda incidente

Os *attenuator* são constituídos por elementos construtivos flutuantes, paralelos à direção de propagação da onda, convertendo energia progressivamente à medida que ocorre a passagem das ondas pelo dispositivo. Os *terminator* estão orientados perpendicularmente ao sentido de propagação das ondas (Bald et al., 2010).

Funcionalidade

Os dispositivos monofuncionais são idealizados apenas para realizarem a conversão da energia das ondas em energia útil. Os dispositivos multifuncionais podem proporcionar outras funções como por exemplo proteção costeira.

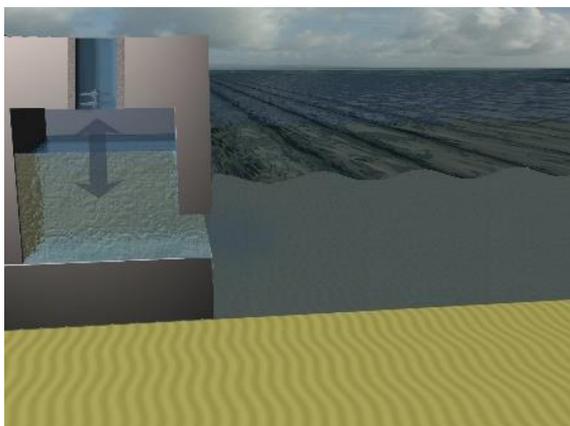


Figura 2.2 - *Oscillating Water Column* [Fonte: (EMEC@, 2012)]

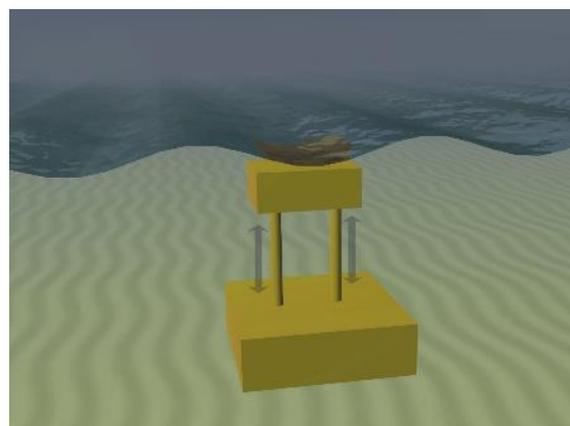


Figura 2.3 - *Submerged Pressure Differential* [Fonte: (EMEC@, 2012)]

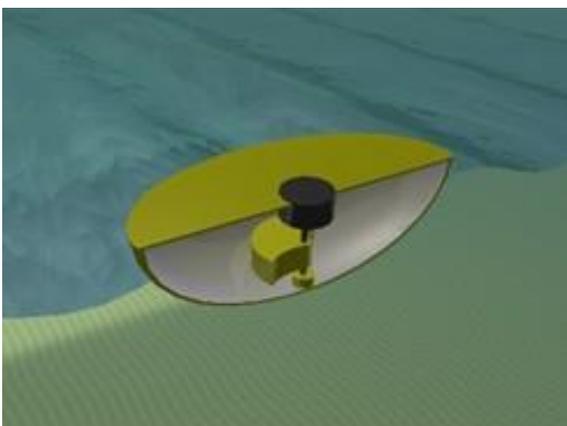


Figura 2.4 - *Buoy bodies activated by waves* [Fonte: (EMEC@, 2012)]

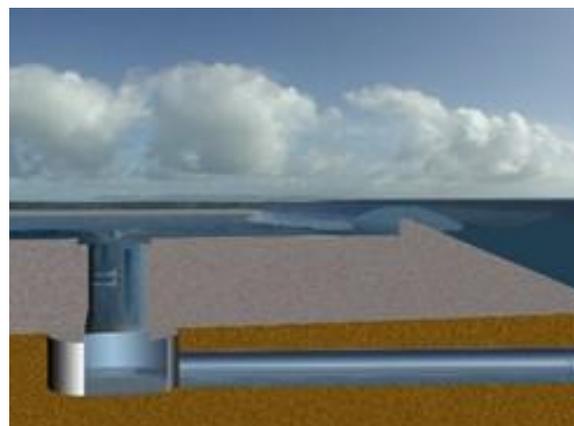


Figura 2.5 - *Overflowing/Overtopping and/or impact systems* [Fonte: (EMEC@, 2012)]

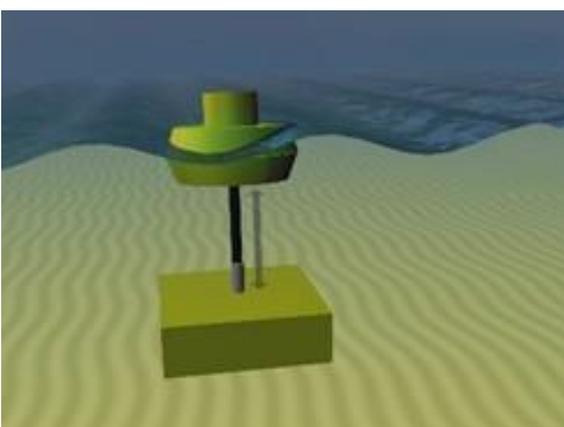


Figura 2.6 - *Point Absorber* [Fonte: (EMEC@, 2012)]

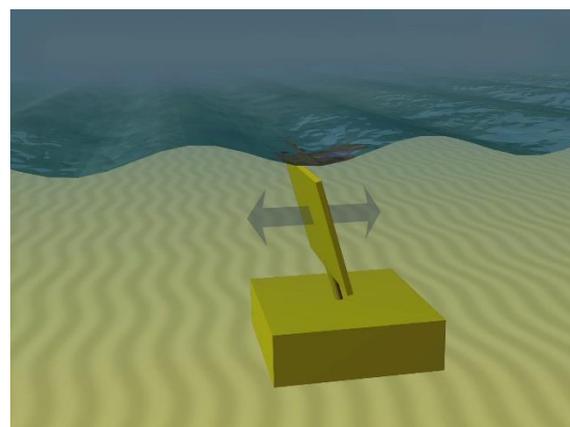


Figura 2.7 - *Oscillating Wave Surge* [Fonte: (EMEC@, 2012)]

2.2 Potenciais impactes ambientais associados a tecnologias de conversão de energia das ondas

Os projetos de conversão de energia das ondas estão intrinsecamente associados à utilização do vasto ecossistema marinho, que se distingue dos restantes pelo geralmente mais reduzido, conhecimento teórico e prático, bem como pela maior dificuldade de acesso, monitorização e fiscalização. Isto torna mais difícil a previsão dos potenciais impactes ambientais diretos e indiretos, assim como, as consequências na estabilidade dos sistemas marinhos. Compreender o funcionamento do ecossistema marinho, a sua resistência, resiliência e resposta às pressões antropogénicas são aspetos basilares na avaliação do impacto ambiental nas áreas marinhas (Mendoza et al., 2019).

Sendo as fontes de energias renováveis o desejável futuro paradigma energético mundial, é fundamental reduzir os efeitos negativos destes dispositivos na biosfera, prevendo, minorando e mitigando potenciais repercussões indesejáveis.

Os efeitos no ambiente provocados pela utilização de conversores de energia das ondas podem ser divididos em duas escalas temporais: a curto-prazo e a longo-prazo; e em três categorias: impactes ambientais físicos; bióticos e socioeconómicos. Na fase de instalação e na fase de desinstalação da estrutura, são inerentes os impactes a curto-prazo, relacionados com o ruído e vibrações gerados pelas obras, a alteração do substrato marinho para fixação/remoção de cabos e sistemas de ancoragem e consequente aumento do tráfego naval. A longo-prazo, durante o período de operação do dispositivo, os impactes ambientais são consequência da presença da estrutura e elementos adjacentes, assim como, o ruído e vibrações de funcionamento e os campos eletromagnéticos gerados pelos cabos elétricos (AWATEA, 2008).

No ambiente físico, a qualidade da água, a hidrodinâmica do local, o transporte de sedimentos e alteração paisagística são os potenciais fatores ambientais afetados. A localização, a área ocupada pelo dispositivo e elementos adjacentes e, o seu posicionamento, podem gerar perturbação nestes domínios. No ambiente biótico, a fauna e flora estão sujeitos a impactes negativos e positivos. A instalação de conversores de energia das ondas, pode originar perda e degradação dos habitats, risco de colisão e aprisionamento das espécies nos equipamentos e perturbação da orientação de espécies marinhas que utilizam como referência o campo magnético da terra. Contudo, estas estruturas podem também ter o potencial de dispositivos de agregação de espécies, podendo alguns deles funcionar após o fim da vida útil como recifes artificiais. No ambiente socioeconómico, estas instalações podem afetar a prática piscatória e a aquacultura locais. Por outro lado, este tipo de atividades podem potenciar o crescimento económico, a partir da criação de postos de trabalho (Russell et al., 2015).

A síntese dos impactos ambientais anteriormente referidos pode ser efetuada, recorrendo à matriz de Leopold (Leopold et al. 1971), que foi o primeiro método estabelecido para avaliação do impacto ambiental. Esta técnica tem como base uma matriz, onde nas colunas são listadas 100 ações antropogénicas do projeto em estudo potencialmente modificadoras do ambiente. Nas linhas, são colocadas 88 características ambientais que podem estar sujeitas a alteração por parte dessas mesmas ações. Após esta identificação, são analisados os diversos sistemas coluna-linha (interseções), em termos de magnitude (-10 a +10) e importância (1 a 10) do impacto.

2.2.1 Ruído subaquático

O ruído proveniente das atividades antropogénicas é reconhecido como uma ameaça emergente para os ambientes subaquáticos. Os impactos da poluição acústica subaquática têm uma forte incidência negativa na qualidade de vida nas populações de espécies marinhas e na produtividade biológica. A grande maioria das espécies marinhas depende do som para funções biológicas – orientação, comunicação, reprodução, alimentação e predação – e correlação com áreas circundantes. A sensibilidade auditiva dos animais marinhos é frequentemente generalizada aos grupos taxonómicos – teleósteos, cetáceos, pinípedes, crustáceos - variando a sua especialidade auditiva numa banda de frequências bastante alargada entre 10 Hz a 100 kHz. As fontes produtoras de níveis sonoros elevados (Figura 2.8) provocam nos recetores: stress; alterações comportamentais; lesões acústicas (e.g., perda temporária de audição, barotrauma); e, em casos extremos, morte (Copping & Hemery, 2020).



Figura 2.8 - Ruído antropogénico e sons naturais no ambiente marinho. [Fonte:Adaptado de (JPI Oceans, 2022)]

A determinação da magnitude do impacto do ruído subaquático provocado pelos dispositivos CEO requer um profundo reconhecimento físico e biológico do ambiente circundante. Os riscos acústicos, inerentes ao período útil de exploração dos conversores de energia das ondas, variam com a solução tecnológica adotada e condições de funcionamento. Para além das características construtivas, há que considerar as restantes fontes sonoras permanentes e/ou temporárias,

naturais e/ou antropogénicas, suscetíveis de perturbar cumulativamente os recetores marinhos. A intensificação do tráfego naval, durante as fases de instalação e manutenção, tem o potencial de influenciar alguns animais marinhos, como cetáceos e pinípedes, num alcance até 100 metros a partir da fonte. Nestes períodos, os organismos locomotores tendem a evitar a área de operações, enquanto os restantes adquirem um estado de habituação à presença humana. No entanto, o ruído gerado pode impossibilitar a receção de sons naturais importantes ao comportamento e danificar o sistema auditivo das espécies que permanecem no local. Apesar de haver pouca informação referente aos efeitos a longo-prazo, sobre indivíduos e populações, deve ser adotada uma postura preventiva, preferindo e avaliando métodos construtivos menos invasivos (Langhamer et al., 2010).

Investigação em ambiente marinho, especialmente em alto mar e zonas profundas, requer equipamento tecnológico avançado, geralmente dispendioso e uma equipa multidisciplinar para coerente interpretação de resultados. A Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC – ‘*International Electrotechnical Commission*’) disponibiliza em, *IEC TS 62600-40* (IEC@, 2019), orientações para medição e caracterização do ruído subaquático em torno dos dispositivos de energia renovável marinha. Existem bastantes incertezas relativamente à pegada acústica dos dispositivos CEO, segundo os estudos disponíveis dedicados a esta área de interesse.

Em *Robinson & Lepper (2013)*, os autores afirmam que o nível de ruído emitido pelos dispositivos não atinge valores significativos durante a implementação, operação e manutenção. Como tal, a probabilidade de impacto negativo sobre os recetores marinhos é classificada como improvável. Lesões acústicas sobre os recetores marinhos são improváveis de ocorrer, inclusive na proximidade do equipamento.

Um estudo semelhante, *Cruz et al. (2015)*, dedicado ao reconhecimento dos efeitos do ruído emitido por um dispositivo CEO (*WaveRoller - oscillating wave surge converter*), estimou que a intensidade do ruído subaquático gerado pelo conversor varia entre 115 e 130 dB re 1 μ Pa. Esta é uma gama de menor largura, em comparação com o ruído produzido por outras atividades marinhas antropogénicas. A caracterização da propagação de ruído gerou conclusões relativas ao potencial distúrbio sobre as espécies, sendo expectável que os cetáceos, dada a sensibilidade auditiva a baixas e médias frequências, sejam afetados quando nadam nas proximidades dos dispositivos.

2.2.2 Campos eletromagnéticos emitidos por cabos elétricos submarinos

Os potenciais efeitos dos campos eletromagnéticos (CEM), com origem em atividades antropogénicas, têm ganho especial atenção com a emergente ocupação das zonas marítimas com atravessamentos de cabos submarinos. Algumas espécies que integram estes ecossistemas

marinhos têm a capacidade de detetar e responder a CEM, para fins de orientação, migração e predação (Tricas & New, 1997). A sensibilidade eletromagnética varia entre grupos taxonómicos com organismos com capacidade sensorial a campos elétricos, campos magnéticos ou ambas as componentes (Newton et al., 2019). Por isso, para compreender e interpretar as potenciais interações ambientais dos CEO, torna-se necessário conhecer a sensibilidade das espécies envolvidas e a intensidade das emissões dos CEM (Copping & Hemery, 2020).

Os cabos elétricos submarinos (CES), componente usualmente integrante dos sistemas de CEO, têm a função de transferir a energia elétrica gerada pelos dispositivos para a costa e interligar os vários dispositivos constituintes de um determinado *array*. Estes elementos são a principal fonte de CEM antropogénicos associados às tecnologias de energia renováveis marinhas. Ao longo de toda a sua extensão, são emitidos CEM que se propagam, perpendicularmente ao eixo do cabo, para o ambiente circundante, dissipando-se com a distância à fonte. A intensidade de propagação depende: do tipo de corrente de transmissão (corrente direta ou corrente alternada); das características construtivas do cabo; da potência transmitida; do campo magnético terrestre local; e dos fatores ambientais da envolvente (Copping & Hemery, 2020).

A componente elétrica dos CEM é passível de ser contida através do material de revestimento dos CES, em combinação com o enterramento do mesmo no sub-fundo marinho (Taormina et al., 2018), evitando zonas de desgaste (zonas de rebentação de ondas e zonas de pesca e ancoramento intensas) (Wave Energy Centre, 2004). Porém, a componente magnética propaga-se para o ambiente exterior, originando a criação de campos elétricos induzidos que podem afetar as espécies que passam nas proximidades do cabo (Copping & Hemery, 2020). Adicionalmente, no caso de CES com corrente de transmissão alternada, as extremidades destes provocam uma rotação do campo magnético, que faz criar, também, um campo elétrico induzido no fundo marinho (Copping & Hemery, 2020). A Figura 2.9 ilustra a dinâmica e interações dos diversos CEM antropogénicos e naturais, com cabos de transmissão de corrente contínua (direta) e alternada.

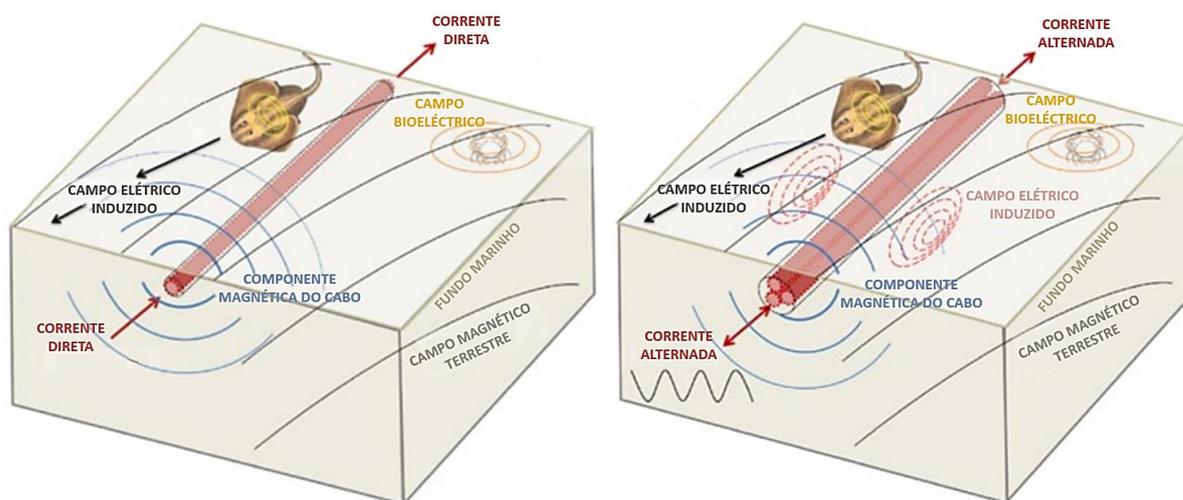


Figura 2.9 - Fenómeno de criação de campos elétricos induzidos por cabos submarinos de transmissão direta e alternada. [Fonte: Adaptado de (Copping & Hemery, 2020)]

Os CEM antropogênicos são eventuais condicionadores dos ecossistemas marinhos, interferindo com a envolvente e modificando as interações naturais que se estabelecem entre os elementos integrantes. Os organismos vivos podem padecer de anomalias nos padrões comportamentais, consequência da sua sensibilidade a estes novos estímulos. A presença de CES é suscetível de causar efeitos negativos, sobre os organismos com sensibilidade eletromagnética, nomeadamente: nas interações predador/presa; aproximação/afastamento das zonas circundantes; na capacidade de navegação/orientação; e alterações fisiológicas e de desenvolvimento (Taormina et al., 2018).

As técnicas de implementação dos CES são fatores determinantes da magnitude dos potenciais impactos negativos. Por isso, aspetos como: o percurso; inclinação; profundidade e tipo de cobertura (no caso de impossibilidade de enterramento) são estratégias de compensação fundamentais para minorar a propagação de CEM (Taormina et al., 2018). Não obstante, é necessário maior entendimento relativamente à intensidade de geração de campos magnéticos e campos elétricos induzidos, associados à tendência de aumento do número de ligações e potência individual dos cabos submarinos (Taormina et al., 2020).

Nos últimos anos, diversos estudos foram elaborados tanto laboratoriais (Jakubowska et al., 2019; Scott et al., 2018; Taormina et al., 2020) como de campo (Wyman et al., 2018), com o intuito de compreender a capacidade de exposição de diversas espécies a CEM e os efeitos que estes podem provocar em recetores sensíveis. Porém, existem ainda incertezas relativamente à significância dos impactos ecológicos que os CES de CEO podem potenciar. Investigação dedicada aos efeitos da exposição a CEM a longo-prazo, para distintas intensidades de emissão

e em diversas fases de vida dos organismos são lacunas de conhecimento, com necessidade de serem compreendidas, para obter evidências conclusivas (Copping & Hemery, 2020).

2.2.3 Alterações dos habitats bentónicos e pelágicos

As infraestruturas implementadas no ambiente marinho estão sujeitas à colonização por organismos de incrustação biológica – *Biofouling* (Figura 2.10) e os dispositivos de CEO não são exceção. O aumento do tempo de permanência dos elementos de ancoragem e dos correspondentes componentes no meio aquático origina efeitos positivos e negativos nos habitats marinhos. A ocupação do fundo marinho e/ou da coluna de água com estruturas rígidas provoca modificações físicas nos habitats dos organismos bentónicos e pelágicos (Copping & Hemery, 2020).

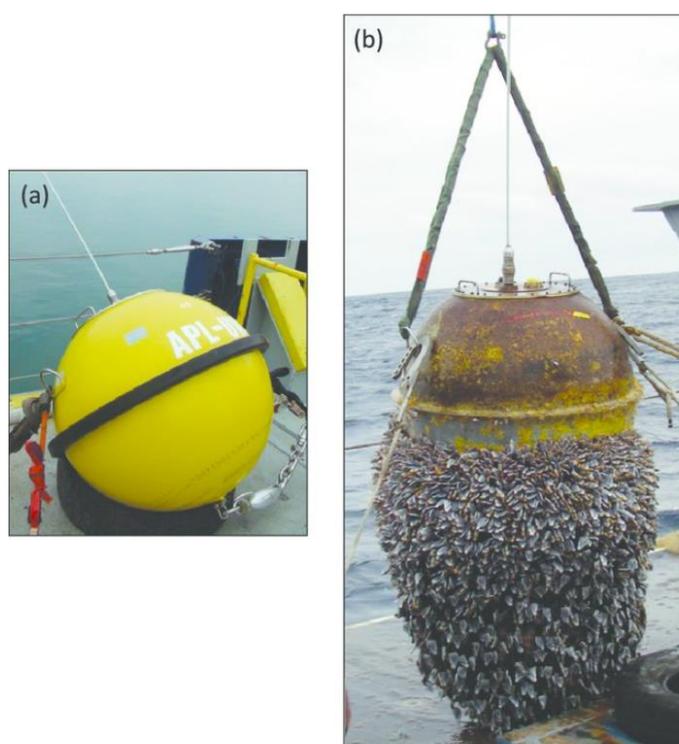


Figura 2.10 - Boia de medição de ondas em águas profundas. (a) Equipamento antes da sua instalação em outubro de 2012. (b) Boia após desinstalação em janeiro de 2015, com elevado grau de bioincrustação (*Biofouling*). [Fonte: (Thomson et al., 2015)]

Nas imediações dos CEO, a biodiversidade pode ser alterada drasticamente durante o período de operação dos dispositivos, por ação do efeito de agregação de espécies (*e.g.*, base de torre eólica fixa - Figura 2.11) (Alexander et al., 2016).

Empreendimentos de produção de energia das ondas implementados à escala comercial não estão ainda disponíveis. No entanto, é expectável que múltiplos dispositivos funcionem como

uma malha, um sistema interligado assegurando a conectividade entre recifes artificiais (Causon & Gill, 2018). Esta dinâmica pode motivar o surgimento de espécies invasoras, potenciando a colonização e proliferação das mesmas em áreas anteriormente inacessíveis (Adams et al., 2014). No entanto, as espécies invasoras irão mais provavelmente colonizar áreas dos dispositivos localizadas na zona superficial da coluna de água. Tecnologias como *Point Absorber buoys*, *Oscillating Water Columns*, *Overtopping devices*, são por isso, mais suscetíveis à colonização por estas espécies não nativas (Copping & Hemery, 2020).

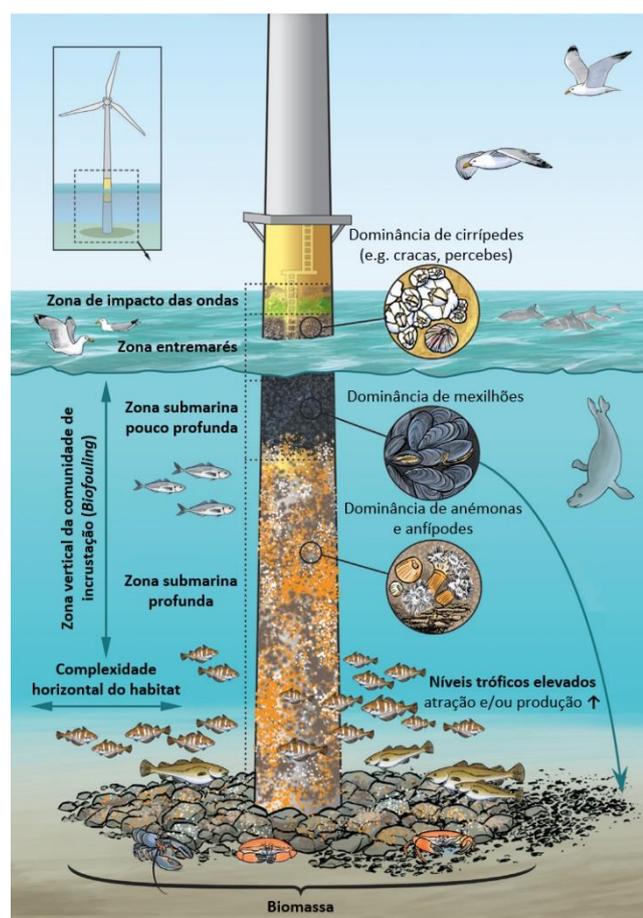


Figura 2.11 - Colonização das superfícies submersas de um dispositivo de conversão de energia eólica *offshore*. Efeito de recife artificial ao longo da coluna de água. [Fonte: Adaptado de (Degraer et al., 2020)].

A distribuição das comunidades bentónicas é fortemente dependente da profundidade, das características do fundo marinho e da velocidade da corrente. A instalação e operação de dispositivos de CEO pode desencadear perturbações nestes habitats, ocasionadas pela fixação dos cabos eléctricos submarinos e sistemas de ancoragem, bem como, pelos fenómenos de turbulência e erosão hidráulica localizada (*scouring*) em torno das estruturas (Copping & Hemery, 2020). A tipologia tecnológica, a solução construtiva, a localização e área ocupada tornam-se condições influenciadoras da magnitude do impacto do efeito de recifes artificiais

(Adams et al., 2014). A complexidade do fundo marinho, promovida pela presença dos dispositivos CEO, fornece abrigo aos organismos agregados a estes recifes artificiais (Figura 2.11). A área utilizada pelo sistema de conversão energética torna-se uma zona atrativa para outras espécies, conduzindo assim a mudanças na diversidade, abundância e dimensão dos grupos taxonómicos que compõem as comunidades locais (Causon & Gill, 2018; Dannheim et al., 2020).

O aproveitamento de energia das ondas, associado a instalações de escala comercial, poderá requerer uma zona marítima exclusiva. A provável delimitação desta zona de operação trará restrições ao exercício da pesca comercial, nomeadamente, a não captura ou proibição de artes de pesca específicas. As comunidades marinhas dos habitats presentes no meio circundante às infraestruturas encontrar-se-ão protegidas da captura. Esta condição poderá ser benéfica, para a sustentabilidade das espécies mais exploradas, garantido a sua recuperação (Alexander et al., 2016). Por consequência, nas áreas periféricas a esta zona marítima exclusiva, poderá ocorrer um aumento da biomassa, instaurando-se assim, novas áreas piscatórias com interesse e valor comercial (Coates et al., 2016).

Os efeitos ambientais sobre os habitats marinhos anteriormente expostos (*i.e.*, modificação das comunidades bentónicas e pelágicas, efeito de recife artificial, colonização por espécies invasoras e o efeito da zona marítima exclusiva) são potenciais impactes transpostos do conhecimento adquirido noutras infraestruturas (*e.g.*, *offshore wind farms*, plataformas petrolíferas e de gás, boias de navegação, cabos de comunicação) (Dannheim et al., 2020). Contudo, é necessário confirmar a aplicabilidade desde efeitos a outras infraestruturas, tentando conhecer e avaliar a natureza, magnitude e extensão destes impactes, quando se trata de dispositivos CEO. Trabalhos de monitorização e observação devem ser conduzidos durante longas escalas temporais, de forma a abranger as variações dos processos ecológicos das comunidades marinhas (Copping & Hemery, 2020). Depreende-se assim que apenas a longa permanência dos dispositivos de CEO no meio marinho poderá vir a proporcionar a desejável informação para complementar as hipóteses levantadas.

2.2.4 Alterações dos sistemas oceanográficos

O equilíbrio dinâmico dos processos oceanográficos é determinante para a sustentabilidade do ambiente marinho e qualidade dos ecossistemas integrantes. O fluxo de água nos oceanos estabelece: a concentração de gases e nutrientes dissolvidos; os gradientes de temperatura e salinidade; e morfodinâmica costeira. Os dispositivos de aproveitamento de energia das ondas têm o potencial de afetar estes processos físicos. A remoção de energia ao sistema hidrodinâmico poderá alterar os fluxos de circulação de massas de água em torno dos dispositivos de conversão, como também, modificar o regime de propagação das ondas (*e.g.*,

diminuição da altura e/ou alteração da direção de incidência das ondas) (Copping & Hemery, 2020).

As soluções tecnológicas existentes capturam distintas componentes da energia das ondas (cinética e/ou potencial), causando efeitos diversos na sua propagação. A localização e configuração espacial de um conjunto organizado dos múltiplos dispositivos (*array*) pode alterar o regime de propagação das ondas incidentes e, conseqüentemente o impacto no ambiente costeiro. Numa ótica experimental, *O'Boyle et al. (2017)* avaliou a variação do campo de ondas, nas imediações de um conjunto de cinco modelos CEO do tipo *Oscillating Water Column*, através de múltiplas configurações espaciais. Os resultados evidenciaram que a configuração ótima do *array*, na captura de energia, é quando este se encontra alinhado perpendicularmente à direção de propagação das ondas (*Terminator array*), com espaçamento entre dispositivos superior ao comprimento de onda local. A energia absorvida pelos CEO pode contribuir para a mitigação da erosão costeira. Alguns CEO podem funcionar como quebra mares submersos ou recifes artificiais, contribuindo para o rebentamento das ondas, que assim dissipam parte da sua energia antes de atingirem a linha de costa. Este comportamento tem gerado interesse na investigação do potencial carácter multifuncional dos CEO no âmbito da proteção costeira (Abanades et al., 2014, 2018; Lopes de Almeida & Santos Martinho, 2020). Segundo, *Ozkan et al. (2020)*, os *arrays* de CEO não provocam impactes negativos significativos na morfodinâmica costeira, não obstante são necessários estudos a longo prazo, durante a vida útil do projeto (geralmente, 20 anos), para avaliar exaustivamente os impactes destas infraestruturas na erosão costeira.

A progressão do desenvolvimento comercial dos CEO, bem como, as investigações e observações *in situ* associadas proporcionarão dados conclusivos. Até esse estado de conhecimento ser atingido, melhorias nas capacidades de modelação numérica e a validação desses modelos são necessárias. As predições desses estudos apoiarão na decisão das técnicas de monitorização a implementar, bem como o percurso e prioridades para investigações futuras (Copping & Hemery, 2020).

2.2.5 Encontro dos animais marinhos com o sistema de ancoragem

As tecnologias de conversão de energia renovável flutuantes ou suspensas na coluna de água são fixadas através de sistemas de ancoragem, com intuito de posicionar o dispositivo no local predefinido. No cenário de um conjunto de múltiplos dispositivos (*array*), cabos de interligação entre estes elementos desenvolvem-se no espaço da coluna de água (Figura 2.12). A ocupação do meio aquático pode originar riscos para os animais marinhos que habitam e/ou se deslocam em massas de água lotadas com estruturas antropogénicas.

O estado embrionário da técnica, acompanhado da consequente ausência de implementação de CEO em grande escala (*array*), faz com que estudos dedicados ao tema em análise, sejam escassos. Como tal, a averiguação e exposição deste efeito ambiental, terá por base, informação transposta a partir de uma infraestrutura análoga – aproveitamento de energia eólica *offshore* através de plataformas flutuantes (Figura 2.12).

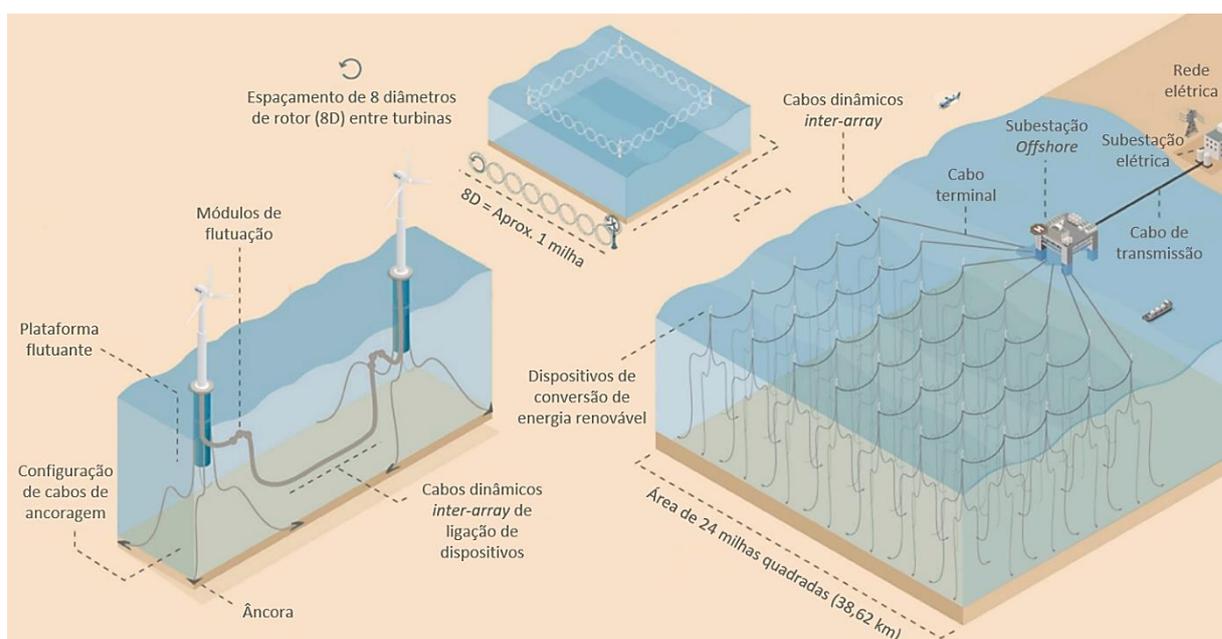


Figura 2.12 - Esquema de um *array* de aproveitamento de energia eólica *offshore* através de plataformas flutuantes. [Fonte: Adaptado de (Maxwell et al., 2022)]

As linhas de ancoragem e cabos de interligação podem potenciar o risco de emaranhamento (*entanglement*) e/ou aprisionamento (*entrapment*) das espécies marinhas, elevando a probabilidade de lesões e mortalidade. Mamíferos aquáticos com dimensões corporais consideráveis e que necessitem de vastas áreas para satisfazer os seus hábitos alimentares tendem a ser as espécies com maior suscetibilidade a estes sistemas. A literatura dedicada ao estudo dos comportamentos biológicos das espécies aquáticas expõe especial preocupação com baleias-de-barbas migratórias (*e.g.*, baleia-jubarte [*Megaptera novaeangliae*], baleias-anã [*Balaenoptera acutorostrata*] e baleia-franca-do-atlântico-norte [*Eubalaena glacialis*]) e grandes elasmobrânquios e cartilagíneos pelágicos (*e.g.*, tubarão-baleia [*Rhincodon typus*], tubarão-frade [*Cetorhinus maximus*], raia-manta [*Manta birostris*]) (Benjamin et al., 2014).

O risco de emaranhamento pode ser classificado por: primário, em que os animais são diretamente afetados na altura de encontro com as linhas de ancoragem e cabos de interligação; ou, secundário, onde os eventuais danos ocorrem por via indireta, devido ao encontro com

materiais antropogénicos perdidos (*e.g.*, redes de pesca, plásticos) que ficam embaraçados nas componentes do dispositivo (Maxwell et al., 2022).

A provável ocorrência do risco de emaranhamento primário é dependente das características do sistema de ancoragem e de interligação (*i.e.*, material, diâmetro, tensionamento das linhas), como também, da capacidade de deteção destes elementos pelos organismos aquáticos. A consideração conjunta destes aspetos tem sido traduzida numa probabilidade baixa de ocorrência deste risco. Tal deve-se ao facto, do elevado diâmetro e rigidez das linhas de amarração ser passível de ser detetado por animais marinhos, através de ecolocalização, vibrações e/ou acústica (Benjamin et al., 2014). No maior aproveitamento de energia eólica offshore através de plataformas flutuantes (*Hywind Scotland*), em operação a cerca de 30 km da costa de Peterhead (Aberdeenshire) desde outubro de 2017 na Escócia, ainda não foi reportado nenhum incidente por emaranhamento primário. Porém, a interpretação dos estímulos por parte dos organismos e, conseqüente resposta comportamental à presença das estruturas de fixação, necessita de maior compreensão em regiões com elevada densidade populacional de espécies suscetíveis ao risco em destaque (Maxwell et al., 2022).

No que respeita ao risco de emaranhamento secundário, a intensidade do exercício piscatório e a abundância de detritos antropogénicos na zona de operação são os aspetos que podem elevar a probabilidade de ocorrência (Benjamin et al., 2014). As espécies com extremidades longas, aves marinhas e peixes, são propícias ao aprisionamento nestes detritos antropogénicos. Quando os animais são capturados, a sua mobilidade é condicionada e a possibilidade de lesões eleva-se, tornando-se presas acessíveis a grandes predadores que, por sua vez ficam sujeitos ao mesmo risco. O enredamento secundário pode representar um risco significativo e ter impactes a nível populacional, particularmente se ocorrerem em espécies ameaçadas (Maxwell et al., 2022).

A monitorização da tensão das linhas de ancoragem e cabos de interligação pode ser útil para minorar o risco de emaranhamento primário e secundário. Os monitores de tensão podem ser ligados sem fios a um alerta remoto para sinalizar a presença de uma espécie potencialmente emaranhada nas componentes de fixação (Maxwell et al., 2022).

2.2.6 Impactes paisagísticos, sociais e económicos

O desenvolvimento e a implementação de projetos de aproveitamento de energias renováveis assumem hoje em dia um papel determinante na sociedade e na economia. Estes projetos incluem um potencial conjunto de efeitos benéficos e prejudiciais, em relação ao ordenamento do território, população e atividades económicas. Os impactes tendem a ser maioritariamente positivos, refletindo-se no melhoramento da qualidade de vida das comunidades (rendimento, emprego, saúde, etc.).

A produção de energia renovável marinha garante estabilidade energética ao território costeiro, reduzindo a sua dependência em energia proveniente de combustíveis fósseis. Estes projetos sustentáveis são basilares na descarbonização do setor energético. O desempenho resultante poderá aliciar decisores das restantes zonas costeiras do território, a adotar este tipo de solução energética. Em suma, estas iniciativas servirão como modelos exemplificadores da viabilidade ambiental e socioeconómica, tendo o potencial de alterar o paradigma e garantir a segurança energética a todo o território nacional (Freeman, 2020).

A construção, instalação, manutenção e desmantelamento dos CEO requerem unidades de apoio na zona costeira próxima ao local de operação dos dispositivos, bem como, uma equipa multidisciplinar para execução dos trabalhos espectáveis. Tendo em consideração, o tempo de vida útil dos dispositivos no mar (cerca de 20 anos), estes projetos têm um impacto positivo significativo a nível social e económico, potenciando a criação de postos de trabalho localmente, reduzindo o desemprego nos grandes centros de consumo que são, por norma, as zonas junto ao litoral (Lavidas, 2018). Outras atividades económicas e negócios podem emergir na área de implementação, durante o período de operação de CEO. Este crescimento económico local deve-se ao incremento que estes projetos proporcionam na criação de riqueza e consequente valorização do território (Freeman, 2020).

As atividades económicas, lúdicas e recreativas dependentes do espaço marítimo e costeiro poderão ser prejudicadas pela presença dos dispositivos. A restrição de navegação e uso do espaço destinado à operação dos dispositivos CEO poderá modificar as rotas de tráfego marítimo, condicionando o acesso rápido a zonas de interesse. No entanto, devido ao efeito de agregação de espécies junto das estruturas submersas dos CEO, as zonas circundantes poderão tornar-se novas áreas de interesse para o setor da pesca e turismo.

A modificação da paisagem provocada pela presença de um dispositivo CEO dependerá fortemente da sua dimensão e altura da secção exposta do equipamento acima do nível médio da superfície da água. Apesar do fator de apreciação subjetivo, o impacto visual que o sistema de extração poderá provocar aos residentes e comunidades locais, deverá ser considerado como impacto negativo. Não obstante, o reconhecimento da presença dos CEO pelos indivíduos e envolvimento do público na fase de planeamento poderá servir como um mecanismo de sensibilização, estimulando a consciencialização da necessidade destas soluções energéticas no combate às alterações climáticas (Freeman, 2020).

3 INSTRUMENTOS APLICÁVEIS À AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS

3.1 Avaliação de ciclo de vida

Os projetos de energia renovável têm emergido e potenciado a substituição gradual dos combustíveis fósseis, promovendo a desejável transição elétrica. Estes avanços na mudança da matriz energética têm também aumentado a atenção, relativamente aos potenciais impactos nos ambientes onde as novas tecnologias são implementadas. Apesar das fontes de energia serem inegavelmente isentas de carbono, há emissões indiretas de GEE e de outros poluentes, que persistem durante diversas fases do sistema de geração de energia. Considerando a perspetiva do ciclo de vida completo de um dispositivo, todas as fases inerentes ao mesmo são consumidoras de energia, recursos e potencialmente geradoras de resíduos, *i.e.*, durante o seu fabrico, instalação, operação, manutenção e desmantelamento. Como tal, estudos detalhados relacionados com o entendimento dos impactos ambientais do ciclo de vida dos dispositivos de produção de energia renovável são notáveis para os futuros desenvolvimentos tecnológicos, bem como, o prognóstico e avaliação das pressões ambientais que os mesmos podem causar na fase de comercialização (Zhai et al., 2021).

Nas últimas cinco décadas, têm emergido, na indústria energética, diversos tipos de conversores de energia das ondas. Segundo (Liu et al., 2017), a grande maioria destas tecnologias têm sido instaladas no Reino Unido e Portugal, destacando-se o último pela sua vasta Zona Económica Exclusiva (ZEE) (Zhai et al., 2018). Apesar de décadas de trabalho de investigação e elevado registo de patentes, ainda não se conseguiu, até aos dias de hoje, a implementação de uma solução convergente comercialmente viável. Os esforços de desenvolvimento têm-se focalizado na otimização da eficiência e fiabilidade técnica, sendo que o desempenho ambiental ainda não é uma preocupação prioritária.

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta de análise, reconhecida pela sua eficácia na quantificação dos aspetos ambientais pertinentes e dos potenciais impactos ambientais de um determinado produto (*e.g.*, uso de recursos e consequências da produção de resíduos). Através de uma abordagem holística, são reunidas, identificadas e avaliadas, as entradas e saídas do sistema, ao longo das diversas fases de vida do produto: desde a extração de recursos (matérias-primas e energia); à produção de materiais e componentes; da construção à operação e manutenção do produto; até ao desmantelamento, tratamento e deposição de resíduos (Guinée et al., 2001). Na Figura 3.1, estão esquematizados os processos envolvidos no ciclo de vida de um produto, desde o “berço-ao-túmulo” (*‘cradle-to-grave’*), definindo-se assim, os limites do sistema da ACV.

A Organização Internacional de Normalização regula esta metodologia através da ISO 14040:2006 (IOS@, 2006a) e ISO 14044:2006 (IOS@, 2006b), que visam providenciar a compreensão universal de conceitos, convenções e diretrizes, para a aplicação da mesma sem ambiguidades. Relativamente, aos aspetos socioeconómicos, especificações temporais e espaciais do produto, a típica abordagem de ACV não os contempla, como tal, a utilização complementar de outras técnicas de gestão ambiental (*e.g.*, avaliação de risco, e avaliação de impacto ambiental) é uma estratégia aconselhável para compreensão geral de todos os fatores envolvidos e, desta forma, melhorar o processo de tomada de decisão (Manuilova et al., 2009).

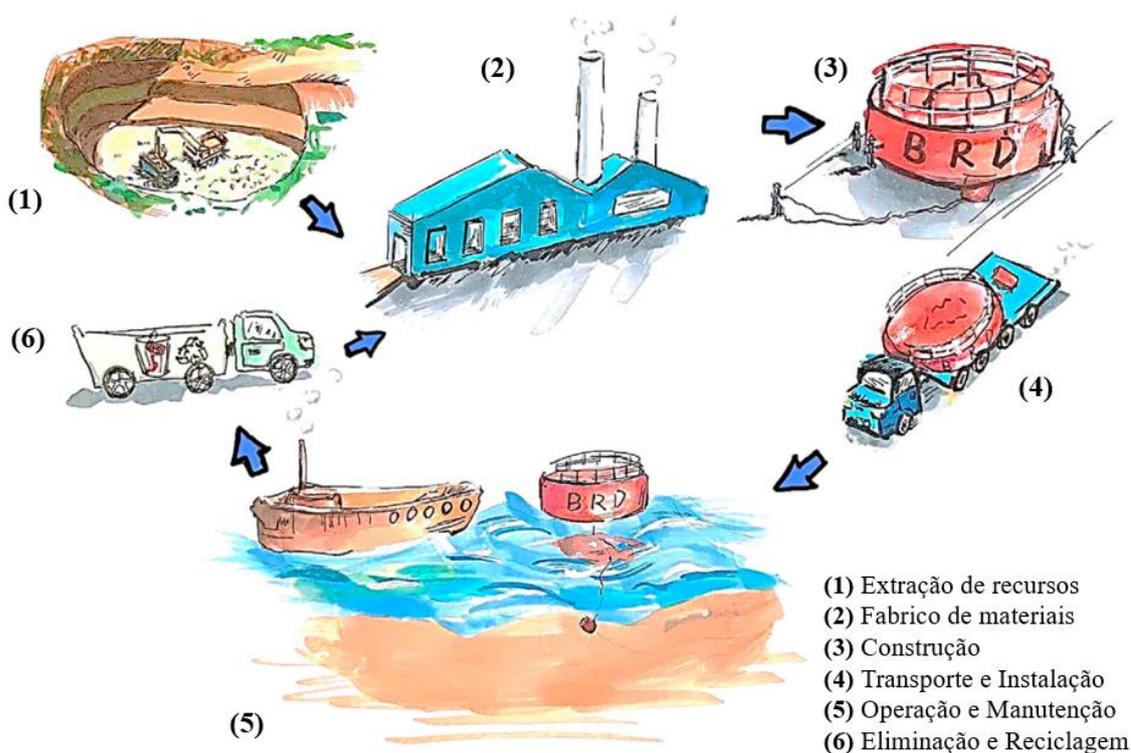


Figura 3.1 - Ciclo de vida de um conversor de energia das ondas. [Fonte: Adaptado de (Zhai et al., 2021)].

3.1.1 Processo metodológico de avaliação de ciclo de vida

Este instrumento de avaliação segue um procedimento iterativo de quatro fases: definição de âmbito e objetivo; análise de inventário de ciclo de vida; avaliação dos impactos ambientais e interpretação de resultados (Figura 3.2).

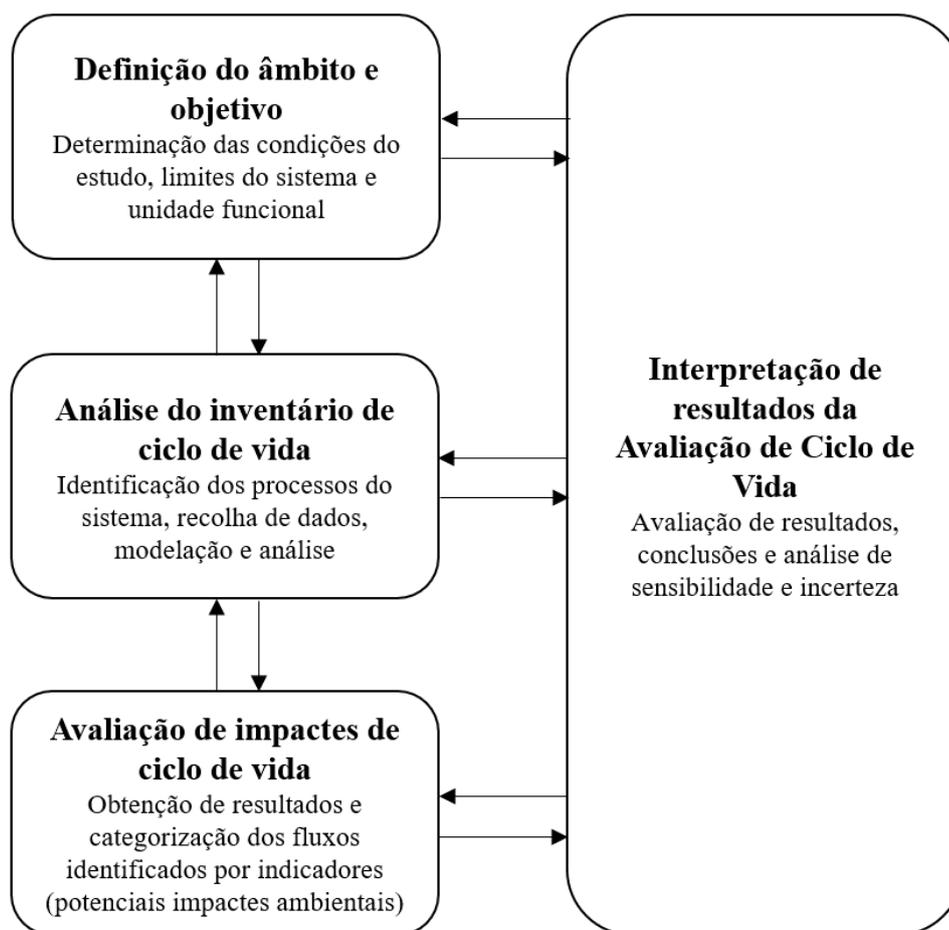


Figura 3.2 - Fases da ACV de acordo com a ISO 14040. [Fonte: Adaptado de (Apolonia & Simas, 2021; Walter Klöpffer, 2014)]

Na fase de definição do âmbito e objetivo, são destacadas as condições do sistema de avaliação, os seus limites e suposições iniciais. Durante a fase de análise do inventário de ciclo de vida, são identificadas as atividades do sistema, bem como, os recursos necessários para a sua realização (entradas, *e.g.*, matérias-primas, energia, água) e os subprodutos originados (saídas, *e.g.*, resíduos, emissões, efluentes, perdas). Após este reconhecimento do sistema, são quantificados e modelados os fluxos das atividades. Na avaliação de impactos de ciclo de vida, as informações recolhidas na fase anterior são alocadas a categorias de impacto, podendo estas ser: depleção de metais; depleção fóssil; aquecimento global; depleção de ozono; acidificação terrestre; eutrofização de água doce; ecotoxicidade de água doce; depleção de água; pegada de

escassez de água doce; toxicidade humana – cancerígena e não cancerígena; entre outras (Marques et al., 2018). Posteriormente, utilizando modelos de avaliação de impactos e fatores de conversão, estas categorias são traduzidas em indicadores, que refletem pressões de caráter ambiental, riscos para a saúde ou escassez de recursos. Esta transformação é conseguida através de fatores de conversão, que representam a contribuição espetável de um impacto por unidade de emissão ou consumo de recurso, variando em função da categoria em questão. Na última etapa, os resultados da avaliação de ciclo de vida são interpretados tendo em consideração os objetivos e âmbito do estudo. Através de análise de sensibilidade e incerteza, os resultados são quantificados e as conclusões são estabelecidas (Hauschild et al., 2011).

3.1.2 Revisão da bibliografia sobre avaliação de ciclo de vida de conversores de energia das ondas

A indústria energética, em matéria de tecnologias de conversão de energia das ondas, encontra-se, como já referido, numa fase preliminar, existindo, por isso, poucos dispositivos comerciais implementados no meio oceânico. O desenvolvimento de ACV destas tecnologias é crucial para antecipar eventuais contrariedades ambientais e acelerar a transposição das atuais limitações deste setor. A identificação das fases e aspetos do ciclo de vida ambientalmente mais desfavoráveis fornece, à priori, informação relevante para os projetistas, possibilitando opções por soluções alternativas. As evidências quantitativas decorrentes desta metodologia são vantajosas nas fases de investimento e execução de programas tecnológicos, uma vez que os resultados facilitam a comparação entre produtos e, por consequência, auxiliam potenciais empreendedores e órgãos governamentais na tomada de decisão (Douglas et al., 2008). Os estudos de ACV são, portanto, um dos elementos a considerar na análise global da valia dos dispositivos de conversão de energia das ondas, na qual a viabilidade económica da produção de energia deve ser balanceada com o seu desempenho ambiental em termos de ACV.

Neste sentido, foi realizada uma pesquisa bibliográfica, com o intuito de apurar quais os dispositivos que possuem uma ACV completa, *i.e.*, desde o “berço-ao-túmulo” (*‘cradle-to-grave’*) e assim contextualizar o estado da investigação no campo da energia oceânica. Para tal, foram considerados para análise: artigos científicos (*peer reviewed journal articles*); dissertações de mestrado e dissertações de doutoramento, disponibilizados, em plataformas digitais, como: *Elsevier*; *IEEE Xplore*; *Frontiers in Energy Research*; *SAGE journals*; *ResearchGate*; *Springer*; *MDPI*; *SLU*; e *DTU Library*.

A recolha dos elementos bibliográficos pertinentes foi conseguida através de pesquisa recorrendo, entre outros, aos motores de busca, *Google Scholar*, *B-on* e *Tethys*.

A análise do estado da arte da avaliação de ciclo de vida de conversores de energia das ondas (CEO), demonstrou que, existem apenas, dez estudos, a diversos tipos de dispositivos, entre eles:

- *Buoy-Rope-Dum (BRD)* (Zhai et al., 2018);
- *CorPower Ocean AB* (Pennock et al., 2022);
- *MegaRoller* (Apolonia & Simas, 2021);
- *Oyster 1* (Walker & Howell, 2011);
- *Oyster 800* (Karan et al., 2020);
- *Pelamis* (Parker et al., 2007; Thomson et al., 2011, 2019a);
- *Wave Star* (Dalton et al., 2014);
- Para além destes elementos bibliográficos, distingue-se um estudo generalizado e comparativo a diversas tecnologias de energia oceânica (*Attenuator; Point Absorber; Oscillating Wave Surge; Oscillating Water Column; Overtopping Device; Submerged Pressure Differential; Rotating Mass; etc.*), que se encontram catalogadas pela *European Commission's Joint Research Centre (JRC)*, detentora de informação técnica detalhada de vários dispositivos de conversão de energia das ondas e marés (Uihlein, 2016).

Outros estudos de ACV foram encontrados, porém são inelegíveis para esta análise de estado de arte. Toma-se como exemplo, elementos literários dedicados aos dispositivos, *OBREC* (Patrizi et al., 2019) e *DEIM Point Absorber I&II* (Curto et al., 2018), devido ao facto de, realizarem uma avaliação parcial, do “berço-ao-local” (*‘cradle-to-site’*) e do “berço-ao-portão” (*‘cradle-to-gate’*), respetivamente.

Artigos científicos aplicados ao *Seabased* (Dahlsten, 2009) e *Wave Dragon* (Sørensen et al., 2007), apesar da sua contribuição para o início da realização de estudos neste domínio, não possuem informação suficiente, nem enquadramento semelhante, para possibilitarem a comparação com os trabalhos selecionados anteriormente referidos.

O estudo *MUP* (Elginos & Bas, 2017) considera um dispositivo de conversão conjunta de energia das ondas e eólica. Embora apresente uma análise completa, este trabalho não foi considerado, devido ao seu carácter sinérgico, que impediu a sua inserção na mesma categoria que os restantes.

Este alinhamento de estudos, reflete o estado de conhecimento dos potenciais impactos ambientais dos dispositivos CEO. É de mencionar que, vários dos artigos mencionados, detalham estudos que foram dedicados a dispositivos que, atualmente, estão desativados/desinstalados e/ou com projeto de desenvolvimento interrompido. De acordo com a plataforma *Tethys*, os dispositivos *Oyster 1*, *Oyster 800*, *Pelamis* e *Wave Star*, já não se encontram em operação. No entanto estes dispositivos contribuem com seis dos dez trabalhos selecionados. Exibe-se assim, um cenário em que estudos de ACV, ainda que recentes, já não correspondem a tecnologias em desenvolvimento, o que denota bem o carácter ainda exploratório e em constante mutação do sector.

A captura de energia mecânica da ondulação é considerada uma tecnologia que contribuirá fortemente para a descarbonização dos sistemas geração elétrica. Por essa razão, é frequentemente priorizada a análise de métricas que expressem esse potencial, destacando-se indicadores como, as emissões totais de dióxido de carbono equivalente [CO₂-eq] ao longo do ciclo de vida (*Global Warming Potential*), procura cumulativa de energia (*Cumulative Energy Demand*) e contributo líquido da produção sustentável de energia (*Energy and Carbon Payback Time*, respetivamente EPT e CPT). O período de retorno da energia e do carbono são importantes indicadores na avaliação do grau de aceitabilidade do recurso renovável.

O EPT representa o período de tempo que o sistema necessita de operar, de modo a produzir e igualar a quantidade de energia que foi consumida durante o seu ciclo de vida. Este indicador é calculado de acordo com a equação (1), onde a *Cumulative Energy Demand* representa a procura de energia primária ao longo de todas as fases consideradas na ACV e a *Annual Energy Produced*, a produção anual de energia do dispositivo. Os valores de EPT dependem principalmente da produção anual de energia, da vida útil do dispositivo e do tipo de materiais necessários (Apolonia & Simas, 2021).

$$\text{Energy Payback Time (EPT)} = \frac{\text{Cumulative Energy Demand}}{\text{Annual Energy Produced}} \quad (1)$$

O CPT estima o período necessário para que o dispositivo compense as emissões de carbono geradas ao longo dos processos do seu ciclo de vida de acordo com a equação (2). A quantidade de emissões de carbono evitada pelo CEO (*Annual CO₂-eq avoided*) é calculada com base na média anual das emissões de carbono da rede elétrica específica do local de operação (Apolonia & Simas, 2021).

$$\text{Carbon Payback Time (CPT)} = \frac{\text{Global Warming Potential}}{\text{Annual CO}_{2\text{-eq}} \text{ avoided}} \quad (2)$$

Neste sentido, para cada um dos estudos selecionados, foi averiguar-se quais os resultados para estas métricas e qual o número de categorias de impacto contempladas nos mesmos. De forma a consolidar a informação e relacionar os resultados, elaborou-se o Quadro 3.1, no qual se apresenta o nome de cada dispositivo e o tipo de tecnologia de aproveitamento energético.

A revisão da literatura publicada, como exposto no Quadro 3.1, revelou um intervalo de potencial de aquecimento global entre 15 gCO₂-eq/kWh a 105 gCO₂-eq/kWh [9] e uma *Cumulative Energy Demand*, a variar entre 236 kJ/kWh [4] e 891 kJ/kWh [5a]. O indicador *Energy Payback Time* varia entre 12 meses [4] a 62 meses [2] enquanto, o *Carbon Payback Time* estabelece-se entre os 8 meses [4] e 31 meses [5a]. Informação adicional sobre as fontes consultadas pode ser encontrada no Anexo A.

Comparando os principais sistemas de geração de eletricidade em Portugal, os sistemas fósseis, (carvão e gás natural, 965 gCO₂-eq/kWh e 444 gCO₂-eq/kWh, respetivamente), causam um impacto muito mais significativo para o aquecimento global. Já os sistemas renováveis, (hidroelétrica – 4-14 gCO₂-eq/kWh; eólica – 16 gCO₂-eq/kWh; solar – 50 gCO₂-eq/kWh), têm uma menor contribuição para o aquecimento global (Kabayo et al., 2019). Apesar dos CEO apresentarem valores mais elevados, estas tecnologias ainda se encontram em fase de amadurecimento, expectando-se que futuramente sejam mais competitivas. A integração dos CEO na geração de eletricidade em Portugal contribuirá para a redução da utilização de sistemas fósseis e para a estabilidade do sistema de geração dado o maior grau de previsibilidade dos estados de agitação marítima face ao recurso eólico.

A grande maioria dos estudos ACV, fundamentalmente os mais recentes, considera uma gama mais alargada de categorias de impacto, enquanto os restantes, desenvolvem uma auditoria energética e estimativa de emissões de carbono ao sistema de conversão [4; 6; 10]. Relativamente, ao tempo de vida útil e material construtivo mais significativo dos dispositivos, apurou-se uma coerência entre os autores, de 20 anos (excetuando o primeiro estudo realizado ao *Oyster I* [4], que assume 15 anos) e o aço com as quantidades mais elevadas, sendo a única exceção o *Mega Roller* [3], onde o cimento é o material mais utilizado (cerca de 70% da massa total - (Apolonia & Simas, 2021)). A conclusão unânime a todos os trabalhos consultados é o reconhecimento da fase do ciclo de vida, materiais e manufatura, como a maior contribuidora de impactes.

Salienta-se os diversos estudos realizados aos dispositivos *Oyster* [4-5b] e *Pelamis* [6-8], que retratam manifestamente a divergência de resultados (com igual consideração de dados/informação), realçando assim, o impacto das suposições, âmbito e métodos aplicados nos estudos ACV. As diretrizes para aplicação desta metodologia, evidenciam a importância dos procedimentos a adotar na comparação de resultados entre diversos estudos. Esta averiguação

só deve ocorrer, caso tenham sido adotadas as mesmas condições de estudo (*i.e.*, âmbito, limites de sistema, suposições), para ambos os dispositivos sujeitos a ACV (Pennock et al., 2022). O rigor na execução da fase de análise de sensibilidade e incerteza é fulcral para reduzir a instabilidade e melhorar o nível de fiabilidade global dos resultados (Zhai et al., 2021). *Uihlein (2016)* e *Pennock et al. (2022)* defendem, que os próximos estudos ACV devem focar-se em conjuntos otimizados de conversores de energia das ondas (*arrays*), com intuito de apurar de forma mais convincente os impactes ambientais de CEO, num registo de grande escala, onde prepondera a partilha de componentes e operações (*e.g.*, cabos, subestações, instalação, manutenção e atividades de desmantelamento).

Quadro 3.1 - Análise do estado da arte da avaliação de ciclo de vida a conversores de energia das ondas.

	Referência bibliográfica	Nome do dispositivo	Número de dispositivos e tecnologia de conversão	Número de Categorias de Impacte consideradas	Cumulative Energy Demand [kJ/kWh]	Energy Payback Time [meses]	Global Warming Potential [gCO ₂ eq/kWh]	Carbon Payback Time [meses]
1	(Zhai et al., 2018, 2021)	<i>Buoy-Rope-Dum (BRD)</i>	1 – Point Absorber	18 – Várias	387	26	89	23
2	(Pennock et al., 2022)	<i>CorPower Ocean AB</i>	28 – Point Absorber	19 – Várias	340 - 680	31-62	25,1 – 46,0	-
3	(Apolonia & Simas, 2021)	<i>MegaRoller</i>	1 – Oscillating wave surge converter	18 – Várias	432	29	33,8	28
4	(Walker & Howell, 2011)	<i>Oyster 1</i>	1 – Oscillating wave surge converter	2 - Embodied Energy and Carbon intensity	236	12	25	8
5a	(Karan et al., 2020)	<i>Oyster 1</i>		20 - Várias	891	45	79	31
5b	(Karan et al., 2020)	<i>Oyster 800</i>			634	42	57	30
6	(Parker et al., 2007)	<i>Pelamis</i>	1 – Attenuator	2 - Embodied Energy and Carbon intensity	293	20	22,8	13
7	(Thomson et al., 2011)			19 – Várias	381	25	30	-
8	(Thomson et al., 2019b)			19 – Várias	493	33	35	24
9	(Uihlein, 2016)	Não aplicável	Várias tecnologias CEO	13 – Várias	—	—	15 – 105	—
10	(Dalton et al., 2014)	<i>Wave Star</i>	1 – Point Absorber	2 - Embodied Energy and Carbon intensity	536	36	47	20

3.2 Avaliação de impacto ambiental

As atividades antropogénicas têm contribuído intensivamente para a aceleração do processo de degradação ambiental. Esta é uma problemática sentida a nível global, amplamente reconhecida pelas comunidades, capaz de provocar impactos negativos nos ecossistemas, na biodiversidade, na produção agrícola, na qualidade da água potável e no equilíbrio das condições climáticas. Este estado de reconhecimento foi atingido gradualmente, tendo culminado no ajustamento legal aos novos cenários e, conseqüentemente na forçosa alteração de hábitos de vida das comunidades modernas. Apesar dos marcos de consciencialização alcançados em algumas comunidades, existe uma necessidade constante de rever e reimplementar planos e estratégias para combater o agravamento do estado ambiental mundial.

A Avaliação de Impacte Ambiental (AIA) é um instrumento de carácter preventivo da política de ambiente e de sustentabilidade, consagrado, no artigo 18.º da Lei de Bases do Ambiente (Lei n.º 19/2014, de 14 de abril). O Decreto-Lei nº151-B/2013, alterado e republicado pelo Decreto-Lei n.º 152-B/2017, estabelece o atual regime jurídico da avaliação de impacto ambiental (RJAIA), para todo o território nacional e zonas marítimas, dos projetos públicos e privados suscetíveis de produzirem efeitos significativos no ambiente, transpondo a Diretiva n.º 2014/52/EU para o direito nacional.

A Diretiva Comunitária de Impacte Ambiental (Diretiva 85/337/CEE) foi estabelecida em 1985, com o desígnio de sujeitar projetos ou ações à obrigatoriedade de execução de Estudos de Impacte Ambiental (EIA). Este documento legal foi transposto para o direito nacional apenas em 1990, estabelecendo os princípios fundamentais da AIA, dando relevo ao princípio da prevenção e à participação ativa dos cidadãos.

A AIA, vigente numa multiplicidade de países, consiste num processo de identificação, previsão, avaliação e mitigação, dos potenciais efeitos, diretos e indiretos, que um determinado empreendimento é suscetível de causar nos sistemas naturais e sociais, durante as fases de planeamento, implantação, operação e desmantelamento. Entende-se como impacto ambiental, todas as potenciais alterações, positivas ou negativas, resultantes das intervenções humanas sobre uma dada componente (*e.g.*, física, ecológica, cultural, social e económica), durante um certo período e num determinado local geográfico, em comparação com o estado da situação sem execução da ação.

Os possíveis efeitos adversos significativos sobre o património natural e socioeconómico devem ser avaliados de forma integrada na tomada de decisão da execução de empreendimentos e possíveis alternativas aos mesmos, com intuito de averiguar a sua viabilidade ambiental. Instituir medidas para evitar, minimizar ou compensar esses impactos, bem como, a definição

de um processo de verificação para apuramento da eficácia das medidas adotadas (monitorização) são estratégias basilares no desenvolvimento sustentável e económico. A adoção de AIA reduz a necessidade de proceder, à posteriori, a ações corretivas e de recuperação ambiental.

3.2.1 Processo metodológico de avaliação de impacto ambiental

Um sistema de AIA caracteriza-se como um processo de fases sequenciais interdependentes, assente no quadro legal, onde vigoram as diretrizes fundamentais e respetivas normas específicas a cada tipologia de projeto. Os órgãos intervenientes ocupam-se de diversas responsabilidades durante as várias etapas, resultando uma série de produtos, que refletem os resultados das atividades envolvidas no processo. Na Figura 3.3 esquematiza-se esta metodologia, expondo o objetivo de cada fase, o produto resultante das mesmas e as entidades competentes envolvidas.

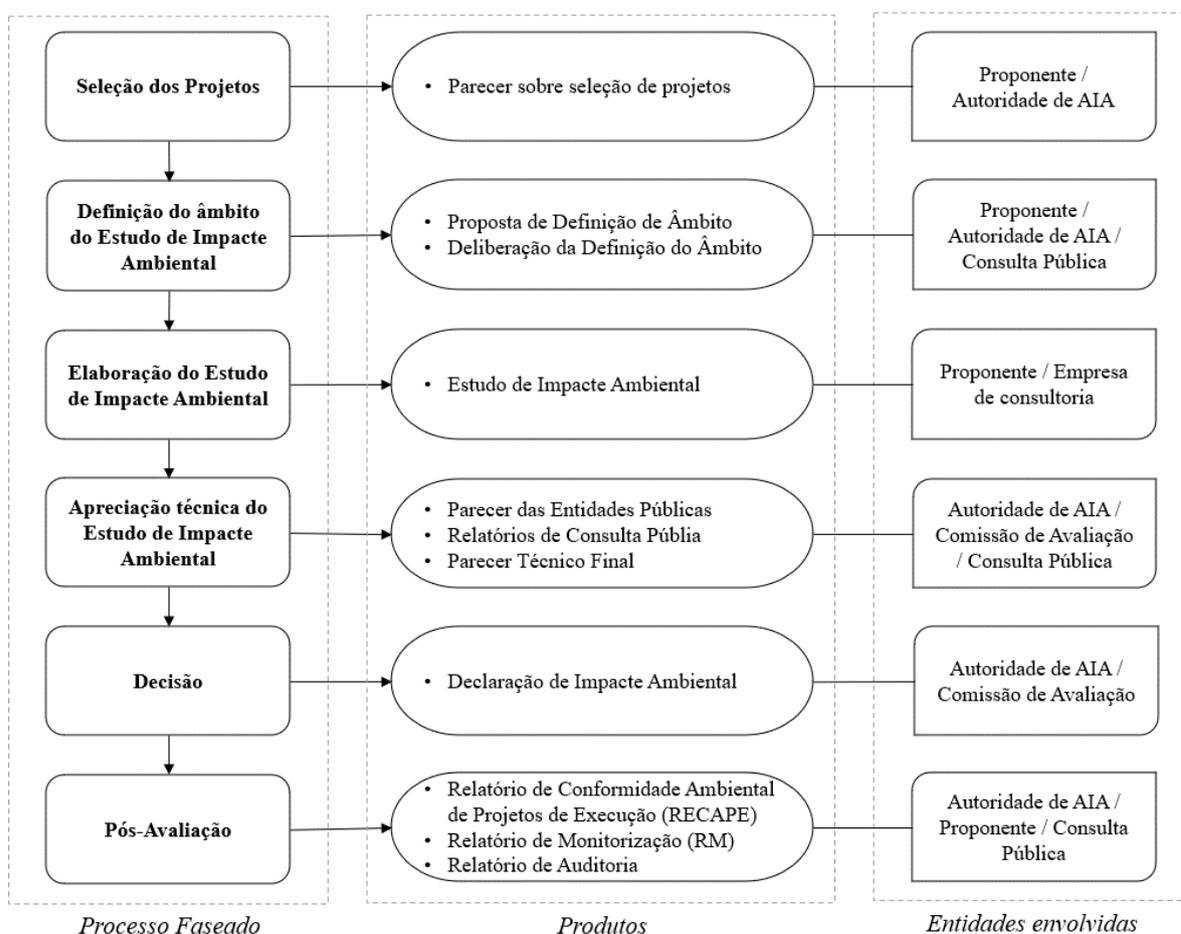


Figura 3.3 - Processo metodológico de AIA para o quadro legal nacional. [Fonte: Adaptado de (CCDR-LVT@, 2022)]

O RJIA determina a sujeição à AIA, de todos os projetos suscetíveis de causar impactos significativos no meio ambiente. O Decreto-Lei n.º 152-B/2017, nos seus anexos I e II, lista à priori, um conjunto de tipologias de projetos que apresentam limiares e critérios fixados para sujeição obrigatória à AIA. Não obstante, projetos que não se enquadrem nas condições previstas nos anexos anteriores, com base na Análise Caso a Caso (nos termos do artigo 3.º do RJIA), podem ser sujeitos à realização de AIA. A elegibilidade é atribuída tendo em consideração as características do projeto – a sua localização, dimensão, natureza, atividades secundárias associadas – e a suscetibilidade que este pode provocar sobre o ambiente em que se insere.

Os projetos que afetem, total ou parcialmente, áreas sensíveis, apresentam geralmente limiares de referência e encargos mais exigentes, em comparação com os restantes que se posicionem no caso geral. A instituição de restrições com incidência territorial, com finalidade de salvaguardar interesses públicos (ambiente, património cultural, saúde e segurança), resultaram na definição de áreas classificadas, com limitações na ocupação e/ou utilização das mesmas. Nesta matéria, entende-se como «áreas sensíveis»: as áreas protegidas; sítios da Rede Natura 2000; zonas de proteção de património classificado ou em vias de classificação; entre outras (*e.g.*, Reserva Agrícola Nacional e Reserva Ecológica Nacional) (APA@, 2021).

A fase de seleção dos projetos compreende as ações de averiguação e identificação das propostas de desenvolvimento, para as quais se torna necessário a execução de AIA. A Agência Portuguesa do Ambiente (APA), como entidade de autoridade de AIA competente, desenvolveu o *SILiAmb* – Sistema Integrado de Licenciamento do Ambiente, «uma plataforma onde os cidadãos e as empresas podem apresentar pedidos de licenciamento e comunicar dados à APA, dando cumprimento às suas obrigações na área do ambiente» (APA@, 2022). A verificação da aplicabilidade do RJIA deve ser simulada pelo proponente do projeto na plataforma *SILiAmb* e, caso resulte em elegibilidade, a submissão da documentação necessária (APA@, 2021). O parecer de sujeição a AIA é emitido pela autoridade de AIA, genericamente a APA para projetos do Anexo I e as Comissões de Coordenação e Desenvolvimento Regional (CCDR) para projetos do Anexo II, por via objetiva. No caso de pedido de Análise Caso a Caso, por via subjetiva, a autoridade AIA pode consultar outras entidades licenciadoras, com competência na gestão da área classificada em causa, para decisão sobre sujeição.

Subsequentemente, a Definição do âmbito do EIA prende-se no apuramento e seleção dos potenciais impactos ambientais que o projeto pode causar e que deverão ser objeto do EIA. Na Proposta de Definição do Âmbito (PDA) do EIA, são expostos os objetivos e caracterização do projeto (incluindo descrição de possíveis alternativas), bem como, os planos metodológicos para caracterização do ambiente, identificação e avaliação dos impactos e comparação de alternativas. No anexo III da Portaria n.º 395/2015, encontra-se a estrutura e conteúdo da PDA.

Esta é uma fase facultativa em Portugal desde o Decreto-Lei n.º 69/2000, sendo por isso, uma ação voluntária do Proponente. Contudo, esta tem um grande interesse no processo de AIA, pois garante a qualidade e eficácia do EIA, viabilizando a participação ativa de entidades e público interessado, com o intuito de reduzir os potenciais conflitos de interesse durante o processo – consulta pública (Jesus et al., 2016). A PDA pode ser sujeita a consulta pública, por iniciativa do proponente ou por decisão da autoridade de AIA.

O EIA, em matéria de apoio à decisão, é o documento principal do processo de AIA, devendo por isso, ser elaborado minuciosamente por uma equipa multidisciplinar. O anexo V, do Decreto-Lei n.º 152-B/2017, expõe o conteúdo mínimo do EIA. Este deve conter uma descrição das características físicas, temporais e espaciais do projeto, as pressões ambientais geradas e alternativas razoáveis de conceção. Os métodos de predição e avaliação da significância dos impactos ambientais devem ser descritos e hierarquizados (efeitos diretos e indiretos, secundários e cumulativos, transfronteiriços, a curto, médio e longo prazos, permanentes e temporários, positivos e negativos) e acompanhados pelas medidas e técnicas de mitigação previstas, para evitar, prevenir, reduzir ou compensar os impactos negativos.

Após o Proponente apresentar o EIA, a autoridade de AIA nomeia, uma comissão de avaliação, composta por técnicos especializados, administração pública e/ou entidades privadas, para apreciação técnica do documento de apoio à decisão e organiza uma ação de participação pública, para auscultação das preocupações ambientais do público interessados. Esta fase é crucial para averiguação da qualidade do EIA, acautelando o rigor científico, a coerência nas metodologias adotadas e eficácia do processo (Jesus et al., 2016).

Tendo em consideração o parecer técnico final da Comissão de Avaliação, a autoridade de AIA emite e comunica ao Proponente a decisão sobre a viabilidade ambiental do projeto (favorável, condicionalmente favorável ou desfavorável) através da Declaração de Impacte Ambiental (DIA), que pode ocorrer em fase de estudo prévio, de anteprojecto, ou de projeto de execução. A DIA segue o modelo constante do anexo IV da Portaria n.º 395/2015 e inclui as medidas de gestão ambiental previstas no EIA, que devem ser cumpridas pelo Proponente.

A etapa de Pós-Avaliação tem como principal finalidade garantir o acompanhamento ambiental durante o desenvolvimento do projeto. A resposta do sistema ambiental às pressões causadas pela presença do empreendimento é avaliada considerando, caso aplicável, impactos impremeditados que poderão implicar a adaptação ou a adoção de novas medidas de gestão ambiental. O relatório de conformidade ambiental do projeto de execução (RECAPE) é elaborado fundamentalmente, com intuito de apurar a conformidade com a DIA, isto é, a manutenção das características iniciais do projeto que sustentaram a decisão favorável, bem como o cumprimento das condições impostas na mesma.

Os resultados das auditorias e do programa sistemático de observações, medições e registos a parâmetros ambientais potencialmente afetados pelo projeto, devem originar um Relatório de Monitorização (RM) e um Relatório de Auditoria (RA). Os respetivos relatórios devem ser remetidos à Autoridade de AIA, obedecendo ao estabelecido nos n.ºs 1 e 2 do anexo V da Portaria n.º 395/2015, para possibilitar a posterior verificação da magnitude e natureza dos impactes. Nesta fase do procedimento de AIA, o público pode reportar informação à Autoridade de AIA, exercendo a sua responsabilidade social face às preocupações ambientais. Os documentos resultantes são objeto de análise no que respeita aos impactes típicos da categoria de projeto em causa.

3.2.2 Avaliação de incidências ambientais

A Avaliação de Incidências Ambientais (AIncA) é um procedimento previsto no Decreto-Lei n.º 215-B/2012 que estabelece, no artigo 33.º-R, a obrigatoriedade de sujeição deste instrumento, aos projetos electroprodutores que utilizem fontes de energia renováveis, que não estejam abrangidos pelo RJAIA e cuja localização esteja previstas em áreas da Reserva Ecológica Nacional, Sítios da Rede Natura 2000 ou da Rede Nacional de Áreas Protegidas. A emissão de licenças de produção deve ser precedida da AIncA, «a realizar pela Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional (CCDR) territorialmente competente, com base num estudo de incidências ambientais apresentado pelo interessado tendo em consideração as políticas energéticas e ambientais vigentes». Excluem-se do âmbito de aplicação desta exigência: a produção de eletricidade em cogeração, a microprodução e miniprodução e a produção de eletricidade a partir da energia das ondas em zona-piloto.

No Estudo de Incidências Ambientais (EIncA) devem constar os impactes locais dos projetos e das respetivas instalações acessórias, com base nos descritores ambientais com potencial de serem afetados. Este documento deve compreender inclusive, as medidas de mitigação, monitorização e recuperação previstas para serem implementadas durante a fase de obra.

Os procedimentos e conteúdos de documentação a apresentar pelo proponente na AIA e AIncA são bastante análogos. Apesar do diploma em análise não prever formalmente uma avaliação faseada como ocorre na AIA, a aplicação do mesmo em cenário prático tende a transpor estes faseamentos nos procedimentos de AIncA.

3.2.3 Enquadramento no caso dos conversores de energia das ondas em Portugal

O licenciamento de projetos de energia renovável marinha tende a ser complexo e moroso, dificultando a implementação das tecnologias em meio oceânico e retardando o desenvolvimento do setor. As principais barreiras encontram-se na falta de transparência dos

procedimentos, na ausência de legislação específica para esta tipologia de projetos e no número elevado de entidades envolvidas a consultar (Jesus et al., 2016).

O RJAIA, em conteúdo de projetos de aproveitamento da energia de fontes renováveis, de entre os projetos elencados nos seus anexos I e II, contempla no último, de forma individualizada e com limiares próprios, parques eólicos e mini-hídricas. Esta situação resulta diretamente da pouca significância que os restantes projetos desta índole tinham na época em que os anexos foram discutidos e aprovados (década de 1980). Porém, este diploma prevê no seu anexo II - 3.a) – uma tipologia que pode integrar este tipo de projetos. No Quadro 3.2 expõe-se a descrição da tipologia de projeto passível de aplicação, bem como os seus limiares próprios no caso geral e em áreas sensíveis.

Quadro 3.2 - Tipologia de projeto 3.a) constante no anexo II do RJAIA e respetivos limiares. [Fonte: Transcrito do Decreto-Lei n.º 152-B/2017 de 11 de dezembro]

Tipologia de Projeto	Anexo II – Caso Geral	Anexo II – Áreas sensíveis
a) Instalações industriais destinadas à produção de energia elétrica, de vapor e de água quente (não incluídos no anexo I).	<u>AIA obrigatória:</u> Potência instalada ≥ 50 MW.	<u>AIA obrigatória:</u> Potência instalada ≥ 20 MW. <u>Análise caso a caso:</u> Todas as que não se encontrem abrangidas pelos limiares definidos para o caso geral.

Relativamente às instalações acessórias aos centros electroprodutores, o RJAIA abrange apenas as linhas de transporte de energia elétrica por cabos aéreos (anexo I – 19.; anexo II - 3. b)), com limiares previstos de acordo com o Quadro 3.3. No cenário dos projetos de aproveitamento de energia das ondas, o transporte é tipicamente realizado por cabos submarinos, com subestações em costa.

Quadro 3.3 –Tipologias de projeto constante no anexo I e II do RJAIA e respetivos limiares. [Fonte: Transcrito do Decreto-Lei n.º 152-B/2017 de 11 de dezembro]

Anexo I – Projetos abrangidos		
19 - Construção de linhas aéreas de transporte de eletricidade com uma tensão igual ou superior a 220 kV e cujo comprimento seja superior a 15 km.		
Tipologia de Projeto	Anexo II – Caso Geral	Anexo II – Áreas sensíveis
b) Instalações industriais destinadas à produção de energia elétrica, de vapor e de água quente (não incluídos no anexo I).	<u>AIA obrigatória:</u> Eletricidade: ≥ 110 kV e ≥ 10 km. Subestações com linhas ≥ 110 kV e área ≥ 1 ha.	<u>AIA obrigatória:</u> Eletricidade: ≥ 110 kV. Subestações com linhas ≥ 110 kV.

Os projetos não abrangidos pelo RJAIA e, cuja localização seja uma das previstas pelo Decreto-Lei n.º 215-B/2012, *i.e.*, Reserva Ecológica Nacional, Sítios da Rede Natura 2000 ou da Rede Nacional de Áreas Protegidas são sujeitos a um procedimento de AIncA. Na situação do projeto não necessitar de sujeição a nenhum dos dois regimes, há, no entanto, necessidade de parecer favorável sobre a localização do projeto, que deverá ser emitido pela CCDR territorialmente competente.

O surgimento do aproveitamento da energia das ondas em Portugal arrancou em 1991, com financiamento do programa JOULE (*Joint Opportunities for Unconventional or Longer-term Energies*), para fins de investigação e desenvolvimento. Em resultado desses estudos, proveio o projeto para construção da Central Piloto Europeia de energia das ondas, uma tecnologia de *Oscillating Water Column*, instalada em área costeira, no Porto Cachorro – ilha do Pico, arquipélago dos Açores (Falcão et al., 2020). Porém, devido a danos estruturais progressivos, a carência de mecanismos de financiamento para obras de recuperação e, ao facto de o projeto piloto já ter cumprido os seus objetivos de demonstração, a Direção do *WavEC* tomou a decisão de desativar a central (desconectada da rede elétrica desde abril de 2018) (Melo, 2018).

O largo da Aguçadora, na Póvoa de Varzim, tem-se destacado pela implementação de projetos de energia renovável *offshore*. Em julho de 2008, esta zona acolheu o projeto *Pelamis*, um contrato comercial de três unidades de conversores de energia, testado pela empresa escocesa *Pelamis Wave Power*. O processo de licenciamento deste parque de energia das ondas foi concluído em 2006, apoiado pela legislação nacional existente (Decreto-Lei n.º 254/99). Apesar da não obrigatoriedade de realização de AIA na altura de emissão de licença de operação, a avaliação foi realizada. Devido ao colapso financeiro da empresa *Enersis* (posteriormente, *Babcock & Brown*), em novembro de 2008, o parque para os *Pelamis* foi forçosamente desativado (Tethys@, 2014). Outro projeto relevante, que envolverá esta localização futuramente, concerne a instalação de um parque de CEO de escala comercial (*HiWave-5 project*), pela empresa *CorPower Oceans's* (CorPower@, 2022; Tethys@, 2021a).

Durante 2010 e 2014, a empresa *AWEnergy*, através de financiamento da UE, iniciou um projeto piloto, denominado *WaveRoller*, com intenção de instalar um dispositivo à escala 1:2 com um conjunto de três asas, no largo de Peniche. Estando o projeto localizado numa área da Rede Natura 2000, o mesmo foi sujeito a um procedimento de AIncA, tendo obtido uma licença ambiental após decisão de incidências ambientais favorável condicionada (Tethys@, 2016). Em 2017, a CE atribuiu um novo financiamento ao projeto. Após uma fase de otimização da tecnologia, um dispositivo à escala comercial foi instalado, a 820 metros de distância da costa de Peniche, que começou a produzir eletricidade em novembro de 2019 (WaveRoller@, 2021).

A *Ocean Plug* – Zona Piloto Portuguesa (ZPP), gerida pela empresa *ENONDAS*, recebeu do Estado Português, em 2010, uma concessão de 45 anos, para produção de energia das ondas. Esta iniciativa governamental, realçada pelo Decreto-Lei n.º 5/2008 de 8 de janeiro, envolveu «a delimitação de um espaço marítimo destinado a acomodar projetos de produção baseados na energia das ondas, em diferentes fases de desenvolvimento, onde os interessados pudessem estabelecer-se mediante procedimentos administrativos simplificados que envolvem, com dispensa de título de utilização do espaço marítimo, a emissão de licenças para a instalação e a exploração de instalações de produção e disponibilização de infraestruturas comuns de ligação às redes recetoras, incluindo o estabelecimento de corredor ou corredores de ligação da zona piloto à rede recetora» (Transcrito da Resolução de Conselho de Ministros n.81-A/2016, de 9 de dezembro), atraindo assim, para o País empresas promotoras e produtores de tecnologia. A ZPP foi estabelecida perto de S. Pedro de Moel, entre a Figueira da Foz e a Nazaré, abrangendo uma área de 320 km². Contudo, devido ao progresso da tecnologia eólica *offshore*, houve necessidade de rever a localização desta área piloto. Na sequência das decisões governamentais (Resolução do Conselho de Ministros n.º15/2016, de 9 de março e n.º81-A/2016, de 9 de dezembro), a ZPP de energia das ondas e eólica *offshore* foi realocada para o largo de Viana do Castelo (Tethys@, 2021b).

Apesar dos avanços significativos, a experiência do país no licenciamento de parques de aproveitamento de energia das ondas em escala comercial é ainda limitada. Os projetos existentes têm ainda pouca expressão no território marítimo e trata-se projetos de teste (piloto). Com efeito, na ausência de implementação destas instalações no mar, os documentos legais AIA/AIncA, ainda não estão disponíveis para consulta.

4 ANÁLISE DO POTENCIAL IMPACTE AMBIENTAL DOS CONVERSORES DE ENERGIA DAS ONDAS

O presente capítulo será dedicado à análise dos potenciais impactes ambientais de diversos tipos de conversores de energia das ondas no meio marinho. Serão analisadas três tecnologias: *Point Absorber*; *Oscillating Wave Surge Converter* e *Submerged Pressure Differential*, tal como se apresenta nos Anexo B, Anexo C e Anexo D, respetivamente. A escolha destas tecnologias procurou contemplar diferentes posicionamentos na coluna de água, sendo condicionada pela já referida escassez de informação bibliográfica com ACV completas *i.e.*, compreendendo a instalação, operação, manutenção e desmantelamento (ver secção: 3.1.2 Revisão da bibliografia sobre análise de ciclo de vida de conversores de energia das ondas).

A análise tem como finalidade não só caracterizar ambientalmente os dispositivos envolvidos, como também, desenvolver uma comparação do ponto de vista do seu potencial impacte ambiental.

4.1 Descritores e hipóteses base

O método de identificação de impactes ambientais adotado foi a matriz de impactes, baseada e adaptada do guia para investigadores, desenvolvido pela EMEC - European Marine Energy Centre (EMEC, 2005). A matriz de interação criada expõe, nas linhas do quadro, as ações e elementos construtivos do sistema de CEO (*Stressors*), que têm potencial de afetar o ambiente marinho. Nas colunas do quadro, encontram-se as características ambientais que podem vir a ser afetadas (*Receptors*). Nas quadrículas do quadro, foram inscritas as estimativas dos potenciais impactes das relações causa-efeito (*Stressors-Receptors*).

Atendendo à intenção de comparar as diversas tecnologias em análise, estabeleceram-se alguns parâmetros de uniformização, sendo eles:

- a área e volume de ocupação;
- a localização de operação (zona próxima da costa – *nearshore*, baixa profundidade (10-30 m) e, em zona não-sensível);
- o tempo útil de vida de 20 anos;
- a duração total acumulada das fases de instalação e desinstalação de 0,5 anos;
- a duração total acumulada das fases de manutenção de 1,5 anos (Pennock et al., 2022);

- os navios utilizados nas diversas fases (tipologia, dimensão e consumo de combustível convencionais).

A metodologia adotada para a análise dos potenciais impactes ambientais das três tecnologias de conversão de energia das ondas consiste num método semi-quantitativo integrado numa matriz de interações.

Os potenciais efeitos ambientais considerados, causados pelo dispositivo e operações associadas, estão identificados no Quadro 4.1. Estes são mecanismos pelos quais os impactes podem ocorrer, sendo associados às quadriculas, de forma a julgar as relações causa-efeito (*Stressors-Receptors*).

Quadro 4.1 - Predição dos potenciais efeitos ambientais.

Meio Físico	
F1	Ocupação da coluna de água
F2	Modificação fundo e sub-fundo marinho
F3	Ruído e vibrações
F4	Propagação de sinais de comunicação (radio frequências)
F5	Risco de contaminação do meio marinho
F6	Emissão de gases com efeito estufa gerados pela utilização de combustíveis
F7	Propagação de campos eletromagnéticos
F8	Extração da energia contida nas ondas e modificação do regime de propagação
F9	Efeito de proteção costeira
F10	Erosão hidráulica
F11	Descarbonização do setor energético e mitigação das alterações climáticas
Meio Biótico	
B1	Risco de emaranhamento (primário e secundário), aprisionamento e/ou colisão dos organismos
B2	Efeito de agregação de espécies (recifes artificiais) - aumento da densidade e biodiversidade de organismos – criação de habitats
B3	Colonização por espécies não-nativas
B4	Destruição de habitats
Meio Socioeconómico	
SE1	Interferências com a navegação e uso marítimo
SE2	Impactes visuais e paisagístico
SE3	Criação de postos de trabalho e desenvolvimento da economia local

A caracterização dos potenciais impactes ambientais foi realizada através dos descritores de classificação: sinal (positivo ou negativo), magnitude (elevada, moderada ou baixa) e significância (muito significativa, significativa ou pouco significativa). O sinal especifica o tipo de impacto, positivo (benéfico) ou negativo (prejudicial). A magnitude refere-se à intensidade

ou extensão da afetação. A significância traduz a importância ecológica ou social do meio afetado. Os possíveis conjuntos destes descritores foram associados a uma escala numérica e cromática, de acordo com o critério exposto no Quadro 4.2. De modo a incorporar a variável temporal na análise, os valores sofrem alterações de acordo com a fase do projeto. O período de duração de cada fase, em anos, é multiplicado pelos valores base correspondentes.

Quadro 4.2 - Critério de classificação do potenciais impactes.

Características do impacte	Valores base correspondentes
Muito Significativo: Impacte Negativo; Magnitude Elevada	$-3 \times t_i$
Significativo: Impacte Negativo; Magnitude Moderada	$-2 \times t_i$
Pouco Significativo: Impacte Negativo; Magnitude Baixa	$-1 \times t_i$
Nenhuma interação	0
Pouco Significativo: Impacte Positivo; Magnitude Baixa	$+1 \times t_i$
Significativo: Impacte Positivo; Magnitude Moderada	$+2 \times t_i$
Muito Significativo: Impacte Positivo; Magnitude Elevada	$+3 \times t_i$
Duração das fases do projeto	
t_1 : Fase de instalação/desinstalação (duração acumulada) = 0,5 anos	
t_2 : Fase de operação = 20 anos	
t_3 : Fase de manutenção (duração acumulada) = 1,5 anos	

A matriz está organizada por fases de projeto – instalação/desinstalação; operação e manutenção – que, por sua vez, estão seccionadas por componentes do sistema/atividades associadas às mesmas (*Stressors*). Uma classificação associada ao impacto geral de cada *Stressors* – ‘*Classificação (Stressors)*’ – é obtida através do somatório das estimativas atribuídas aos potenciais impactes considerados. De forma, a compreender o grau de impacto acumulado sobre os recetores, expôs-se no rodapé da matriz – ‘*Classificação (recetores)*’ – a classificação referente ao somatório das estimativas atribuídas aos potenciais impactes, que afetam um determinado recetor.

A classificação global da tecnologia é alcançada pela soma dos impactes gerais de cada *Stressor*, que serve de base de comparação desta análise.

4.2 Apresentação e discussão de resultados

Os potenciais impactos ambientais das três tecnologias de conversão de energia das ondas foram sumariados em três matrizes de análise, presentes nos anexos, com a seguinte organização: Anexo B: *Point Absorber* (PA); Anexo C: *Oscillating Wave Surge* (OWS); Anexo D: *Submerged Pressure Differencial* (SPD).

O Quadro 4.3 expõe os resultados provenientes da análise realizada às três tecnologias. De modo geral, as tecnologias classificam-se como sendo positivas do ponto de vista ambiental. A tecnologia *Submerged Pressure Differencial* tem a melhor classificação global. Tal deve-se principalmente ao facto de, durante a fase de operação, esta tecnologia não criar impacto visual e paisagístico.

A fase de operação é significativamente positiva devido ao potencial efeito de proteção costeira, agregação de espécies dos dispositivos, assim como o potencial de descarbonização do setor energético e mitigação das alterações climáticas, fomentado pelas tecnologias ao longo do seu período de exploração de energia das ondas. A fase de manutenção é a mais negativamente impactante, porém de forma pouco significativa, como se apresenta de seguida no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 - Resultado da análise realizada às três tecnologias.

Aspetos de análise	PA	OWS	SPD
Classificação global	+378	+457	+617,5
Classificação fase de instalação/desinstalação	-80,5	-81,5	-81
<i>Stressor</i> mais impactante negativamente	Transporte de elementos construtivos (navios) -26,5	Transporte de elementos construtivos (navios) -26,5	Transporte de elementos construtivos (navios) -26,5
Classificação fase de operação	+580	+660	+820
<i>Stressor</i> mais impactante negativamente	Sistema de ancoragem e linhas de fixação -240	Sistema de ancoragem e linhas de fixação -60	Sistema de ancoragem e linhas de fixação -120
Classificação fase de manutenção		-121,5	
<i>Stressor</i> mais impactante negativamente	Transporte (navios) = -72	Transporte (navios) = -72	Transporte (navios) = -72
Recetor mais prejudicado	Espécies pelágicas -138	Espécies pelágicas -118	Espécies pelágicas -58
Recetor mais beneficiado	Organismos de Bioincrustação (<i>Biofouling</i>) +213	Organismos de Bioincrustação (<i>Biofouling</i>) +253	Organismos de Bioincrustação (<i>Biofouling</i>) +233

De entre as questões ambientais identificadas, destacam-se como *stressors* mais impactantes as fases de instalação/desinstalação e de manutenção. Os trabalhos que envolvem o recurso a meios de transporte náuticos, têm o potencial de afetar negativamente os recetores considerados, em especial, as espécies marinhas (pelágicas, bentónicas e aves marinhas). Algumas das medidas mitigadoras dos impactos negativos causados por estes *stressors*, são:

- Evitar a instalação/desinstalação e manutenção dos dispositivos em períodos importantes para as espécies locais (p.e., migração, reprodução e desova);
- Preferenciar navios com melhor desempenho ambiental, reduzindo assim o transporte com base na queima de combustíveis fósseis;
- Otimizar a necessidade de manutenção, com vista a reduzir a frequência e duração das mesmas e, conseqüentemente, a diminuição do tráfego naval.

Na fase de operação, o *stressor* mais impactante negativamente, é o ‘sistema de ancoragem e linhas de fixação’. Os recetores mais afetados são as espécies marinhas, devido ao risco de colisão, emaranhamento e aprisionamento que estas ligações podem causar a estes seres. O grau de incerteza relativamente a esta problemática, levou a considerar estes elementos construtivos como potenciais *stressors* significativos no meio aquático. A ocupação da coluna de água por este sistema de fixação é superior na tecnologia PA, sendo por isso, a que apresenta classificação mais negativa, em comparação com as restantes. O sistema de ancoragem da tecnologia OWS foi identificado como sendo o menos impactante. Tal deve-se ao facto de o mesmo contar com a fixação apenas sobre o fundo e sub-fundo oceânico, dispensando o uso de linhas de fixação, evitando assim o risco de emaranhamento e aprisionamento das espécies. Realça-se de seguida, alguns aspetos a considerar para reduzir o impacto dos sistemas de ancoragem e fixação dos CEO:

- Evitar a utilização de linhas de fixação suspensas na coluna de água. No caso de as mesmas serem imprescindíveis (tecnologias flutuantes), tensionar e monitorizar frequentemente estes elementos;
- Reconhecer as condições oceanográficas do local, priorizando pontos de ancoragem e fixação que afetem o menos possível a fauna e flora presente na área de implementação, evitando zonas sensíveis referenciadas.

A nível dos recetores físicos, os mais beneficiados com a presença destas tecnologias, são a ‘paisagem’, devido potencial efeito de proteção costeira e conseqüente mitigação da erosão costeira e ‘atmosfera’ pela descarbonização do setor energético e mitigação das alterações climáticas. No meio biótico, a presença destes dispositivos e ocupação destes na coluna de água, fomenta o aparecimento de ‘organismos de bioincrustação (*Biofouling*)’, sendo por isso o

recetor com classificação positiva mais elevada. A nível socio económico, os ‘residentes e comunidades’ são o recetor que mais é favorecido com as tecnologias, resultado da capacidade da indústria que as envolve, de gerar postos de trabalho e desenvolvimento da economia local. Relativamente, às atividades de exploração dos recursos do mar (‘Outras atividades da economia do mar’), as mesmas são afetadas, porém, com pouca significância.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

O carácter ainda exploratório dos dispositivos de CEO tem conduzido a uma rápida modificação das tecnologias em concurso no sector, dificultando a acumulação de suficiente informação reativa ao impacto ambiental destas tecnologias no meio marinho. Não obstante, a análise bibliográfica efetuada permitiu identificar um total de 85 documentos, sendo que, 48 são artigos, 13 são relatórios de organizações, 9 de instituições e 15 referem-se a sites na internet. Os documentos cobrem dispositivos do tipo *Point Absorber*, *Oscillating Wave Surge*, *Attenuator*, *Oscillating Water Column* e *Overtopping device*, verificando-se uma predominância de dispositivos do tipo *Point Absorber* seguida pelos *Oscillating Wave Surge*. O levantamento e organização deste espólio bibliográfico pretende constituir-se como uma primeira forma de contribuição para o estudo da temática em apreço.

A revisão da literatura apurou dez estudos com avaliações de ciclo de vida completas (*‘cradle-grave’*) a tecnologias e dispositivos de conversão de energia das ondas. Esta revelou um intervalo de potencial de aquecimento global entre 15 gCO₂.eq/kWh a 105 gCO₂.eq/kWh e uma *Cumulative Energy Demand* a variar entre 236 kJ/kWh e 891 kJ/kWh. O indicador *Energy Payback Time*, varia entre 12 e 62 meses, enquanto o *Carbon Payback Time*, estabelece-se entre os 8 e 31 meses. Comparando com os principais sistemas de geração de eletricidade reportados na literatura, *e.g.* (Garcia *et al.*, 2014), (Kaybayo *et al.*, 2019), verifica-se que os sistemas fósseis causam um impacto muito mais significativo para o aquecimento global, enquanto os sistemas renováveis, fluviais, eólicos e solares, apresentam um impacto comparável ao dos CEO. No que respeita à relação entre os recursos energéticos consumidos e correspondente energia produzida, verifica-se que no atual estágio de desenvolvimento os CEO são comparáveis à tecnologia solar fotovoltaica, mas apresentam pior desempenho que as tecnologias hidroelétricas fluviais e eólicas.

Relativamente aos impactos no meio marinho concluiu-se que os aspetos mais frequentemente referidos, nos trabalhos consultados, foram o ruído subaquático, seguido dos campos eletromagnéticos, alterações do habitats bentónicos e pelágicos, alterações dos sistemas oceanográficos, impactos paisagísticos, sociais e económicos e, por fim, o encontro dos animais marinhos com o dispositivo.

É de referir que o fabrico de CEO também implica impactos fora do meio marinho, *i.e.* no meio terrestre e na atmosfera, no entanto sendo gerais a outros tipos de tecnologias (*e.g.* torres eólica) não foram enfatizados deste trabalho.

Em todos os trabalhos consultados a fase do ciclo de vida referente a 'materiais e manufatura', é reconhecida como sendo a que mais contribuiu para os impactos ambientais.

Relativamente à análise comparativa de CEO efetuada neste trabalho, demarcou-se como mais favorável do ponto de vista de impactos ambientais marinhos o dispositivo com a tecnologia do tipo *Submerged Pressure Diferencial*.

5.2 Notas e pistas para futuros desenvolvimentos

No presente estudo foi apenas considerada a componente de impacto ambiental. No entanto, outras componentes como por exemplo a rentabilidade económica e financeira são necessárias para de uma forma global identificar verdadeiramente a solução mais favorável. Sugere-se por isso no futuro continuar o estudo presente, estendendo a análise a estas novas componentes.

Na análise comparativa apresentada no Capítulo 4, sugere-se introduzir aspetos de impacto ambiental não marinhos e reavaliar qual a solução mais vantajosa perante o identificado.

.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abanades, J., Flor-Blanco, G., Flor, G., & Iglesias, G. (2018). Dual wave farms for energy production and coastal protection. *Ocean and Coastal Management*, *160*, 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.03.038>
- Abanades, J., Greaves, D., & Iglesias, G. (2014). Wave farm impact on the beach profile: A case study. *Coastal Engineering*, *86*, 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.01.008>
- Adams, T. P., Miller, R. G., Aleynik, D., & Burrows, M. T. (2014). Offshore marine renewable energy devices as stepping stones across biogeographical boundaries. *Journal of Applied Ecology*, *51*(2), 330–338. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12207>
- Akar, S., & Akdoğan, D. A. (2016). Environmental and economic impacts of wave energy: Some public policy recommendations for implementation in Turkey. *Handbook of Research on Green Economic Development Initiatives and Strategies*, 285–309. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-0440-5.ch013>
- Alexander, K. A., Meyjes, S. A., & Heymans, J. J. (2016). Spatial ecosystem modelling of marine renewable energy installations: Gauging the utility of Ecospace. *Ecological Modelling*, *331*, 115–128. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.01.016>
- APA@. (2021). *Aplicabilidade do regime jurídico de AIA*. Agência Portuguesa Do Ambiente. Consultado em 09/08/2022. <https://apambiente.pt/avaliacao-e-gestao-ambiental/aplicabilidade-do-regime-juridico-de-aia>
- APA@. (2022). *O que é o SILiAmb? | Apoio SILiAmb*. Agência Portuguesa Do Ambiente. Consultado em 09/08/2022. <https://apoiosiliamb.apambiente.pt/content/o-que-é-o-siliamb?language=pt-pt>
- Apolonia, M., & Simas, T. (2021). Life cycle assessment of an oscillating wave surge energy converter. *Journal of Marine Science and Engineering*, *9*(2), 1–17. <https://doi.org/10.3390/JMSE9020206>
- AWATEA. (2008). Environmental Impacts of Marine Energy Converters. In *Aotearoa Wave and Tidal Energy Association (AWATEA)*.
- Bahaj, A. S. (2011). Generating electricity from the oceans. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*(7), 3399–3416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.032>
- Bald, J., Campo, A., Franco, J., Galparsoro, I., González, M., Liria, P., Muxika, I., Rubio, A., Solaun, O., Uriarte, A., Comesaña, M., Cacabelos, A., Fernández, R., Méndez, G., Prada, D., & Zubiate, L. (2010). Protocol to develop an environmental impact study of wave energy converters. *Revista de Investigación Marina*, *17*(5), 62–138.

<https://www.researchgate.net/publication/258331271%0AProtocol>

- Benjamin, S., Hamois, V., Smith, H. C. M., Johanning, L., Greenhill, L., Carter, C., & Wilson, B. (2014). Understanding the potential for marine megafauna entanglement risk from marine renewable energy developments. In *Scottish Natural Heritage Commissioned Report* No. 791. https://www.researchgate.net/publication/265160566_Understanding_the_potential_for_marine_megafauna_entanglement_risk_from_marine_renewable_energy_developments/references
- Causon, P. D., & Gill, A. B. (2018). Linking ecosystem services with epibenthic biodiversity change following installation of offshore wind farms. *Environmental Science and Policy*, 89, 340–347. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.08.013>
- CCDR-LVT@. (2022). *Fases da Avaliação de Impacte Ambiental (AIA) - CCDR LVT*. Omissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional de Lisboa e Vale Do Tejo. Consultado em 24/08/2022. <https://www.ccdr-lvt.pt/ambiente/avaliacao-de-impacte-ambiental-aia/fases-da-avaliacao-de-impacte-ambiental-aia/>
- CE@. (2022). *REPowerEU: Ação europeia conjunta para uma energia mais acessível, segura e sustentável*. Comissão Europeia. Consultado em 28/08/2022. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/pt/ip_22_1511
- Chozas, J. F. (2013). *Technical and Non-Technical Issues towards the Commercialisation of Wave Energy Converters* [Aalborg University]. <https://doi.org/10.13052/rp-9788793102538>
- Coates, D. A., Kapasakali, D. A., Vincx, M., & Vanaverbeke, J. (2016). Short-term effects of fishery exclusion in offshore wind farms on macrofaunal communities in the Belgian part of the North Sea. *Fisheries Research*, 179, 131–138. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2016.02.019>
- Copping, A. E., & Hemery, L.G., E. (2020). OES-Environmental 2020 State of the Science Report: Environmental Effects of Marine Renewable Energy Development Around the World. In *Ocean Energy Systems (OES)*. <https://doi.org/10.2172/1632878>
- CorPower@. (2022). *CorPower completes Portugal test site preparation ahead of HiWave-5 marine installations*. CorPower Ocean. Consultado em 28/08/2022. <https://corpowersocean.com/corpower-completes-portugal-test-site-preparation-ahead-of-hiwave-5-marine-installations/>
- Cruz, E., Simas, T., & Kasanen, E. (2015). Discussion of the effects of the underwater noise radiated by a wave energy device - Portugal. *11th European Wave and Tidal Energy Conference*, 5. <https://doi.org/ISSN 2309-1983>
- Cruz, J. (2008). *Ocean Wave Energy: Current Status and Future Perspectives* (1st ed.).

Springer Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74895-3>

- Curto, D., Neugebauer, S., Viola, A., Traverso, M., Franzitta, V., & Trapanese, M. (2018). First life cycle impact considerations of two wave energy converters. *2018 OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans, OCEANS - Kobe 2018*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/OCEANSKOB.2018.8558855>
- Dahlsten, H. (2009). Life cycle assessment of electricity from wave power [Swedish University of Agricultural Sciences]. In *Department of Energy and Technology*. http://stud.epsilon.slu.se/5364/1/dahlsten_h_130321.pdf
- Dalton, G., Madden, D., & Daly, M. C. (2014). Life cycle assessment of the wavestar. *2014 9th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies, EVER 2014*. <https://doi.org/10.1109/EVER.2014.6844034>
- Dannheim, J., Bergström, L., Birchenough, S. N. R., Brzana, R., Boon, A. R., Coolen, J. W. P., Dauvin, J. C., De Mesel, I., Derweduwen, J., Gill, A. B., Hutchison, Z. L., Jackson, A. C., Janas, U., Martin, G., Raoux, A., Reubens, J., Rostin, L., Vanaverbeke, J., Wilding, T. A., Degraer, S. (2020). Benthic effects of offshore renewables: Identification of knowledge gaps and urgently needed research. *ICES Journal of Marine Science*, 77(3), 1092–1108. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz018>
- Degraer, S., Carey, D. A., Coolen, J. W., Hutchison, Z. L., Kerckhof, F., Rumes, B., & Vanaverbeke, J. (2020). Offshore wind farm artificial reefs affect ecosystem structure and functioning. A Synthesis. *Oceanography -The Official Magazine of the Oceanography Society*, 33(4), 48–57. <https://doi.org/https://doi.org/10.5670/oceanog.2020.405>
- Douglas, C. A., Harrison, G. P., & Chick, J. P. (2008). Life cycle assessment of the Seagen marine current turbine: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 222(1), 1–12. <https://doi.org/10.1243/14750902JEME94>
- Elginoz, N., & Bas, B. (2017). Life Cycle Assessment of a multi-use offshore platform: Combining wind and wave energy production. *Ocean Engineering*, 145, 430–443. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.09.005>
- EMEC@. (2012). *Wave Devices*. European Marine Energy Centre. Consultado em 09/04/2021. <https://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/>
- EMEC@. (2012). *Wave Developers*. European Marine Energy Centre. Consultado em 09/04/2021. <https://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-developers/>
- EMEC. (2005). *Environmental impact assessment (EIA) guidance for developers at the European Marine Energy Centre* (p. 22). European Marine Energy Centre. https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/EMEC_2005.pdf

- Falcão, A. (2020). O aproveitamento da energia das ondas. *Para Os Físicos e Amigos Da Física*, 43(1), 8. <https://www.spf.pt/magazines/GFIS/478/article/1772/pdf>
- Falcão, A., Sarmiento, A., Gato, L., & Brito-Melo, A. (2020). The Pico OWC wave power plant: Its lifetime from conception to closure 1986–2018. *Applied Ocean Research*, 98, 102104. <https://doi.org/10.1016/J.APOR.2020.102104>
- Freeman, M. C. (2020). Chapter 9 Supplementary Material: Social and Economic Data Collection for Marine Renewable Energy. In A.E. Copping and L.G. Hemery (Eds.). *Report for Ocean Energy Systems (OES)*, 154–174. <https://doi.org/10.2172/1633196>
- Guinée, J. B., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., Wegener Sleeswijk, A., Udo De Haes, H. a., de Bruijn, J. a., van Duin, R., & Huijbregts, M. a. J. (2001). Life cycle assessment: An operational guide to the ISO standards. In *III: Scientific background* (Issue May). https://www.universiteitleiden.nl/binaries/content/assets/science/cml/publicaties_pdf/new-dutch-lca-guide/part1.pdf
- Hauschild, M., Goedkoop, M., Guinee, J., Heijungs, R., Huijbregts, M., Joliet, O., Margni, M., & De Schryver, A. (2011). *Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context - based on existing environmental impact assessment models and factors (International Reference Life Cycle Data System - ILCD handbook)*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.278/33030>
- IEA@. (2020). *Global Energy Review: CO2 Emissions in 2020*. International Energy Agency. Consultado em 30/03/2021. <https://www.iea.org/articles/global-energy-review-co2-emissions-in-2020>
- IEC@. (2019). *IEC TS 62600-40:2019 | IEC Webstore*. International Electrotechnical Commission; International Electrotechnical Commission. Consultado em 20/07/2022. <https://doi.org/ISBN 978-2-8322-6926-8>
- IOS@. (2006a). *ISO 14040:2006 - Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework*. International Organization for Standardization. Consultado em 20/05/2022. <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- IOS@. (2006b). *ISO 14044:2006 - Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines*. International Organization for Standardization; International Organization for Standardization. Consultado em 02/05/2022. <https://www.iso.org/standard/38498.html>
- Jakubowska, M., Urban-Malinga, B., Otremba, Z., & Andrulowicz, E. (2019). Effect of low frequency electromagnetic field on the behavior and bioenergetics of the polychaete *Hediste diversicolor*. *Marine Environmental Research*, 150, 104766. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2019.104766>

- Jesus, J. de, Almodovar, M., & Simas, T. (2016). *Guia de licenciamento de projetos de energia renovável marinha em Portugal Continental*. Publicações WavEC. <https://www.wavec.org/contents/reports/guia-wavec-web1.pdf>
- JPI Oceans. (2022). *Call text: Underwater Noise in the Marine Environment Joint call for proposals*. https://jpi-oceans.eu/sites/jpi-oceans.eu/files/managed/Publications/files/jpioceans-underwater-noise-calltext-final-211220_0.pdf
- Kabayo, J., Marques, P., Garcia, R., & Freire, F. (2019). Life-cycle sustainability assessment of key electricity generation systems in Portugal. *Energy*, *176*, 131–142. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.166>
- Karan, H., Thomson, R. C., & Harrison, G. P. (2020). Full life cycle assessment of two surge wave energy converters. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, *234*(4), 548–561. <https://doi.org/10.1177/0957650919867191>
- Langhamer, O., Haikonen, K., & Sundberg, J. (2010). Wave power-Sustainable energy or environmentally costly? A review with special emphasis on linear wave energy converters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *14*(4), 1329–1335. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.016>
- Lavidas, G. (2018). Energy and socio-economic benefits from the development of wave energy in Greece. *Renewable Energy*, *132*, 1290–1300. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.007>
- Leopold, L. B., Clarke, F. E., Hanshaw, B. B., & Balsley, J. R. (1971). A procedure for evaluating environmental impact. In *US Geological Survey Circular* (Vol. 2). <https://doi.org/https://doi.org/10.3133/cir645>
- Liu, Y., Li, Y., He, F., & Wang, H. (2017). Comparison study of tidal stream and wave energy technology development between China and some Western Countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *76*, 701–716. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.03.049>
- Lopes de Almeida, J. P. P. G., & Santos Martinho, M. F. E. (2020). Experimental evaluation of the shore protection potential of the novel REEFS wave energy converter. *Ocean Engineering*, *217*(June), 107918. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107918>
- Manuilova, A., Suebsiri, J., & Wilson, M. (2009). Should Life Cycle Assessment be part of the Environmental Impact Assessment? Case study: EIA of CO₂ Capture and Storage in Canada. *Energy Procedia*, *1*(1), 4511–4518. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.02.269>
- Marques, P. A., Kabayo, J., Garcia, R., & Freire, F. (2018). Avaliação Ambiental de Ciclo de Vida dos principais sistemas de geração de eletricidade em Portugal. *LALCA: Revista Latino-Americana Em Avaliação Do Ciclo de Vida*, *2*(2 esp.), 110–127. <https://doi.org/10.18225/lalca.v2iespec.4467>

- Maxwell, S. M., Kershaw, F., Locke, C. C., Connors, M. G., Dawson, C., Aylesworth, S., Loomis, R., & Johnson, A. F. (2022). Potential impacts of floating wind turbine technology for marine species and habitats. *Journal of Environmental Management*, 307, 114577. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114577>
- Melo, A. B. (2018). Um olhar sobre a Central Piloto Europeia de energia das ondas na ilha do Pico. In *WavEc*. <https://www.wavec.org/contents/reports/brochura-central-do-pico-2018-3099.pdf>
- Mendoza, E., Lithgow, D., Flores, P., Felix, A., Simas, T., & Silva, R. (2019). A framework to evaluate the environmental impact of OCEAN energy devices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 440–449. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.060>
- Newton, K. C., Gill, A. B., & Kajiura, S. M. (2019). Electroreception in marine fishes: chondrichthyans. *Journal of Fish Biology*, 95(1), 135–154. <https://doi.org/10.1111/jfb.14068>
- O’Boyle, L., Elsässer, B., & Whittaker, T. (2017). Experimental measurement of wave field variations around wave energy converter arrays. *Sustainability (Switzerland)*, 9(1), 1–16. <https://doi.org/10.3390/su9010070>
- Ozkan, C., Perez, K., & Mayo, T. (2020). The impacts of wave energy conversion on coastal morphodynamics. *Science of the Total Environment*, 712, 136424. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136424>
- Parker, R. P. M., Harrison, G. P., & Chick, J. P. (2007). Energy and carbon audit of an offshore wave energy converter. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 221(8), 1119–1130. <https://doi.org/10.1243/09576509JPE483>
- Patrizi, N., Pulselli, R. M., Neri, E., Niccolucci, V., Vicinanza, D., Contestabile, P., & Bastianoni, S. (2019). Lifecycle environmental impact assessment of an overtopping wave energy converter embedded in breakwater systems. *Frontiers in Energy Research*, 7, 1–10. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00032>
- Pelc, R., & Fujita, R. M. (2002). Renewable energy from the ocean. *Marine Policy*, 26(6), 471–479. [https://doi.org/10.1016/S0308-597X\(02\)00045-3](https://doi.org/10.1016/S0308-597X(02)00045-3)
- Pennock, S., Vanegas-Cantarero, M. M., Bloise-Thomaz, T., Jeffrey, H., & Dickson, M. J. (2022). Life cycle assessment of a point-absorber wave energy array. *Renewable Energy*, 190, 1078–1088. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.010>
- Ramos, V., Giannini, G., Calheiros-cabral, T., Rosa-santos, P., & Taveira-pinto, F. (2021). Legal framework of marine renewable energy : A review for the Atlantic region of Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 110608. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110608>

- REN21. (2021). *Ren21*. https://www.ren21.net/reports/global-status-report/?gclid=CjwKCAjwsMGYBhAEEiwAGUXJab5YqlTIHe2KkZlBx-0j7svVRzumJ53ZNIIm8_zjAOkWECRFDyp88xoCI_YQAvD_BwE
- Robinson, S., & Lepper, P. (2013). Scoping study: Review of current knowledge of underwater noise emissions from wave and tidal stream energy devices. In *The Crown Estate*. <https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Crown-Estate-2013-Underwater-Noise-Emissions.pdf>
- Russell, I., Sorensen, H. C., & Bean, D. (2015). Environmental Impact Assessment of a Wave Energy Converter: A Review. *Wave Dragon Ltd Address*., 1689–1699.
- Scott, K., Harsanyi, P., & Lyndon, A. R. (2018). Understanding the effects of electromagnetic field emissions from Marine Renewable Energy Devices (MREDs) on the commercially important edible crab, *Cancer pagurus* (L.). *Marine Pollution Bulletin*, 131, 580–588. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.04.062>
- Sørensen, H. C., Naef, S., Anderberg, S., & Hauschild, M. Z. (2007). Life cycle assessment of the wave energy converter: Wave Dragon. *International Conference Ocean Energy - from Innovation to Industry*.
- Taormina, B., Bald, J., Want, A., Thouzeau, G., Lejart, M., Desroy, N., & Carlier, A. (2018). A review of potential impacts of submarine power cables on the marine environment: Knowledge gaps, recommendations and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 380–391. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.026>
- Taormina, B., Di Poi, C., Agnalt, A. L., Carlier, A., Desroy, N., Escobar-Lux, R. H., D'eu, J. F., Freytet, F., & Durif, C. M. F. (2020). Impact of magnetic fields generated by AC/DC submarine power cables on the behavior of juvenile European lobster (*Homarus gammarus*). *Aquatic Toxicology*, 220, 105401. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2019.105401>
- Tethys@. (2014). *Companhia da Energia Oceânica SA (CEO) - Aguçadoura | Tethys*. OES-Environmental. <https://tethys.pnnl.gov/project-sites/companhia-da-energia-oceanica-sa-ceo-agucadoura>
- Tethys@. (2016). *SURGE WaveRoller | Tethys*. OES-Environmental. Consultado em 24/08/2022. <https://tethys.pnnl.gov/project-sites/surge-waveroller>
- Tethys@. (2021a). *CorPower Ocean HiWave-5 Project | Tethys*. OES-Environmental. Consultado em 24/08/2022. <https://tethys.pnnl.gov/project-sites/corpower-ocean-hiwave-5-project>
- Tethys@. (2021b). *Ocean Plug: Portuguese Pilot Zone | Tethys*. OES-Environmental. Consultado em 24/08/2022. <https://tethys.pnnl.gov/project-sites/ocean-plug-portuguese-pilot-zone>

- Thomson, J., Talbert, J., de Klerk, A., Brown, A., Schwendeman, M., Goldsmith, J., Thomas, J., Olfe, C., Cameron, G., & Meinig, C. (2015). Biofouling effects on the response of a wave measurement buoy in deep water. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 32(6), 1281–1286. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-15-0029.1>
- Thomson, R. C., Chick, J. P., & Harrison, G. P. (2011). Full life cycle assessment of a wave energy converter. *IET Conference Publications*, 2011, 63. <https://doi.org/10.1049/cp.2011.0124>
- Thomson, R. C., Chick, J. P., & Harrison, G. P. (2019a). An LCA of the Pelamis wave energy converter. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(1), 51–63. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1504-2>
- Thomson, R. C., Chick, J. P., & Harrison, G. P. (2019b). An LCA of the Pelamis wave energy converter. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(1), 51–63. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1504-2>
- Tricas, T. C., & New, J. G. (1997). Sensitivity and response dynamics of elasmobranch electrosensory primary afferent neurons to near threshold fields. *Journal of Comparative Physiology - A Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 182(1), 89–101. <https://doi.org/10.1007/s003590050161>
- Uihlein, A. (2016). Life cycle assessment of ocean energy technologies. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(10), 1425–1437. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1120-y>
- Walker, S., & Howell, R. (2011). Life cycle comparison of a wave and tidal energy device. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 225(4), 325–327. <https://doi.org/10.1177/1475090211418892>
- Walter Klöpffer, B. G. (2014). *Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice* (p. 440). John Wiley & Sons. https://books.google.pt/books?id=NkRsAwAAQBAJ&hl=pt-PT&source=gbs_navlinks_s
- Wave Energy Centre. (2004). *Potencial e Estratégia de desenvolvimento da energia das ondas em Portugal*. http://www.energiasrenovaveis.com/images/upload/Relatorio_DGGE_ondas.pdf
- WaveRoller@. (2021). *About us – AW-Energy Oy*. Consultado em 24/08/2022. http://aw-energy.com/about_us/#companyhistory
- Wyman, M. T., Peter Klimley, A., Battleson, R. D., Agosta, T. V., Chapman, E. D., Haverkamp, P. J., Pagel, M. D., & Kavet, R. (2018). Behavioral responses by migrating juvenile salmonids to a subsea high-voltage DC power cable. *Marine Biology*, 165(8), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s00227-018-3385-0>

Zhai, Q., Li, T., & Liu, Y. (2021). Life cycle assessment of a wave energy converter: Uncertainties and sensitivities. *Journal of Cleaner Production*, 298, 126719. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.126719>

Zhai, Q., Zhu, L., & Lu, S. (2018). Life cycle assessment of a buoy-rope-drum wave energy converter. *Energies*, 11(9), 15. <https://doi.org/10.3390/en11092432>

ANEXO A – INFORMAÇÃO ADICIONAL DOS DISPOSITIVOS COM ACV COMPLETA

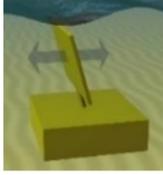
Device Name	Lifetime	Energy production	Rated Power Capacity	Life cycle stage with greatest environmental impact	Most significant material	LCA software/ LCI data sourced/ Life Cycle Impact Assessment (LCIA) method	Other information
<i>Buoy-Rope-Dum (BRD)</i>	20 years	Capacity factor: 20-50%	10 kW	Materials & Manufacturing	Steel: 10467 kg	SimaPro v8.3.0.0 / Ecoinvent v3 / ReCiPe v1.13 Midpoint (I)	<u>Location:</u> 2 km off the shore at Xiaoshi Island, Weihai, Shandong, China
<i>CorPower Ocean AB</i>	20 years	33 GWh/year (array) Capacity factor: 38%	Array rating: 10 MW Device rating: 350 kW	Materials & Manufacturing	Steel: 83% of total mass	SimaPro v9.1.0 / Ecoinvent v3.6 / ReCiPe v1.31 Midpoint (H)	<u>Location:</u> Aguçadora, Portugal <u>Distance from shore:</u> 10 km <u>Water depth:</u> 45,28 m
<i>MegaRoller</i>	20 years	2.1–3.2 GWh/year PTO efficiency: 88% Power efficiency (wave to wire): 25%	Nominal capacity: 1000 kW Average power: 320 kW	Materials & Manufacturing	Largely constructed from steel and cement. Concrete: 71% of the total mass	SimaPro v8.5.2 / Ecoinvent v3.4 / ReCiPe 2016 Midpoint	<u>Location:</u> Praia da Almagreira, Peniche, Portugal <u>Distance from shore:</u> 400 m <u>Water depth:</u> 8–20 m
<i>Oyster 1</i>	15 years	Lifetime net energy output of \cong 76.4 TJ	315 kW	—	—	Based on mass calculation of the materials used	<u>Location:</u> Cantabrian offshore site called Virgen del mar <u>Distance from shore:</u> 3–13 km
<i>Oyster 1</i>		Lifetime output: 28,8 GWh Capacity factor: 55%	315 kW	Materials & Manufacturing	Steel: >76% of total mass	SimaPro v8 / Ecoinvent v3.01 / EDIP2003 method	

<i>Oyster 800</i>	20 years	Lifetime output: 77,1 GWh Capacity factor: 55%	800 kW		Steel: >54% of total mass		<u>Water depth:</u> ~10 m
<i>Pelamis</i>	20 years	2,97 GWh/year	750 kW	Materials & Manufacturing	Steel: 561954 kg	Inventory of Carbon and Energy (ICE) - database compiled by the University of Bath SimaPro v7.2 PhD / Ecoinvent /EDIP 2003 method SimaPro v8.3 PhD / Ecoinvent v.3.3 /ReCiPe Midpoint & Cumulative Energy Demand (CED) method	<u>Location:</u> Aguaçadoura, Portugal <u>Water depths:</u> 50-100 m.
		2,97 GWh/year	750 kW	Materials & Manufacturing;			
		2,97 GWh/year Capacity factor: 45%	750 kW	Maintenance (sea vessel operations)			
Várias tecnologias CEO	—	Capacity factors: 20%	Nominal capacity: 500 – 1000 kW	Materials & Manufacturing	Steel: >45% (all device types, except overtopping devices) Concrete: \cong 55% (for overtopping devices). Weight ranges from 190 to 1270 t.	GaBi v6.4 / /9 diferent methods	<u>Average cable length:</u> 2980 m
<i>Wave Star</i>	20 years	1.93 GWh/year	1000kW	Cradle-to-gate (Raw Materials Extraction; Materials & Manufacturing; Assembly)	Steel: >90% of total mass	—	<u>Location:</u> Danish test station

ANEXO B – MATRIZ DOS POTENCIAIS IMPACTES DA TECNOLOGIA POINT ABSORBER

 Classificação global +378		RECETORES											CLASSIFICAÇÃO (STRESSOR)		
		Geologia/ Geomorfologia	Dinâmica sedimentar	Processos oceanográficos	Paisagem	Atmosfera	Organismos de bioincrustação (Biofouling)	Espécies pelágicas	Espécies bentónicas	Aves marinhas	Outras atividades da economia do mar	Atividades lúdicas, recreativas e turismo		Residentes e comunidades locais	
Fase de instalação/desinstalação (t₁ = 0,5 anos)															
ATIVIDADES/ COMPONENTE DO SISTEMA/ STRESSORS	Sistema de ancoragem e linhas de fixação	F2			SE2		B4	F1	F1	F1	F1	F1	F3	-39×t ₁ = -19,5	
								F3	F2	F3	SE1	SE1	SE2		
									B1	F3	B1	B4	B4		SE3
									B4	B1	B4				B4
	Cabo elétrico submarino de ligação à costa	F2			SE2		B4	F1	F1	F1	F1	F1	F3	-37×t ₁ = -18,5	
								F3	F2	F3	SE1	SE1	SE2		
								B1	F3	B1	B4		SE3		
								B4	B1						
	Dispositivo de conversão de energia das ondas				SE2		B4	F1	F3	F1	F1	F1	F3	-32×t ₁ = -16	
								F3	B4	F3	SE1	SE1	SE2		
								B1		B1	B4	B4	SE3		
								B4		B4			B4		
Transporte de elementos construtivos (navios)	F5		F5	SE2	F6		F1	F3	F1	F1	F1	F3	-53×t ₁ = -26,5		
							F3	F4	F3	F5	F5	F5			
							F4	F5	F4	SE1	SE1	F6			
							F5		F6			SE2			
Fase de operação (t₂ = 20 anos)															
Sistema de ancoragem e linhas de fixação	F10	F10	F10			F1	F1	F1	F1	F1	F1	B2	-12×t ₂ = -240		
			B2			B2	F3	F3	B1	B2	B2	B3			
			B3			B3	B1	B1	B2	B3					
							B2	B2		SE1					
Cabo elétrico submarino de ligação à costa						B2	F7	F7		F7			-1×t ₂ = -20		
							B2	B2		B2					
Dispositivo de conversão de energia das ondas	F11	F8	F8	F9	F11	F1	F1	F3	F1	F1	F1	F9	+42×t ₂ = +840		
		F9	F11	F11		F11	F3	F11	F3	F11	F8	F11			
		F11	B2	SE2		B2	F11	B2	F11	B2	F11	B2			
			B3			B3	B1	B3	B1	B3	B2	B3			
Fase de manutenção (t₃ = 1,5 anos)															
Sistema antifouling e corrosão	F5		F5			F5	F5	F5		F5	F5	F5	-21×t ₃ = -31,5		
												SE3			
Transporte (navios)	F5		F5	SE2	F6		F1	F3	F1	F1	F1	F3	-48×t ₃ = -72		
							F3	F4	F3	F5	F5	F5			
							F4	F5	F4	SE1	SE1	F6			
							F5		F6			SE2			
Equipamentos de monitorização							B1		B1			SE3	-12×t ₃ = -18		
							F1	F3	F1	F1	F1				
							F3	F4	F3	SE1	SE1				
							F4	B1	F4						
CLASSIFICAÇÃO (RECETOR)		+27	+40	+29,5	+93	+54	+213	-138	-71,5	-11,5	-24,5	-3,5	+170,5		

ANEXO C - MATRIZ DOS POTENCIAIS IMPACTES DA TECNOLOGIA OSCILLATING WAVE SURGE

 Oscillating Wave Surge Classificação global +457		RECETORES											CLASSIFICAÇÃO (STRESSOR)	
		Geologia/Geomorfologia	Dinâmica sedimentar	Processos oceanográficos	Paisagem	Atmosfera	Organismos de bioincrustação (Biofouling)	Espécies pelágicas	Espécies bentónicas	Aves marinhas	Outras atividades da economia do mar	Atividades lúdicas, recreativas e turismo		Residentes e comunidades locais
ATIVIDADES/ COMPONENTE DO SISTEMA/ STRESSORS	Fase de instalação/desinstalação (t₁ = 0,5 anos)													
	Sistema de ancoragem e linhas de fixação	F2			SE2		B4	F1	F1	F1	F1	F1	F3	-39×t ₁ = -19,5
								F3	F2	F3	SE1	SE1	SE2	
								B1	F3	B1	B4	B4	SE3	
								B4	B1				B4	
	Cabo elétrico submarino de ligação à costa	F2			SE2		B4	F1	F1	F1	F1	F1	F3	-37×t ₁ = -18,5
								F3	F2	F3	SE1	SE1	SE2	
								B1	F3	B1	B4		SE3	
								B4	B1					
	Dispositivo de conversão de energia das ondas				SE2		B4	F1	F1	F1	F1	F1	F3	-34×t ₁ = -17
								F3	F3	F3	SE1	SE1	SE2	
								B1	B1	B1	B4	B4	SE3	
								B4	B4	B4			B4	
	Transporte de elementos construtivos (navios)	F5		F5	SE2	F6		F1	F3	F1	F1	F1	F3	-53×t ₁ = -26,5
								F3	F4	F3	F5	F5	F5	
								F4	F5	F4	SE1	SE1	F6	
							F5		F6			SE2		
						B1		B1			SE3			
Fase de operação (t₂ = 20 anos)														
Sistema de ancoragem e linhas de fixação	F10	F10	F10			F1	F1	F1		F1	F1	B2	-3×t ₂ = -60	
			B2			B2	B1	B1	B2	B2	B2	B3		
			B3			B3	B2	B2		B3				
Cabo elétrico submarino de ligação à costa						B2	F7	F7		F7			-1×t ₂ = -20	
							B2	B2	B2	B2				
Dispositivo de conversão de energia das ondas	F11	F8	F8	F9	F11	F1	F1	F3	F1	F1	F1	F9	+37×t ₂ = +740	
		F9	F11	F11		F11	F3	F11	F3	F11	F8	F11		
		F11	B2	SE2		B2	F11	B2	F11	B2	F11	B2		
			B3			B3	B1	B3	B1	B3	B2	B3		
						B2		B2	SE1	SE2	SE2			
						B3					SE3			
Fase de manutenção (t₃ = 1,5 anos)														
Sistema antifouling e corrosão	F5		F5			F5	F5	F5		F5	F5	F5	-21×t ₃ = -31,5	
												SE3		
Transporte (navios)	F5		F5	SE2	F6		F1	F3	F1	F1	F1	F3	-48×t ₃ = -72	
							F3	F4	F3	F5	F5	F5		
							F4	F5	F4	SE1	SE1	F6		
							F5		F6			SE2		
							B1		B1			SE3		
Equipamentos de monitorização							F1	F3	F1	F1	F1		-12×t ₃ = -18	
							F3	F4	F3	SE1	SE1			
							F4	B1	F4					
							B1		B1					
CLASSIFICAÇÃO (RECETOR)		+7	+20	+29,5	+93	+54	+253	-118	-54	+29,5	-24	-3,5	+170,5	

ANEXO D - MATRIZ DOS POTENCIAIS IMPACTES DA TECNOLOGIA SUBMERGED PRESSURE DIFFERENTIAL

Submerged Pressure Differential  Classificação global +617,5		RECETORES											CLASSIFICAÇÃO (STRESSOR)	
		Geologia/Geomorfologia	Dinâmica sedimentar	Processos oceanográficos	Paisagem	Atmosfera	Organismos de bioincrustação (Biofouling)	Espécies pelágicas	Espécies bentónicas	Aves marinhas	Outras atividades da economia do mar	Atividades lúdicas e recreativas		Residentes e comunidades locais
Fase de instalação/desinstalação (t₁ = 0,5 anos)														
ATIVIDADES/ COMPONENTE DO SISTEMA/ STRESSORS	Sistema de ancoragem e linhas de fixação	F2			SE2		B4	F1	F1	F1	F1	F1	F3	-39×t ₁ = -19,5
								F3	F2	F3	SE1	SE1	SE2	
								B1	F3	B1	B4	B4	SE3	
								B4	B1				B4	
	Cabo elétrico submarino de ligação à costa	F2			SE2		B4	F1	F1	F1	F1	F1	F3	-37×t ₁ = -18,5
								F3	F2	F3	SE1	SE1	SE2	
								B1	F3	B1	B4		SE3	
								B4	B1					
	Dispositivo de conversão de energia das ondas				SE2		B4	F1	F1	F1	F1	F1	F3	-33×t ₁ = -16,5
								F3	F3	F3	SE1	SE1	SE2	
								B1	B1	B1	B4	B4	SE3	
								B4	B4	B4			B4	
Transporte de elementos construtivos (navios)	F5		F5	SE2	F6		F1	F3	F1	F1	F1	F3	-53×t ₁ = -26,5	
							F3	F4	F3	F5	F5	F5		
							F4	F5	F4	SE1	SE1	F6		
							F5		F6			SE2		
							B1		B1			SE3		
Fase de operação (t₂ = 20 anos)														
Sistema de ancoragem e linhas de fixação	F10	F10	F10			F1	F1	F1		F1	F1	B2	-6×t ₂ = -120	
			B2			B2	B1	B1	B2	B2	B2	B3		
			B3			B3	B2	B2		B3				
Cabo elétrico submarino de ligação à costa							B7	F7		F7			-1×t ₂ = -20	
						B2	B2	B2		B2				
Dispositivo de conversão de energia das ondas	F11	F8	F8	F9	F11	F1	F1	F3	F3	F1	F1	F9	+48×t ₂ = +960	
		F9	F11	F11		F11	F3	F11	F11	F11	F8	F11		
		F11	B2			B2	F11	B2	B1	B2	F11	B2		
			B3			B3	B1	B3	B2	B3	B2	B3		
						B2			SE1					
						B3						SE3		
Fase de manutenção (t₃ = 1,5 anos)														
Sistema antifouling e corrosão	F5		F5			F5	F5	F5		F5	F5	F5	-21×t ₃ = -31,5	
												SE3		
Transporte (navios)	F5		F5	SE2	F6		F1	F3	F1	F1	F1	F3	-48×t ₃ = -72	
							F3	F4	F3	F5	F5	F5		
							F4	F5	F4	SE1	SE1	F6		
							F5		F6			SE2		
							B1		B1			SE3		
Equipamentos de monitorização							F1	F3	F1	F1	F1	SE3	-12×t ₃ = -18	
							F3	F4	F3	SE1	SE1			
							F4	B1	F4					
							B1		B1					
CLASSIFICAÇÃO (RECETOR)		+27	+20	+29,5	+113	+54	+233	-58	-54	+70	-4	+16,5	+190,5	