



Universidade de Aveiro
Ano 2023

**Gonçalo Gonçalves
Duarte Pires**

**Desenvolvimento e otimização de protótipo para
recuperação da energia das ondas**

Development and optimization of a prototype for wave-energy
conversion



Universidade de Aveiro
Ano 2023

**Gonçalo Gonçalves
Duarte Pires**

**Desenvolvimento e otimização de protótipo para
recuperação da energia das ondas**

Development and optimization of a prototype for wave-energy conversion

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor Jorge Augusto Fernandes Ferreira, Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e do Doutor António Manuel de Amaral Monteiro Ramos, Professor Associado c/ Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Prof. Doutor António Manuel de Bastos Pereira
Professor Associado *c/* Agregação da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo
Professor Associado (aposentado) do INEGI – Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia
Mecânica e Engenharia Industrial

Prof. Doutor António Manuel de Amaral Monteiro Ramos
Professor Associado *c/* Agregação da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Quero agradecer ao Prof. Doutor Jorge Augusto Fernandes Ferreira e ao Prof. Doutor António Manuel de Amaral Monteiro Ramos pela orientação, conselhos dados e pela paciência ao longo deste trabalho, ao Eng. António José da Fonseca Festas pela maquinação de imensas peças necessárias a este projeto e conselhos sobre a fabricação de componentes, à minha família e namorada por estarem sempre presentes, a apoiar-me incondicionalmente nos momentos bons e também nos mais difíceis, aos meus amigos com quem continuo a criar boas memórias, que sempre me levantaram os ânimos e não me deixaram desistir e, por último a todos os professores e colegas com quem tive o prazer de partilhar o meu percurso académico, a todos o meu grande obrigado.

palavras-chave

Energia das ondas; *Power Take-Off*; eficiência; conversor de energia das ondas.

resumo

A crescente necessidade de energia a nível mundial implica uma inovação constante de dispositivos de captação de energia a partir de fontes renováveis, visto que é imperativo reduzir o consumo de combustíveis fósseis. O aproveitamento da energia das ondas apresenta-se como um sector ainda pouco explorado, ou por falhas confirmadas dos dispositivos desenvolvidos ou pela falta de validação experimental dos testados até então, levando a um maior investimento nos estudos desta fonte renovável de elevadíssimo potencial. O facto de Portugal dispor de uma vasta área oceânica, torna-o num país ideal para o desenvolvimento destes tipos de dispositivos. Esta dissertação apresenta-se como uma continuação das dissertações anteriores realizadas na Universidade de Aveiro. O principal objetivo é a continuação do desenvolvimento de um mecanismo de *Power Take-Off* com vista à elaboração de um protótipo para recuperação de energia potencial das ondas. Foi realizada uma análise do conjunto e de cada peça individual do conceito estudado até então, de forma a acrescentar melhorias ao dispositivo e a otimizar todo o sistema para aumentar a eficiência de conversão de energia. Finalizou-se com sucesso a fase de construção do protótipo funcional à escala, não se tendo atingido, contudo, o objetivo de realizar testes laboratoriais. Futuramente estes testes poderão ser realizados e, assim, será possível confirmar o potencial de geração de energia do dispositivo.

keywords

Wave energy; *Power Take-Off*; efficiency; wave energy converter

abstract

The growing need for energy worldwide implies a constant innovation of devices capable of capturing energy from renewable sources, since it is imperative to reduce the consumption of fossil fuel. The use of wave energy presents itself as a sector that has yet to be explored, either due to the confirmed shortcomings of the devices developed or the lack of experimental validation of those tested so far, leading to greater investment in studies of this renewable source of extremely high potential. The fact that Portugal has a vast ocean area makes it an ideal country for developing these types of devices. This dissertation is a continuation to previous dissertations carried out at the University of Aveiro. The main goal is to continue the development of a Power Take-Off mechanism with the focus on creating a prototype for recovering potential wave energy. An analysis was made of the whole and each individual part of the concept studied so far, in order to add improvements to the device and optimise the whole system to increase energy conversion efficiency. The construction phase of the functional scale prototype was successfully finalised, however the goal of testing the device was not achieved. It can be carried out in the future to confirm the device's energy generation potential.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivos	2
2	Revisão do Estado da Arte	4
2.1	Oceanos e costa marítima	4
2.2	Conversão de energia	5
2.3	Tipos de dispositivos	6
2.4	Corpo oscilante (6 graus de liberdade)	8
2.4.1	Absorvedor pontual	9
2.4.2	Atenuador	12
2.4.3	Conversor Oscilante de Translação	18
2.5	<i>Power Take-Off</i> de dispositivos de Corpo Oscilante	19
2.5.1	Transmissão mecânica	20
2.5.2	Transmissão hidráulica/pneumática	20
2.5.3	Acionamento elétrico direto	20
2.6	Coluna de água oscilante	21
2.6.1	Fixo	22
2.7	<i>Power Take-Off</i> de dispositivos de Coluna de Água Oscilante	22
2.7.1	Turbina Wells	22
2.7.2	Turbina de impulso auto-retificante (Babinsten)	23
2.7.3	Turbina Deniss-Auld	23
2.8	Galgamento/Terminador	24
2.8.1	Flutuante	25
2.8.2	Fixo	26
2.9	<i>Power Take-Off</i> de dispositivos de Galgamento	26
2.10	Dispositivos submersos de diferença de pressão	27
2.11	Bulge Wave	28

2.12	Rotating Mass.....	29
2.13	Resumo da atualidade dos dispositivos	32
3	Enquadramento do Conceito.....	36
3.1	Projetos Anteriores.....	36
3.2	FMEA de conceito	38
4	Desenvolvimento do Conceito	42
4.1	Componentes fulcrais do dispositivo	43
4.1.1	Gerador.....	43
4.1.2	Boia/Cilindro.....	43
4.1.3	Rolamentos unidirecionais	44
4.1.4	Multiplicador.....	45
4.2	Melhorias ao sistema.....	47
4.2.1	Suporte do gerador	47
4.2.2	Volante de inércia.....	47
4.3	Otimização e ajustes de peças existentes	50
4.3.1	Movimento linear	50
4.3.1.1	Haste.....	50
4.3.1.2	Suporte das Cremalheiras.....	50
4.3.2	Movimento rotativo.....	51
4.3.2.1	Pinhão de entrada	51
4.3.2.2	Pinhão intermédio	52
4.3.2.3	Pinhão de saída.....	52
4.3.2.4	Veios do cárter	53
4.3.3	Estruturais.....	53
4.3.3.1	Cárter.....	53
4.3.3.2	Mesa	54
4.3.3.3	Tampa superior.....	55
4.3.4	Outros.....	55
4.3.4.1	Espaçador	55
4.4	Protótipo final.....	56
5	Conclusão e Trabalhos Futuros.....	59
5.1	Trabalhos futuros.....	60
6	Referências Bibliográficas	62
	Anexos.....	67

Terminologia

AC-DC	Corrente alternada - Corrente contínua
CAD	Computer-Aided Design
ρ	Massa volúmica
EMEC	European Marine Energy Center
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis
ω	Velocidade angular
h	Altura
I	Inércia
I_c	Inércia em relação ao centro
K	Energia
M	Massa
PE-HD	Polietileno extrudido de alta densidade
PTO	<i>Power Take-Off</i>
r	Raio
RPM	Rotações por minuto
SSG	Seawave Slot-cone Generator
V	Volume
WEC	<i>Wave Energy Converter</i>
ZEE	Zona Económica Exclusiva

Lista de tabelas

Tabela 2.1: Classificação de turbinas de dispositivos de galgamento. Adaptado de (Zhang et al., 2021).	27
Tabela 2.2: Resumo dos dispositivos e o seu estado atual.	33
Tabela 3.1: FMEA de conceito.	40
Tabela 4.1: Parâmetros da boia.	44
Tabela 4.2: Parâmetros do cilindro.	44
Tabela 4.3: Parâmetros das Rodas Livres. Adaptado de (Roues libres, 2019).	45
Tabela 4.4: Parâmetros da caixa redutora/multiplicadora. Adaptado de (Catalog e Catalog, [s.d.]).	46

Lista de figuras

Figura 2.1: Ilustração da estimativa da potência média anual das ondas. Adaptado de (Lagoun, Benalia e Benbouzid, 2010).	5
Figura 2.2: Esquema dos diferentes tipos e fases de conversão de energia das ondas. Adaptado de (Ahamed, McKee e Howard, 2020).	6
Figura 2.3: Esquema de classificação de diferentes conversores de energia das ondas. Adaptado de (Bertram et al., 2020).	8
Figura 2.4: Ilustração dos graus de liberdade de um corpo oscilante. Adaptado de (Zhang et al., 2021).	8
Figura 2.5: Representação do dispositivo Aquabuoy. Adaptado de ((PDF) Protocol to develop an environmental impact study of wave energy converters, [s.d.].....	9
Figura 2.6: Representação do dispositivo PowerBuoy. Adaptado de (Valente, 2019; Zheng, Zhang e Iglesias, 2020).	10
Figura 2.7: Ilustração do dispositivo Pontoon Power Converter. Adaptado de (Valente, 2019).	10
Figura 2.8: Ilustração do conversor CETO. Adaptado de (Jahangir e Ghanbari Motlagh, 2022). ...	11
Figura 2.9: <i>Ilustração do funcionamento do dispositivo Searaser. Adaptado de (Shahriar et al., 2019).</i>	11
Figura 2.10: Representação do conversor Lifesaver. Adaptado de (Zheng, Zhang e Iglesias, 2020).	12
Figura 2.11: Representação do dispositivo Pelamis. Adaptado de (Lagoun, Benalia e Benbouzid, 2010; Rehman et al., 2023).	13
Figura 2.12: <i>Ilustração do conversor StingRAY. Adaptado de (Lehmann et al., 2017).</i>	13
Figura 2.13: <i>Ilustração do funcionamento dos dispositivos Power Wing e Wave Clapper. Adaptado de (How it works - Eco Wave Power, [s.d.]</i>	14
Figura 2.14: Representação dos dispositivos Power Wing e Wave Clapper. Adaptado de (Eco Wave Power - Wave Energy Company, [s.d.].....	14
Figura 2.15: Representação do dispositivo Wave Star. Adaptado de (Ahmed et al., 2023; Wave Star – Unlimited Clean Energy, [s.d.].....	15
Figura 2.16: Representação do conversor Floating Duck. Adaptado de (Ahamed, McKee e Howard, 2020).	15
Figura 2.17: Representação do dispositivo Eagle, em transporte, operação e em modo de proteção contra tempestades. Adaptado de (Huang et al., 2019).	17
Figura 2.18: Ilustração do dispositivo WaveRoller. Adaptado de (Rehman et al., 2023).	18
Figura 2.19: Ilustração do conversor bioWAVE. Adaptado de (Rehman et al., 2023).	19
Figura 2.20: Ilustração do dispositivo Langlee System. Adaptado de (Tongphong et al., 2021). ...	19
Figura 2.21: Representação dos tipos de transmissão mecânica - a) engrenagens, b) pinhão-cremalheira, c) fuso de esferas. Adaptado de (Zhang et al., 2021).	20
Figura 2.22: Representação do funcionamento de uma transmissão hidráulica. Adaptado de (Zhang et al., 2021).	20
Figura 2.23: Representação de um acionamento elétrico direto. Adaptado de (Zhang et al., 2021). ..	21
Figura 2.24: Ilustração do funcionamento geral de um dispositivo de coluna de água oscilante. Adaptado de (Zhang et al., 2021).	21
Figura 2.25: Representação da central do Pico e o seu funcionamento. Adaptado de (Lagoun, Benalia e Benbouzid, 2010).	22

Figura 2.26: Ilustração de uma turbina Wells. Adaptado de (Zhang et al., 2021).	23
Figura 2.27: Ilustração de uma turbina auto-retificante. Adaptado de (Zhang et al., 2021).	23
Figura 2.28: Ilustração de uma turbina Deniss-Auld. Adaptado de (Zhang et al., 2021).....	24
Figura 2.29: Ilustração do funcionamento de um dispositivo de galgamento. Adaptado de (Zhang et al., 2021).....	24
Figura 2.30: Ilustração de um WaveCat. Adaptado de (Fernandez et al., 2012).....	25
Figura 2.31: Representação de um Wave Dragon. Adaptado de (Ahamed, McKee e Howard, 2020).	25
Figura 2.32: Ilustração de um SSG. Adaptado de (Vicinanza et al., 2012).....	26
Figura 2.33: Ilustração das turbinas de Pelton, Kascheme e Francis, por esta ordem. Adaptado de (Zhang et al., 2021).	27
Figura 2.34: Ilustração de um dispositivo mWave. Adaptado de (Rehman et al., 2023).....	28
Figura 2.35: Ilustração do dispositivo Anaconda. Adaptado de (Home - Checkmate Seaenergy, [s.d.]).	29
Figura 2.36: Representação do SEAREV. Adaptado de (Lagoun, Benalia e Benbouzid, 2010).	30
Figura 2.37: Ilustração do funcionamento do ISWEC. Adaptado de (Bracco et al., 2016).	30
Figura 2.38: Representação do dispositivo ISWEC, em alto mar. Adaptado de (Khedkar et al., 2021).	31
Figura 2.39: Representação do dispositivo Penguin, em construção e em alto mar. Adaptado de (Boren, 2015).	31
Figura 2.40: Representação do dispositivo WITT. Adaptado de (Crowley et al., 2018).	32
Figura 3.1: Conceito final desenvolvido por (Valente, 2019).	37
Figura 3.2: Conceito de guiamento desenvolvido por (Cardoso, 2021).	38
Figura 3.3: Conceito final desenvolvido por (Cardoso, 2021).	39
Figura 4.1: Conceito final.....	42
Figura 4.2: Representação da turbina eólica Yuzo e o seu controlador, ambos da Tesup. Adaptado de (Cardoso, 2021).	43
Figura 4.3: Ilustração da caixa redutora/multiplicadora escolhida. Adaptado de (Catalog e Catalog, [s.d.]).	46
Figura 4.4: Desenho do suporte do gerador.	47
Figura 4.5: Gráfico ilustrativo das velocidades do cilindro e do gerador quando incorporado um volante de inércia no sistema.	48
Figura 4.6: Desenho do volante de inércia.	49
Figura 4.7: Desenho da haste.	50
Figura 4.8: Desenho do suporte das cremalheiras.....	51
Figura 4.9: Desenho do pinhão de entrada.	51
Figura 4.10: Desenho do pinhão intermédio.	52
Figura 4.11: Desenho do pinhão de saída.	52
Figura 4.12: Desenho de um dos veios do cárter.	53
Figura 4.13: Desenho do cárter.	54
Figura 4.14: Desenho da mesa.	54
Figura 4.15: Desenho da tampa superior.....	55
Figura 4.16: Desenho do espaçador.	55
Figura 4.17: Cárter montado, com os pinhões e veios.	56
Figura 4.18: Protótipo construído. À esquerda, vista frontal do dispositivo. À direita, vista de cima sem a tampa do cárter.....	57

Capítulo 1

1 Introdução

Uma das maiores questões atualmente prende-se com a sustentabilidade energética. O consumo de eletricidade está em constante crescimento e é necessário que esta seja obtida a partir de fontes renováveis.

As estimativas feitas indicam que o consumo de energia elétrica irá aumentar aproximadamente 56% mundialmente até 2040 e na Europa irá duplicar até 2050. Contudo, 61,3% da eletricidade produzida mundialmente em 2020 foi proveniente da queima de combustíveis fósseis (British Petroleum, 2021). Isto leva a que haja uma grande emissão de gases com efeito de estufa por parte do setor energético, cerca de 73,2% em 2016 (Ritchie e Roser, 2020). Estes números alarmantes levaram a União Europeia a definir como objetivo para 2050 a redução das fontes tradicionais de energia não-renovável em 80 a 95%.

1.1 Contextualização

É necessário um grande investimento em energias limpas, sendo que a maior quantidade é originária das fontes hídricas, eólicas e solares, nesta ordem. Contudo, estas não são suficientes para suprir os consumos atuais, daí existir uma procura ativa de novas soluções, pouco ou nada exploradas. Destas podemos destacar a energia dos oceanos, uma vez que constituem cerca de 71% do planeta Terra, contudo, as tecnologias desenvolvidas até então ainda se encontram em fases experimentais ou simplesmente não foram validadas devido aos baixos rendimentos apresentados. O maior obstáculo prende-se com o oceano em si, fazendo com que seja necessário utilizar sistemas mecânicos complexos, tais como sistemas óleo-hidráulicos, fundeados, mecânicos de acionamento e turbinas. O movimento errático do mar e a interligação destes sistemas leva a que haja perdas de energia entre si, bem como a um maior desgaste dos diversos componentes (Zhang *et al.*, 2021).

No entanto, o elevadíssimo potencial apresentado pelos oceanos continua a motivar a investigação para o desenvolvimento de tecnologias rentáveis na extração da sua energia, nomeadamente a proveniente das correntes marítimas e das ondas. Esta última ainda se apresenta como difícil de quantificar concretamente, tendo um intervalo estimado relativamente grande entre o mínimo e o máximo (Zhang *et al.*, 2021).

Portugal encontra-se em lugar privilegiado para o desenvolvimento de tecnologias de aproveitamento da energia das ondas, devido ao facto de possuir uma zona económica exclusiva

bastante extensa, tendo em conta a sua área terrestre, e apresentar meios de recolha de dados marítimos em diversos pontos dessa mesma zona. Assim, apresenta as condições necessárias para a aposta em dispositivos com esse fim.

1.2 Objetivos

Pretende-se continuar o trabalho realizado em dissertações anteriores de desenvolvimento de um protótipo que sirva para recuperar energia potencial proveniente da ondulação. O conceito é baseado numa massa móvel, ou seja, uma boia, com movimento relativo a uma estrutura flutuante que se apresenta fixa. Assim, simplifica os sistemas de amarração da mesma e possibilita a redução dos acoplamentos mecânicos em contacto com a água. Isto servirá de base para o conceito a desenvolver.

Neste projeto em concreto pretende-se continuar o desenvolvimento do conversor de movimento linear em rotativo, o *Power Take-Off* (PTO). Para isso será feita uma análise detalhada do conceito desenvolvido até ao momento, com o intuito de aplicar melhorias de eficiência energética e otimização de peças já existentes, para simplificar processos de fabrico e montagem e reduzir os custos.

Seguidamente serão fabricados e adquiridos todos os componentes do dispositivo para que se possa construir um protótipo funcional à escala.

O objetivo final passa pelo teste do conversor em laboratório, de forma a analisar a sua eficiência de produção de energia elétrica e assim verificar a capacidade de aplicar o dispositivo em contexto real em larga escala.

Capítulo 2

2 Revisão do Estado da Arte

2.1 Oceanos e costa marítima

A crescente necessidade do abandono dos combustíveis fósseis, principalmente no que toca à produção de eletricidade, vincou ainda mais o foco nas energias renováveis. Um dos setores de elevadíssimo potencial não explorado trata-se da energia dos oceanos. Esta manifesta-se de diferentes formas, através das correntes marítimas, salinidade da água (pressão osmótica), temperatura dos oceanos, marés e, finalmente, pelas ondas. Estima-se que o potencial energético teórico das ondas seja 29500 TWh/ano e o das correntes marítimas seja cerca de 26000 TWh/ano (Khojasteh *et al.*, 2023). Na Figura 2.1 é possível ver uma estimativa da potência média anual da ondulação.

As ondas são formadas através do vento, estes incidem sobre a superfície dos oceanos, criando perturbações na água. O tamanho estagna ao atingirem um certo limite devido a perdas de energia, se o vento deixar de incidir, considerando-se, assim, que a onda está completamente desenvolvida. As ondas continuam a propagar-se durante algum tempo, mesmo sem ação do vento. Estas estendem-se desde a superfície até uma certa profundidade, tratando-se de uma coluna de partículas de água em movimento, sendo elíptico à superfície e aproximando-se da circularidade com o aumento da profundidade. De notar que nas águas mais profundas, não existe movimento horizontal das partículas (Valente, 2019).

Portugal dispõe de excelentes condições oceânicas, tendo uma zona económica exclusiva (ZEE) com uma área de 1.727,408 km² combinando as subáreas do continente, Açores e da Madeira. Isto coloca-a como a 5ª maior da Europa e 20ª maior do mundo (Valente, 2019). Desta forma, a exploração da energia das ondas é, não só apeteável, mas também quase uma imposição devido às condições apresentadas. Para isso, Portugal dispõe de boias ondográficas para monitorização da temperatura superficial da água e da agitação marítima, que permitem saber os valores de período médio e altura significativa das ondas. Com estes valores consegue-se ter noção do potencial para extração de energia da ondulação.

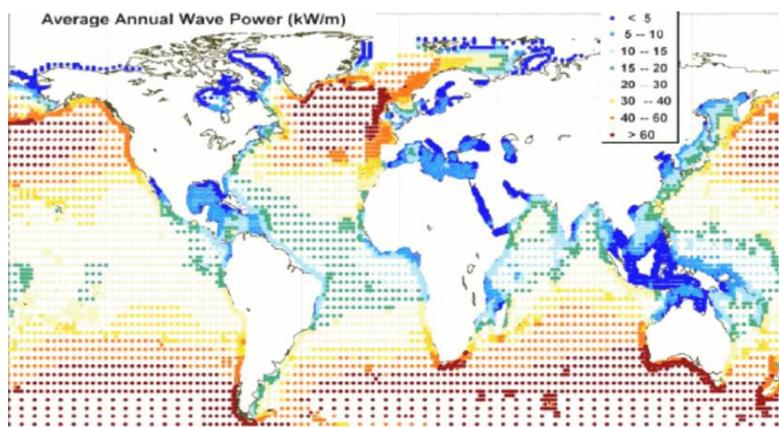


Figura 2.1: Ilustração da estimativa da potência média anual das ondas. Adaptado de (Lagoun, Benalia e Benbouzid, 2010).

2.2 Conversão de energia

Para aproveitamento da energia das ondas existem três níveis de conversão, (Figura 2.2), pelos quais é necessário, geralmente, transitar. Em primeiro lugar, a energia das ondas divide-se em três componentes distintas, a energia de pressão (cinética), potencial e o desnível da água. Em segundo lugar, é necessário converter uma dessas componentes em energia mecânica, linear ou rotacional, para posteriormente converter em energia elétrica que se irá ligar à rede para abastecer as populações. Devido ao facto de se ter de passar por diversos níveis de conversão, o número de mecanismos a utilizar é grande, o que leva a perdas de energia do sistema e desgaste dos diversos materiais ao longo do tempo. No entanto existem sistemas que conseguem passar apenas por dois ou até um dos níveis de conversão, mecânicos de acionamento direto e elétricos de acionamento direto, respetivamente (Valente, 2019; Zhang *et al.*, 2021).

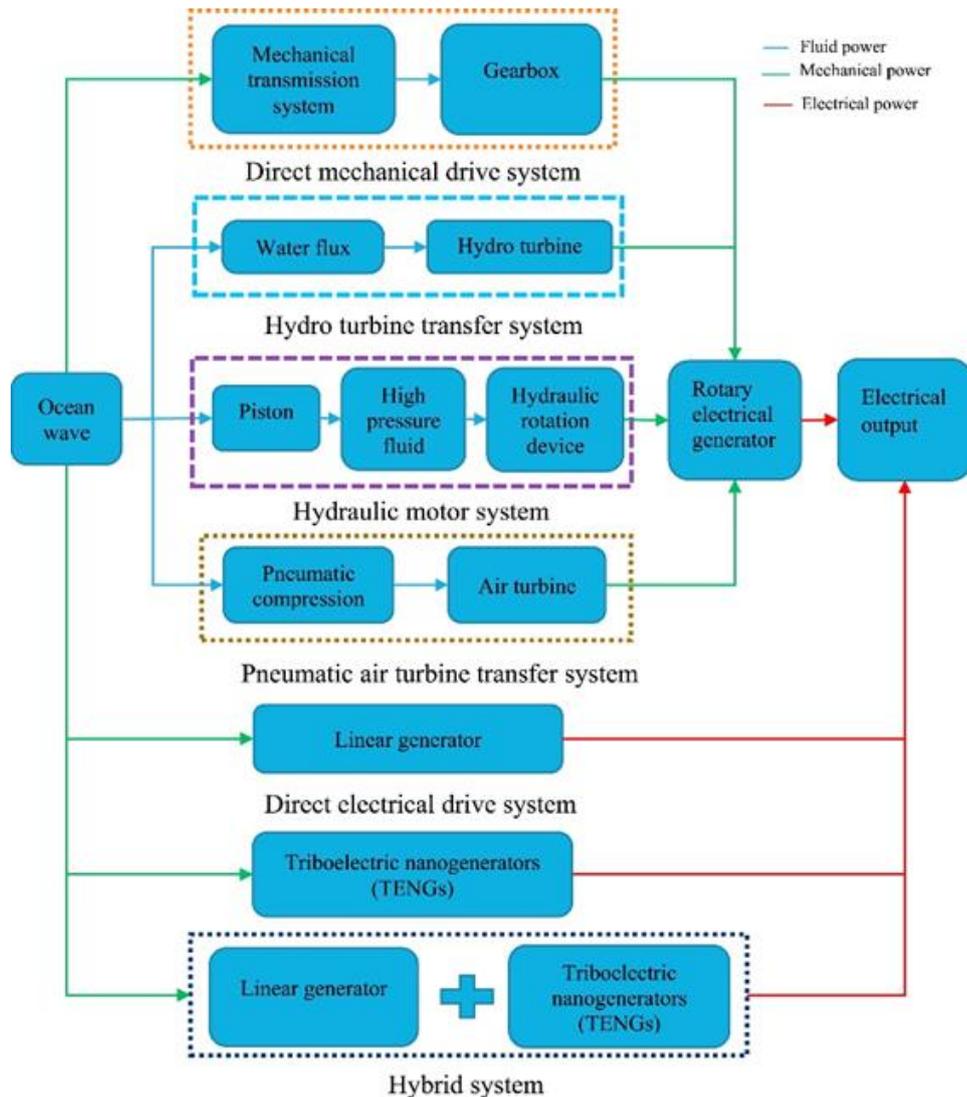


Figura 2.2: Esquema dos diferentes tipos e fases de conversão de energia das ondas. Adaptado de (Ahamed, McKee e Howard, 2020).

2.3 Tipos de dispositivos

Existem diversas formas de classificação dos dispositivos dado que estes apresentam uma grande diversidade entre si, assim as categorias em que se inserem variam de autor para autor. Na generalidade encontram-se divididos em localização, tamanho e direção de atuação e princípio de funcionamento (Falcão, 2010).

Existem três tipos no que toca à localização: alto mar, junto à costa e na costa. O primeiro apresenta o maior potencial derivado da maior ondulação nessa zona, que se situa a mais de 40 m de profundidade em alto mar. Contudo, apresentam maiores custos e dificuldades de instalação dada a distância até à costa, bem como um maior desgaste dos componentes pela agressividade do ambiente em que se encontram. As zonas junto à costa têm cerca de 10 a 25 m de profundidade, podem ter ou não amarrações ao fundo e apresentam menor potencial porque as suas ondas são mais pequenas que as de alto mar. Por fim, os dispositivos que se

encontram na costa apresentam instalação e manutenção relativamente fácil, com acesso simples à rede pública e não precisam de amarrações. Contudo, as ondas recolhidas são as de menores dimensões e assim, as com menor potência (Drew, Plummer e Sahinkaya, 2009).

De acordo com o tamanho e direção de atuação, são classificados três tipos de dispositivos: terminadores, absorvedores pontuais e atenuadores. Apresentam como principais diferenças as suas dimensões, a rigidez da estrutura e a sua orientação tendo em conta o movimento das ondas. Posteriormente serão descritos com maior detalhe (Drew, Plummer e Sahinkaya, 2009).

Segundo a European Marine Energy Center (EMEC), existem oito tipos de dispositivos de acordo com o seu princípio de funcionamento: dispositivos de galgamento, dispositivos de diferença de pressão, atenuadores, colunas de água oscilante, absorvedores pontuais, conversores oscilantes de translação, *rotation mass* e *bulge wave*. Na Figura 2.3 encontram-se representados diferentes tipos de classificação de conversores (Drew, Plummer e Sahinkaya, 2009).

Neste documento encontram-se agrupados em três conjuntos, dispositivos de corpo oscilante, dispositivos de coluna de água oscilante e dispositivos de galgamento, dado que são os que englobam um maior número de conversores. Os dispositivos submersos de diferença de pressão, os de *bulge wave* e os de *rotation mass* encontram-se representados individualmente.

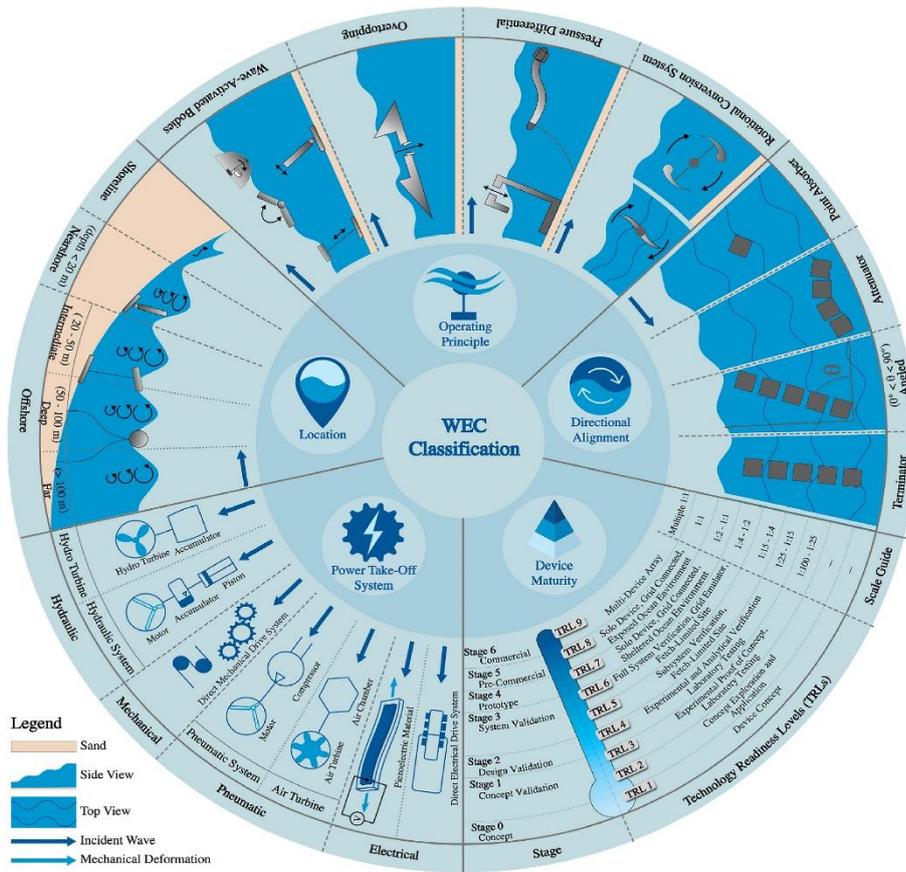


Figura 2.3: Esquema de classificação de diferentes conversores de energia das ondas. Adaptado de (Bertram et al., 2020).

2.4 Corpo oscilante (6 graus de liberdade)

Devido aos 6 graus de liberdade, representados na Figura 2.4, que os corpos apresentam, nomeadamente, elevação, oscilação, balanço, guinada, inclinação e rotação, e à irregularidade e aleatoriedade das ondas, foi necessário desenvolver dispositivos que aproveitassem essas mesmas características (Zhang et al., 2021).

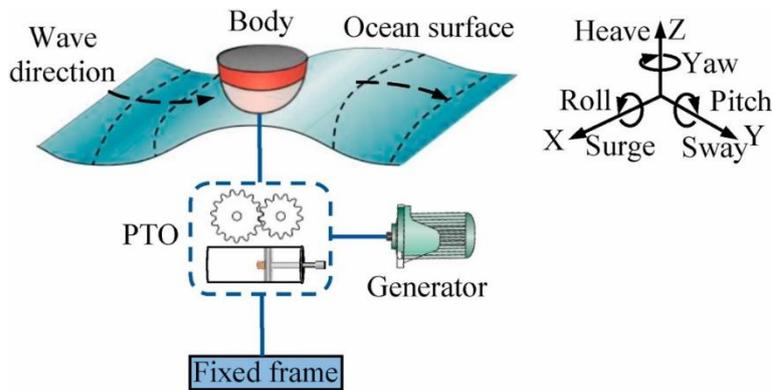


Figura 2.4: Ilustração dos graus de liberdade de um corpo oscilante. Adaptado de (Zhang et al., 2021).

Assim, os dispositivos de corpo/boia oscilante fazem movimentos de balanço, inclinação ou rotação, de acordo com as ondas, para acionar o PTO e, conseqüentemente, ativar o gerador para produzir eletricidade (Zhang *et al.*, 2021).

São também considerados como os conversores mais económicos. Podem ser divididos em 3 tipos: absorvedor pontual, atenuador e conversor oscilante de translação, de acordo com a sua forma, tamanho e ângulo da direção da onda incidente em relação ao corpo. Adicionalmente, nos últimos anos, investigadores desenvolveram um novo tipo de *Wave Energy Converter* (WEC) de corpo oscilante com múltiplos graus de liberdade (Zhang *et al.*, 2021).

O método de aquisição de energia destes dispositivos é mais adequado para ser usado em alto mar. Têm a sua máxima eficiência quando o flutuador entra em ressonância com as ondas (Zhang *et al.*, 2021).

2.4.1 Absorvedor pontual

Os absorvedores pontuais possuem pequenas dimensões que lhes permitem flutuar, trazendo-lhes a vantagem de não necessitarem de uma direção de onda específica para funcionar (Falcão, 2010).

Aquabuoy – O Aquabuoy, representado na Figura 2.5, é um dos dispositivos pioneiros para extração da energia das ondas e foi desenvolvido pela Canadian Finavera Renewables Limited no ano 2000. É composto essencialmente por 4 componentes: boia, bomba de mangueira, pistão e tubo de aceleração. Devido ao movimento das ondas, a boia move-se para cima e para baixo, levando a que a bomba de mangueira contraia e expanda através do movimento relativo do pistão e do tubo de aceleração. Conseqüentemente, a água do mar é bombeada para a turbina através da bomba e aciona o gerador, produzindo eletricidade (Zhang *et al.*, 2021).



Figura 2.5: Representação do dispositivo Aquabuoy. Adaptado de ((PDF) Protocol to develop an environmental impact study of wave energy converters, [s.d.]).

PowerBuoy – Em 2005, a American Ocean Power Technologies desenvolveu o PowerBuoy, representado na Figura 2.6. Tem o seu conversor ancorado ao fundo do mar e, motivado pela ondulação, o pistão do sistema hidráulico acoplado a uma boia desloca-se verticalmente e faz atuar o gerador, obtendo eletricidade (Zhang *et al.*, 2021).

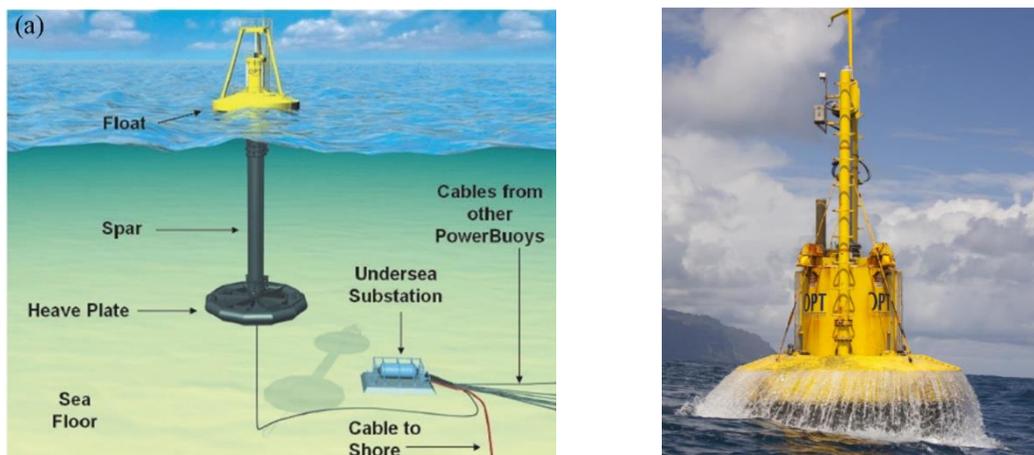


Figura 2.6: Representação do dispositivo PowerBuoy. Adaptado de (Valente, 2019; Zheng, Zhang e Iglesias, 2020).

Os primeiros dispositivos foram testados entre 2005 e 2008 na costa de New Jersey e tinham uma capacidade de 40kW. Ocorreram outros testes em Espanha e no Havai em 2008 e 2009-2011, respetivamente. Um PowerBuoy com 150kW foi instalado nos Estados Unidos em 2011 e, posteriormente, em 2016, desenvolveu-se uma versão pré-comercial com 3kW (Valente, 2019).

Pontoon Power Converter – Desenvolvido pela Pontoon Power AS, é também um dispositivo que funciona com uma bomba hidráulica, contudo, baseia-se num conjunto de boias, ao invés de apenas uma (Figura 2.7). Cada boia tem a sua própria bomba individual que envia a água para um dispositivo central, onde é ativada uma turbina ligada a um gerador. Este sistema tem a possibilidade de ficar completamente submerso para proteção de tempestades (Valente, 2019).

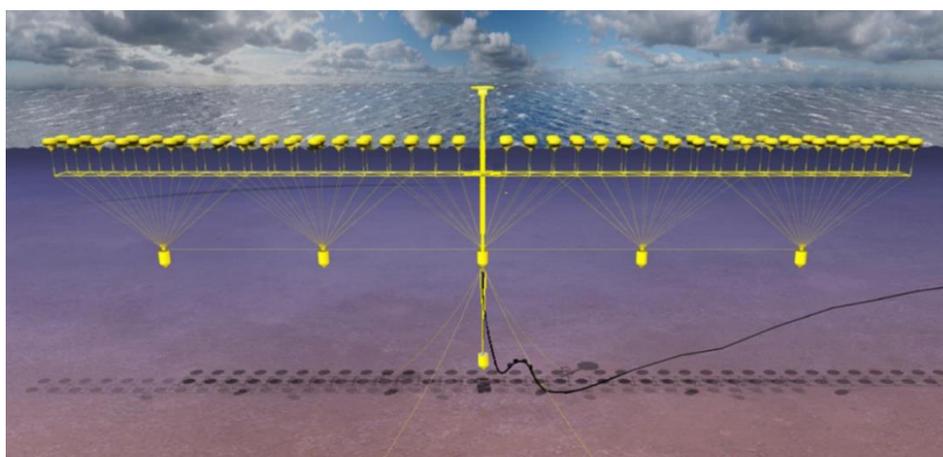


Figura 2.7: Ilustração do dispositivo Pontoon Power Converter. Adaptado de (Valente, 2019).

CETO – O CETO é um dispositivo da Carnegie Clean Energy. Encontra-se totalmente submerso, tal como ilustrado na Figura 2.8, tornando-o mais seguro durante tempestades, e funciona da mesma forma que os dispositivos descritos anteriormente. Tem a possibilidade de enviar água para a costa procedendo à sua dessalinização para obtenção de água potável, tornando-o vantajoso em relação a dispositivos similares (Valente, 2019).

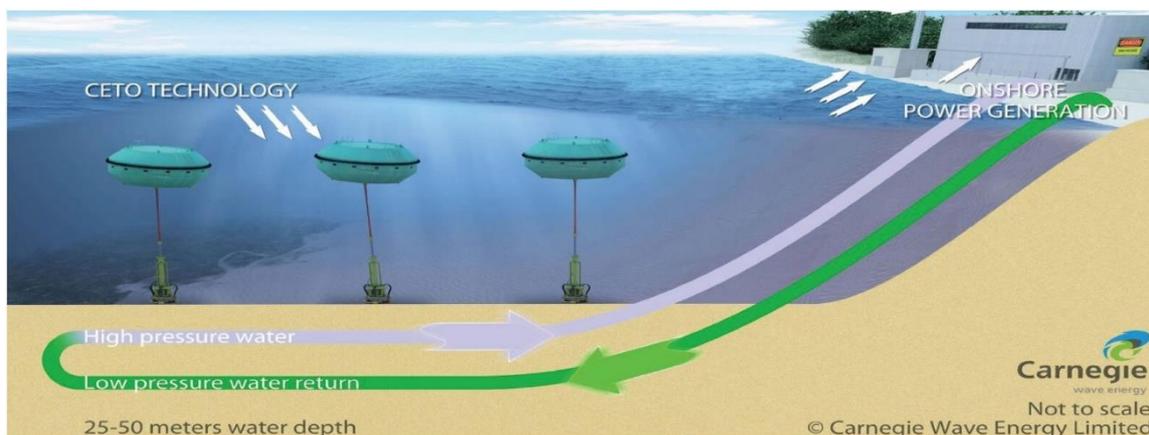


Figura 2.8: Ilustração do conversor CETO. Adaptado de (Jahangir e Ghanbari Motlagh, 2022).

O modelo mais recente, o CETO 6, dispõe de uma capacidade de 1 MW, enquanto o anterior, o CETO 5, tinha 240kW (Valente, 2019).

Searaser – Desenvolvido por Alvin Smith e mais tarde adquirido pela empresa Ecotricity, tem um sistema de funcionamento muito parecido ao CETO, enviando a água para a costa. A principal diferença prende-se com o facto de este apresentar o pistão entre 2 boias, uma delas submersa e a outra à superfície, tal como ilustrado na Figura 2.9 (Valente, 2019).

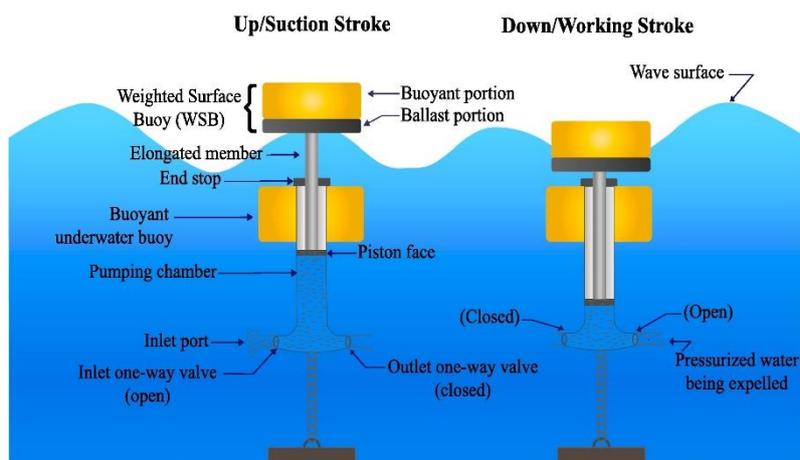


Figura 2.9: Ilustração do funcionamento do dispositivo Searaser. Adaptado de (Shahriar et al., 2019).

Em 2010 este dispositivo tinha uma capacidade de 100kW, sendo 1 MW o objetivo a atingir (Valente, 2019).

Lifesaver – Fred Olsen desenvolveu o Lifesaver, representado na Figura 2.10, é composto por cabos ancorados ao fundo do mar e conectados a engrenagens na boia, que possui um gerador. Este é ativado pelo movimento dos cabos que se mexem solidários com as ondas. Tem como desvantagem o facto de o gerador funcionar também como motor para repor os cabos na posição inicial, levando a uma eficiência do sistema reduzida (Valente, 2019).



Figura 2.10: Representação do conversor Lifesaver. Adaptado de (Zheng, Zhang e Iglesias, 2020).

Foi instalado em 2012 em Falmouth um Lifesaver com potência de 315 kW. Em 2016 foi realocado para o Havai, demonstrando ser possível gerar energia por períodos superiores a seis meses. No entanto, também demonstrou algumas falhas técnicas (Valente, 2019).

2.4.2 Atenuador

Os atenuadores têm o seu eixo principal paralelo à direção do movimento das ondas, apresentam estruturas longas, podendo ser articuladas ou flexíveis (Falcão, 2010).

Pelamis – Começou a ser desenvolvido em 1998 pela Pelamis Wave Power Ltd. Tem um formato cilíndrico composto por diversas boias conectadas por juntas com 2 graus de liberdade e estão orientadas pelo seu eixo principal com a direção das ondas. O seu funcionamento deve-se ao movimento relativo entre as boias, enviando fluído pressurizado através de cilindros hidráulicos existentes nas juntas. Este faz mover motores hidráulicos dentro das boias e, conseqüentemente, são ativados geradores que produzem a energia elétrica. Para que o Pelamis mantenha sempre a sua orientação em relação às ondas, encontra-se amarrado na sua ponta frontal (Valente, 2019; Zhang *et al.*, 2021).

Diversos protótipos (Figura 2.11) de diferentes escalas foram implementados. O de menor escala, 1:7, serviu para testar juntas e circuitos hidráulicos e foi estudado em Nantes. Portugal fez um investimento de 8,5 milhões de euros em 2008 com vista a obter o primeiro parque de WECs do mundo. Foi então criado o Parque de Ondas da Aguçadoura, onde estavam colocados 3 dispositivos, obtendo uma capacidade de 2,25MW. O objetivo seria ter uma capacidade de 21 MW implementado mais 22 dispositivos. Contudo, os conversores foram retirados uma vez que apresentam diversos problemas de amarração, vazamento e outros problemas técnicos. Existiu também falta de financiamento (Valente, 2019).

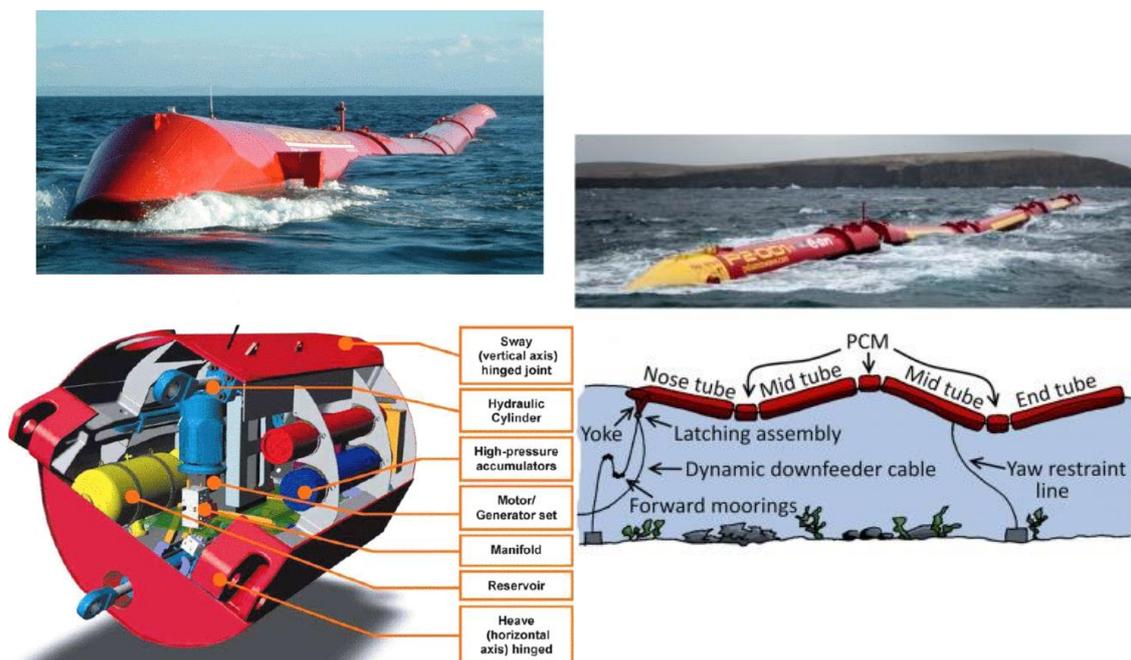


Figura 2.11: Representação do dispositivo Pelamis. Adaptado de (Lagoun, Benalia e Benbouzid, 2010; Rehman et al., 2023).

StingRAY – A Columbia Power Technologies desenvolveu o conversor StingRAY, representado na Figura 2.12. É composto por 2 boias, uma à frente e outra atrás, tendo eixos e geradores independentes uma da outra. Isto permite um funcionamento autónomo de cada uma e que se movam com a ondulação. O StingRAY tem uma capacidade de até 330kW (Valente, 2019).

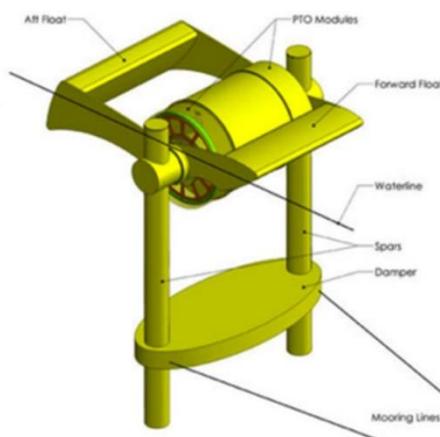


Figura 2.12: Ilustração do conversor StingRAY. Adaptado de (Lehmann et al., 2017).

Power Wing – Este dispositivo foi desenvolvido pela companhia Israelita Eco Wave Power. É composto por flutuadores que estão ligados a uma estrutura junto à costa através de fixadores e

pistões. Com o movimento das ondas, o fluido no pistão comprime e expande, acionando um motor hidráulico e, posteriormente, um motor elétrico. É possível ver o seu funcionamento na Figura 2.13 e a sua aplicação marítima na Figura 2.14. Tem a possibilidade de ser recolhido para evitar estragos quando a ondulação é muito elevada. O formato das boias do Power Wing permite que este seja versátil em termos de localização onde pode ser aplicado, uma vez que tanto funciona bem em ondas altas como em ondas baixas (*Eco Wave Power developing two new wave-power devices*, [s.d.]; *How it works - Eco Wave Power*, [s.d.]; Valente, 2019).

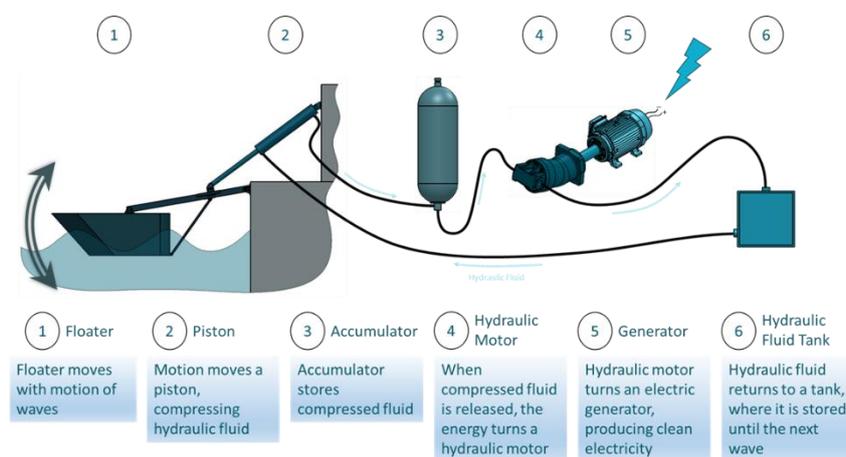


Figura 2.13: Ilustração do funcionamento dos dispositivos Power Wing e Wave Clapper. Adaptado de (*How it works - Eco Wave Power*, [s.d.]).



Figura 2.14: Representação dos dispositivos Power Wing e Wave Clapper. Adaptado de (*Eco Wave Power - Wave Energy Company*, [s.d.]).

Wave Clapper – Também um dispositivo da Eco Wave Power, em muito semelhante ao Power Wing. A diferença relevante encontra-se no formato da boia, permitindo que seja colocado em série em locais com espaço reduzido, representado acima na Figura 2.14 (*Eco Wave Power developing two new wave-power devices*, [s.d.]).

Wave Star – Desenvolvido por Niels e Keld Hansen, exibe um princípio de funcionamento semelhante ao Power Wing e ao Wave Clapper, apresentando modificações que o tornam adequado para uso em alto-mar, contrariamente aos outros dois. O sistema é composto por duas filas de boias,

uma de cada lado, alinhadas com a direção das ondas. Tem uma estrutura estática ancorada ao fundo do mar por pilares e liga-se às boias, de forma hemisférica, através de braços hidráulicos, como representado na Figura 2.15, que fazem atuar o motor hidráulico principal e, seguidamente, o gerador (Valente, 2019).



Figura 2.15: Representação do dispositivo Wave Star. Adaptado de (Ahmed et al., 2023; Wave Star – Unlimited Clean Energy, [s.d.]).

Foi instalado em 2009 um modelo à escala 1:2 com capacidade de 600 kW. Está a ser estudada a possibilidade de incorporar vários dispositivos em série, formando uma estrela de 3 ou 4 braços e acoplando turbinas eólicas (Wave Star – Unlimited Clean Energy, [s.d.]).

Floating Duck – Este dispositivo foi criado pelo Guangzhou Institute of Energy Conversion (Figura 2.16). Tem três componentes principais: um Salter’s Duck, desenvolvido por Stephen Salter, um eixo e um apêndice submerso. O Duck transforma o movimento das ondas em energia mecânica ao movimentar-se em torno do eixo. O apêndice tem na sua composição duas placas, uma vertical e outra horizontal, para estabilização do mecanismo e, por conseguinte, diminuição da força exercida pela amarração no dispositivo e também melhorando a eficiência do Duck. O sistema de amarração foi pensado de maneira a resistir às fortes ondulações marítimas, sendo composto por dois pesos, um amarrado ao fundo e outro dinâmico, e duas boias. Isto evita que a amarração seja arrastada ou arrancada, permitindo ao dispositivo se adaptar a ondas mais agressivas (Valente, 2019).



Figura 2.16: Representação do conversor Floating Duck. Adaptado de (Ahamed, McKee e Howard, 2020).

Até 2012 foram realizados três testes de dispositivos com capacidade de 10 kW. Em 2013 realizaram-se testes num mecanismo de 100 kW, no entanto a potência máxima extraída foi de 25 kW. Verificou-se problemas com as amarrações e que a continuidade de conversão energética era fortemente dependente da intensidade das ondas. Por resolver estava também a questão da elevada inércia rotacional e peso do mecanismo (Valente, 2019).

Tal como o Wave Star, está a ser estudada a possibilidade de aplicar diversos Salter's Ducks em série, formando uma estrela com aplicação de turbinas eólicas e fazendo variar o número e tamanho das boias para aumentar a eficiência (Yazdi *et al.*, 2023).

Eagle WEC – Inspirado pelo Floating Duck, dado que foi desenvolvido pelo mesmo instituto, apresenta uma estrutura submersa que estabiliza o dispositivo e assemelha-se a um navio submerso (Figura 2.17). Apresenta quatro componentes principais: um gerador, um rotor, um corpo flutuante e cilindros hidráulicos. O corpo flutuante tem baixo peso e formato semelhante a um bico, permitindo a geração de energia com poucas ondas (Valente, 2019).

Em 2012, foi testado um dispositivo com capacidade de 10 kW e um de 100 kW em 2015 e 2016. Este apresentava uma eficiência de 20% quando os períodos de onda se situavam entre os 4 e 6,5 segundos (Valente, 2019).



Figura 2.17: Representação do dispositivo Eagle, em transporte, operação e em modo de proteção contra tempestades. Adaptado de (Huang et al., 2019).

2.4.3 Conversor Oscilante de Translação

Os conversores oscilantes de translação são compostos por uma dobradiça perpendicular à direção da onda que se move para a frente e para trás, aproveitando a velocidade horizontal da onda (Falcão, 2010).

WaveRoller – Este conversor foi criado pela AW Energy e opera a profundidades de 0,8 m a 20 m. É composto por uma placa que se encontra ancorada ao fundo do mar, aproveitando as características da água do fundo perto da costa para fazer essa mesma placa oscilar, como ilustrado na Figura 2.18. Este movimento faz atuar um pistão hidráulico, forçando um fluido dentro dum circuito hidráulico no interior do dispositivo, acionando assim, um gerador (Valente, 2019; *Waveroller - AW-Energy*, [s.d.]).



Figura 2.18: Ilustração do dispositivo WaveRoller. Adaptado de (Rehman et al., 2023).

Uma única placa é capaz de gerar entre 0,5 MW a 1 MW. Foi instalado em Peniche no ano 2011, um WaveRoller constituído por três placas mais pequenas, cada uma com 100 kW de potência. Foi testado até 2013, verificando-se uma capacidade de produção de 500 kWh durante 24h quando as ondas tinham uma altura de cerca de 2,5 m (Valente, 2019).

bioWAVE – A empresa BioPower desenvolveu o conversor bioWAVE, representado na Figura 2.19, com um sistema de funcionamento semelhante ao do WaveRoller, encontrando-se também submerso e perto da costa. Tem na sua composição três grandes alhetas acopladas a uma estrutura fixa, ancorada ao fundo do mar e oscilam consoante a ondulação. Apresenta-se como um dispositivo com alguma adaptabilidade, dado que, as alhetas podem alinhar-se paralelamente ao fundo marinho e os seus geradores rodam de forma livre consoante a direção das correntes. A geração de energia consiste num sistema hidráulico, tal como o WaveRoller (Valente, 2019; Zhang *et al.*, 2021).

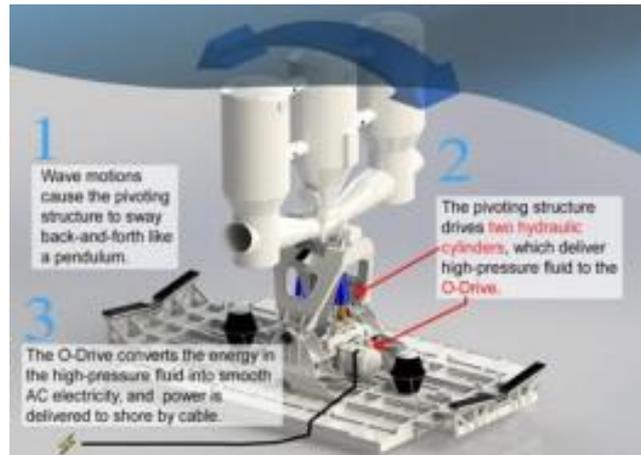


Figura 2.19: Ilustração do conversor bioWAVE. Adaptado de (Rehman et al., 2023).

Com vista a implementar um dispositivo na Austrália, foi iniciado em 2012 o desenvolvimento de um conversor com 250 kW de potência. Em 2015 foi colocado em funcionamento, contudo, apresentou falhas em 2016 (Valente, 2019).

Langlee System – Projetado e desenvolvido pela Langlee Wave Power em 2005, apresenta um funcionamento idêntico aos dois dispositivos anteriores, assemelhando-se mais ao WaveRoller do que ao bioWAVE, uma vez que é composto por placas articuladas em vez de alhetas (Figura 2.20). No entanto, o Langlee tem um conjunto de placas opostas colocadas simetricamente, permitindo um melhor aproveitamento das ondas e diminuição das forças na estrutura. É também constituído por uma estrutura de alumínio onde as placas são fixadas, parcialmente submersa e amarrada ao fundo do mar (Valente, 2019).

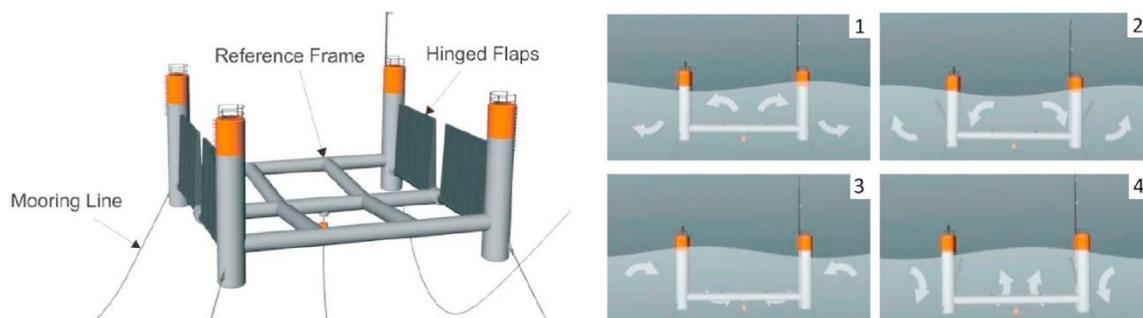


Figura 2.20: Ilustração do dispositivo Langlee System. Adaptado de (Tongphong et al., 2021).

2.5 Power Take-Off de dispositivos de Corpo Oscilante

Os mecanismos PTO são os responsáveis pela conversão do movimento em eletricidade. São os responsáveis por conectar a boia ao gerador, sendo por isso um dos componentes fulcrais dos dispositivos de geração de energia (Zhang et al., 2021).

2.5.1 Transmissão mecânica

O PTO mais comum em corpos oscilantes é o de transmissão mecânica. Esta pode ser de engrenagens, pinhão-cremalheira ou por fuso de esferas, como se pode ver na Figura 2.21. Normalmente, utiliza-se multiplicadores de velocidade e rolamentos unidirecionais para que a geração de energia seja mais estável (Zhang *et al.*, 2021).

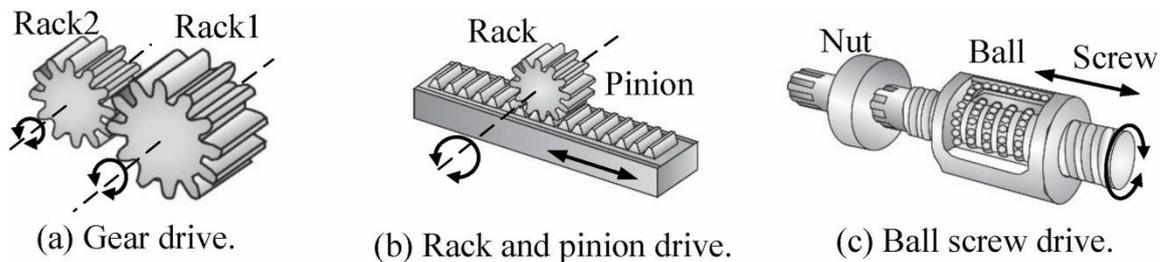


Figura 2.21: Representação dos tipos de transmissão mecânica - a) engrenagens, b) pinhão-cremalheira, c) fuso de esferas. Adaptado de (Zhang *et al.*, 2021).

2.5.2 Transmissão hidráulica/pneumática

O sistema pneumático/hidráulico é caracterizado pelo seu binário elevado, transmissão flexível e armazenamento de energia estável, que o torna apropriado para as grandes variações de frequência e amplitude das ondas. Como é possível ver na Figura 2.22, a energia das ondas é convertida através do sistema de pressão líquido/ar em eletricidade, podendo ser armazenada de forma a potenciar ondas de velocidade mais baixa e, assim, conseguir uma geração de energia elétrica mais estável e contínua (Zhang *et al.*, 2021).

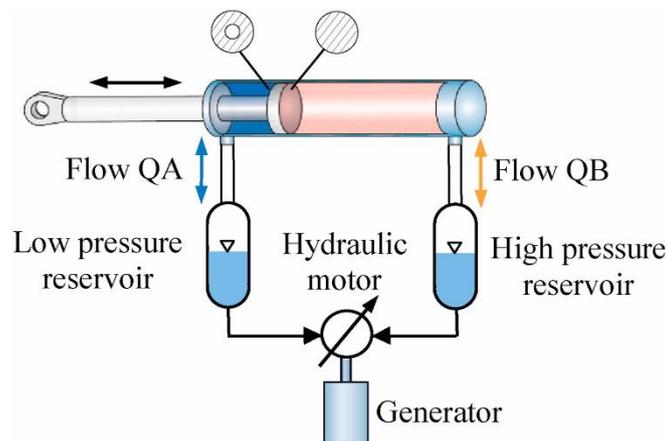


Figura 2.22: Representação do funcionamento de uma transmissão hidráulica. Adaptado de (Zhang *et al.*, 2021).

2.5.3 Acionamento elétrico direto

O acionamento elétrico direto aproveita a movimentação vertical das ondas para empurrar o gerador, obtendo um movimento linear recíproco. É caracterizado pela ausência de um gerador

rotacional, dado que se conecta a um gerador linear diretamente, como representado na Figura 2.23. A geração de energia é levada a cabo por um translator que se move através de um estator. A quase inexistência de manutenção, uma vez que não dispõe de sistemas intermédios, é uma vantagem em relação a outros PTO. Contudo, não funcionam bem sem equipamento elétrico adicional porque a sua produção energética é muito inconstante (Handoko e Mukhtasor, 2021).

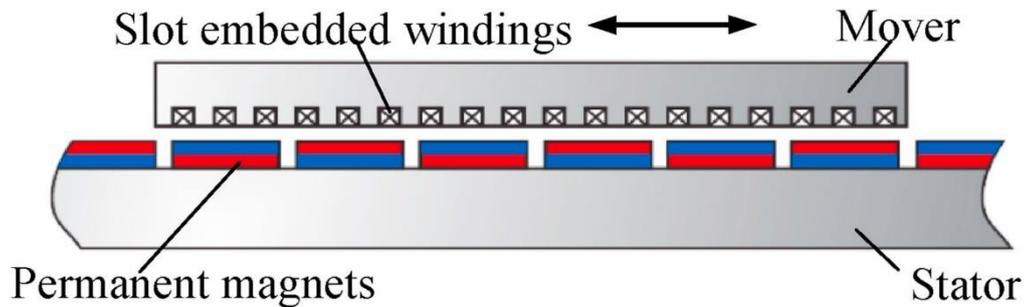


Figura 2.23: Representação de um acionamento elétrico direto. Adaptado de (Zhang et al., 2021).

2.6 Coluna de água oscilante

Os dispositivos de coluna de água oscilante usam o ar como meio para a produção de eletricidade, como mostra a Figura 2.24. Têm câmaras de ar com as partes superior e inferior abertas, respetivamente ligadas à atmosfera e ao mar. Com a incidência da onda na câmara de ar, a coluna de ar é forçada a subir e, posteriormente, a descer quando a onda sai do dispositivo. Esta compressão e descompressão do ar aciona uma turbina (PTO) que por sua vez faz atuar o gerador e assim produzir eletricidade (Zhang *et al.*, 2021).

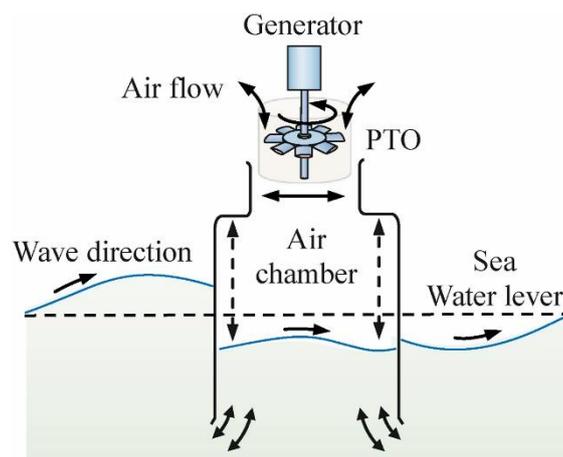


Figura 2.24: Ilustração do funcionamento geral de um dispositivo de coluna de água oscilante. Adaptado de (Zhang et al., 2021).

2.6.1 Fixo

Pico – No ano 1999 foi instalada no Pico, Açores, uma central desenvolvida pela Universidade Técnica de Lisboa (Figura 2.25). Encontra-se na costa, num local onde a profundidade marítima é de 8 metros. Apresenta um funcionamento tradicional dos dispositivos de coluna de água oscilante, onde o movimento de subida e descida das ondas ao entrar pela cavidade submersa comprime e descomprime o ar que movimenta uma turbina Wells. A turbina faz atuar um gerador, produzindo energia elétrica (Valente, 2019; Zhang *et al.*, 2021).

O sistema tem uma capacidade de 400 kW.

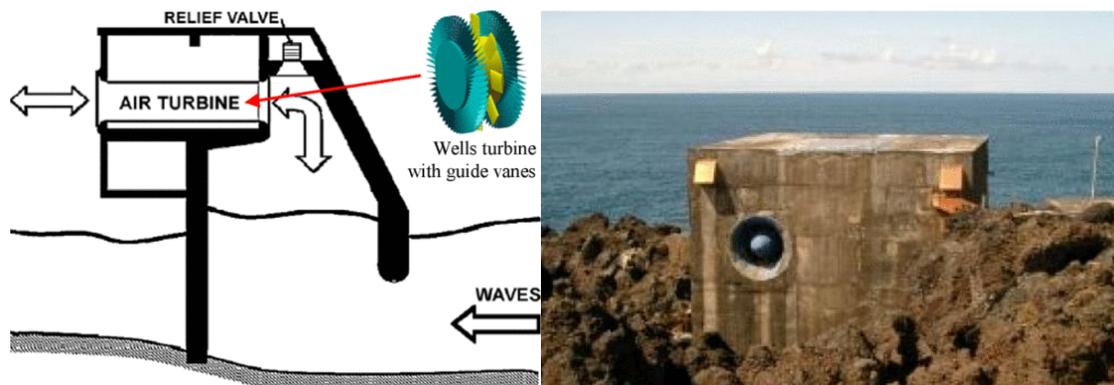


Figura 2.25: Representação da central do Pico e o seu funcionamento. Adaptado de (Lagoun, Benalia e Benbouzid, 2010).

2.7 Power Take-Off de dispositivos de Coluna de Água Oscilante

Os PTO dos dispositivos de coluna de água oscilante funcionam à base de turbinas, contudo, não se trata de turbinas convencionais de sentido único, uma vez que o caudal de ar é recíproco. Assim, são usadas turbinas auto-retificantes para colmatar esse problema. Na Figura 2.26, Figura 2.27 e Figura 2.28, estão representados os 3 tipos de turbinas mais usadas, a turbina de Wells, a turbina de impulso auto-retificante de Babinsten e a turbina de Deniss-Auld (Zhang *et al.*, 2021).

2.7.1 Turbina Wells

Inventada por Wells na década de 1970, está representada na Figura 2.26. Trata-se de uma turbina de ar de fluxo axial, é auto-retificante e a direção do fluxo de ar não afeta o seu binário. Tem como vantagens um baixo custo de fabrico, o rácio de pá-ar e rendimento máximo elevado (Zhang *et al.*, 2021).

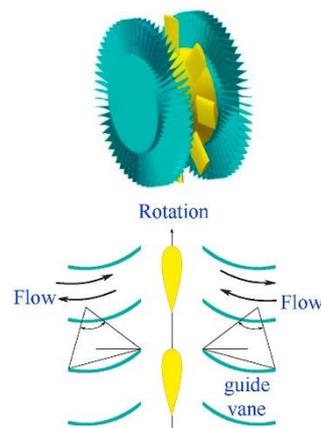


Figura 2.26: Ilustração de uma turbina Wells. Adaptado de (Zhang et al., 2021).

2.7.2 Turbina de impulso auto-retificante (Babinsten)

Patenteada por Babinsten em 1975, apresenta uma estrutura do rotor semelhante à turbina de impulso de fluxo axial monoetapa, sendo apenas acrescentado um conjunto de palhetas-guia simetricamente na secção transversal do rotor (Figura 2.27). Comparativamente à turbina de Wells, apresenta vantagens na absorção da energia das ondas, dado que as pás do rotor da turbina de impulso têm uma menor tensão centrífuga e uma velocidade mais baixa (Zhang *et al.*, 2021).

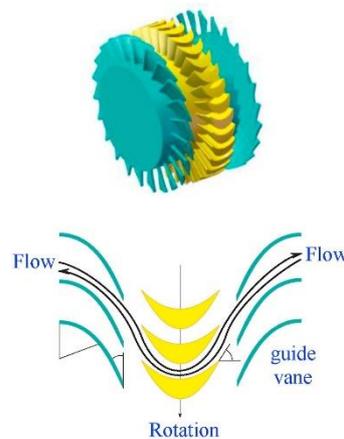


Figura 2.27: Ilustração de uma turbina auto-retificante. Adaptado de (Zhang et al., 2021).

2.7.3 Turbina Deniss-Auld

A turbina Deniss-Auld, representada na Figura 2.28, foi desenvolvida pela Oceanlix Company, é também uma turbina de ar auto-retificante de fluxo axial, com estrutura do rotor semelhante à turbina de Wells. A principal diferença prende-se com as pás do mesmo, os bordos de ambos os lados

das pás da turbina Dennis-Auld têm de ser iguais para carregar o bordo de fuga e ataque alternadamente, devido à reciprocidade do fluxo de ar. Na turbina Wells, o bordo de ataque circular das pás está sempre virado para o fluxo de ar (Zhang *et al.*, 2021).

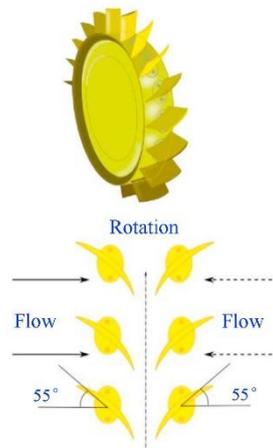


Figura 2.28: Ilustração de uma turbina Dennis-Auld. Adaptado de (Zhang *et al.*, 2021).

2.8 Galgamento/Terminador

Na Figura 2.29 é possível ver uma representação do funcionamento de um dispositivo de galgamento. Esta tecnologia utiliza uma rampa para recolher a onda para um reservatório. Posteriormente, a água é retornada ao mar devido ao desnível existente, passando por um tubo com uma turbina, acionando assim o PTO e, conseqüentemente, acionando o gerador para produzir energia elétrica (Zhang *et al.*, 2021).

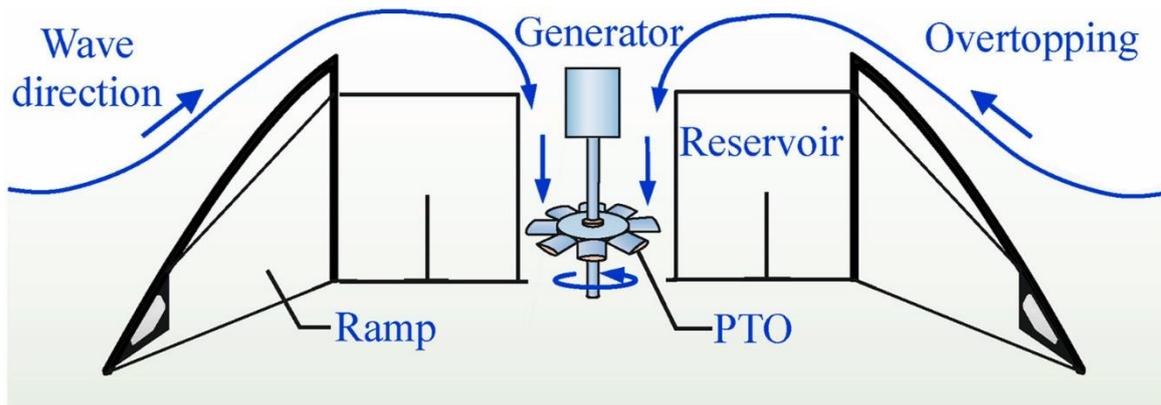


Figura 2.29: Ilustração do funcionamento de um dispositivo de galgamento. Adaptado de (Zhang *et al.*, 2021).

2.8.1 Flutuante

WaveCat – O WaveCat foi desenvolvido pela Universidade de Santiago de Compostela, orientado para funcionamento em alto-mar até 50m de profundidade. É composto por dois braços unidos por uma dobradiça (Figura 2.30), podendo variar o ângulo formado entre si dos 0° aos 120°, adaptando-se às condições marinhas. Aquando de uma tempestade, define-se o ângulo dos braços como 0°, dado que estes convergem no sentido da direção principal das ondas. Na zona onde as paredes laterais se unem existem tanques para recolha de água quando as ondas galgam o dispositivo. Uma vez que o dispositivo se encontra acima do nível da água, esta, por gravidade, faz atuar turbinas durante a viagem descendente até ao mar (Valente, 2019).

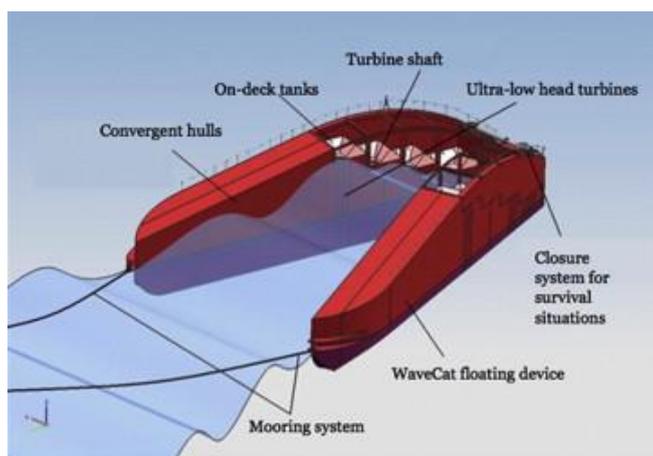


Figura 2.30: Ilustração de um WaveCat. Adaptado de (Fernandez et al., 2012).

Testou-se um protótipo à escala 1:30 num tanque de ondas da Universidade do Porto em 2011. Mais recentemente, na Universidade de Plymouth desenvolveu-se um modelo à mesma escala do anterior com uma potência gerada de 71 kW. Contudo, este valor variava bastante consoante as características das ondas, principalmente o período e a altura (Valente, 2019).

Wave Dragon – Teve como seu criador Erik Friis-Madsen com o objetivo de ser usado em alto-mar. Tem na sua constituição uma plataforma principal, turbinas Kaplan e dois refletores. A plataforma tem uma rampa orientada de acordo com a direção das ondas, para facilitar o galgamento para dentro do reservatório localizado na retaguarda, onde a água irá atravessar as turbinas para atuar o gerador e assim gerar energia elétrica (Figura 2.31). A finalidade dos refletores é de direcionar as ondas para a rampa, fazendo com que a altura destas aumente (Valente, 2019; Zhang *et al.*, 2021).



Figura 2.31: Representação de um Wave Dragon. Adaptado de (Ahamed, McKee e Howard, 2020).

Em Nissum Broads, no norte da Dinamarca, foi instalado em 2003 um protótipo com escala 1:4,5 numa zona de 6 metros de profundidade. Em 2013 entrou em fase pré-comercial com uma potência de 1,5 MW para ser testada na costa da Dinamarca (Valente, 2019).

2.8.2 Fixo

Seawave Slot-Cone Generator (SSG) – Teve como seu desenvolvedor a empresa Wave Energy AS e encontra-se ilustrado na Figura 2.32. Difere dos dispositivos anteriores dado que se encontra na costa e apresenta diversos tanques sobrepostos uns aos outros em forma de rampa, permitindo um maior aproveitamento da energia, uma vez que a água de galgamento é retornada ao mar descendo por uma turbina de vários estágios (Valente, 2019; Zhang *et al.*, 2021).

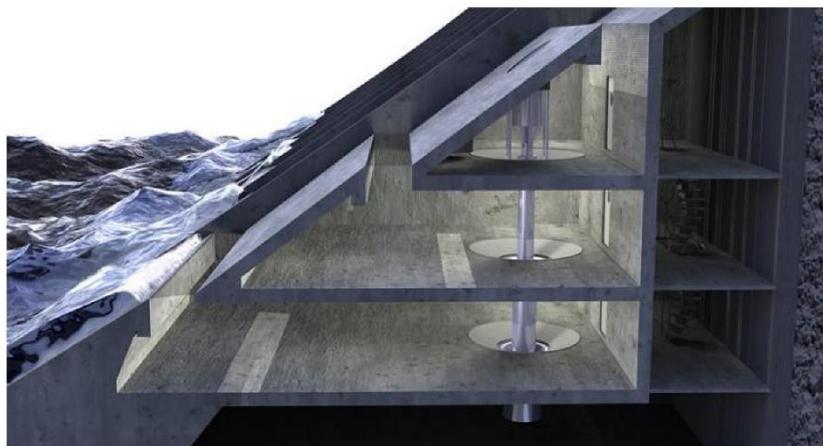


Figura 2.32: Ilustração de um SSG. Adaptado de (Vicinanza *et al.*, 2012).

Apoiado por fundos de cerca de 4 milhões de euros em 2008, foi planeada a construção de duas centrais na costa da Noruega. Foram realizados testes em pequena escala, 1:66, na Universidade de Nápoles Federico II. Adicionalmente, testaram-se diversos modelos numéricos para otimização do design e, assim, aumentar a sua eficiência (Valente, 2019).

2.9 *Power Take-Off* de dispositivos de Galgamento

As turbinas de Pelton, Kascheme e Francis podem ser comparadas de duas diferentes formas, princípio de funcionamento e altura da cabeça de água. Em relação à primeira, dividem-se em turbina de impulso ou turbina reativa. De acordo com a segunda, definem-se entre cabeça de água alta, cabeça de água média e cabeça de água baixa. Na Tabela 2.1 encontra-se a classificação dos diferentes tipos de turbina (Zhang *et al.*, 2021).

Tabela 2.1: Classificação de turbinas de dispositivos de galgamento. Adaptado de (Zhang et al., 2021).

Tipos	Cabeça de água elevada (>50m)	Cabeça de água média (10-50m)	Cabeça de água baixa (<10m)
Turbina de impulso	Turbina de Pelton		
Turbina reativa		Turbina de Francis	Turbina de Kascheme e Turbina de Francis

Na Figura 2.33, é possível verificar que as turbinas de impulso e reativa apresentam diferenças entre si. A de impulso tem as pás do rotor no ar e bocais colocados em posições específicas para que o fluxo de água atinja as pás do rotor a grande velocidade, alcançando assim a rotação. Já a reativa tem o rotor rodeado por um invólucro de pressão e está completamente submerso na água. Quando esta flui através das pás do rotor, a sua forma distinta leva a que a diferença de pressão gere uma força de elevação que atua no rotor, fazendo-o rodar (Zhang et al., 2021).

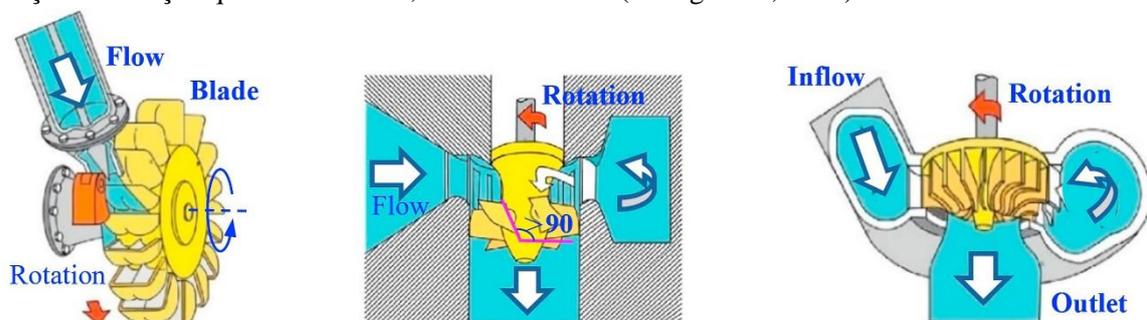


Figura 2.33: Ilustração das turbinas de Pelton, Kascheme e Francis, por esta ordem. Adaptado de (Zhang et al., 2021).

2.10 Dispositivos submersos de diferença de pressão

Os dispositivos de diferença de pressão são na sua essência absorvedores pontuais que utilizam a diferença de pressão acima do dispositivo entre os picos máximos e mínimos das ondas. São compostos por um cilindro superior móvel e um compartimento cilíndrico cheio de ar preso ao fundo. Produzem eletricidade devido à compressão e descompressão do ar no compartimento. Como estão submersos, reduzem o impacto visual e estão protegidos dos embates das ondas, contudo, a sua manutenção é mais difícil (Drew, Plummer e Sahinkaya, 2009; Koca et al., 2012; Zhang et al., 2021).

mWave – Um dispositivo da australiana Bombora Wave Power, foi projetado para utilização junto à costa e está ilustrado na Figura 2.34. Contém células de ar envoltas por membranas flexíveis na sua estrutura principal. A diferença de pressão deve-se à ondulação, quando a altura da onda aumenta a membrana desce e vice-versa, levando a que o ar seja comprimido e descomprimido. O ar alimenta um circuito pneumático através de válvulas anti-retorno. Seguidamente, passa por turbinas ligadas a um gerador, produzindo energia elétrica e, finalmente, retorna a células com baixa pressão. Retirando o ar de dentro das células, é possível proteger o dispositivo de condições meteorológicas adversas (*Bombora begins final test and assembly of world's most powerful Wave Energy Converter* / Bombora, [s.d.]; Valente, 2019).



Figura 2.34: Ilustração de um dispositivo mWave. Adaptado de (Rehman et al., 2023).

Estava prevista a instalação de um parque de conversores em Peniche com uma capacidade total de 60 MW. Devido a fundos obtidos na ordem dos 10 milhões de libras, encontrava-se em planeamento a construção de um projeto de demonstração com 1,5 MW de potência no País de Gales (*Bombora begins final test and assembly of world's most powerful Wave Energy Converter | Bombora*, [s.d.]).

2.11 Bulge Wave

Consistem num tubo de borracha cheio de água, com ancoramento ao solo marinho com direção perpendicular à ondulação. A água entra pela popa e o movimento da onda provoca variações de pressão ao longo do tubo, criando uma saliência. O deslocamento desta irá acionar uma turbina na proa, onde a água retorna ao mar, gerando energia (Koca *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2021).

Anaconda – O Anaconda é um projeto da Checkmate Sea Energy com o objetivo de operar abaixo da superfície em zonas onde o mar atinge profundidades superiores a 50 metros. É constituído por um tubo de borracha cheio de líquido que se movimenta consoante a ondulação, sofrendo pressões devido à gravidade e apertos no tubo. O fluido no interior é pressurizado e desloca-se até à extremidade onde se encontra uma turbina hidráulica, gerando energia. Para que o tubo esteja sempre orientado com a direção principal das ondas, encontra-se ancorado na parte frontal (Figura 2.35) (Home - Checkmate Seaenergy, [s.d.]; Valente, 2019).



*Figura 2.35: Ilustração do dispositivo Anaconda.
Adaptado de (Home - Checkmate Seaenergy, [s.d.]).*

Apenas foram testados protótipos com 8 metros de comprimento até 2011, sendo necessário ter um dispositivo com 150 metros de comprimento para se conseguir extrair 1 MW. Devido a fundos fornecidos pelo governo escocês, o conversor iniciou testes numéricos e simulações em 2016 (*Additional Research Undertaken - Checkmate Seaenergy, [s.d.]; Valente, 2019*).

2.12 Rotating Mass

Estes dispositivos aproveitam a energia das ondas de duas formas, agitação e oscilação. Esses movimentos acionam um peso excêntrico ou um giroscópio provocando precessão. Com a conexão a um gerador produz-se energia (Koca *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2021).

SEAREV – Em 2002, a Escola Central de Nantes desenvolveu o SEAREV (Figura 2.36), que consiste numa roda com o centro de massa deslocado em relação ao centro geométrico. Isto confere-lhe um comportamento semelhante a um pêndulo, oscilando com o movimento de todo o dispositivo devido à ondulação. O movimento relativo entre a roda e o invólucro exterior ativa o sistema hidráulico, transferindo energia para um gerador elétrico. O mecanismo apresenta boa durabilidade, uma vez que todos os componentes móveis se encontram dentro do invólucro. Para que o conversor esteja alinhado com a direção principal das ondas, encontra-se ancorado apenas por um ponto de amarração (Valente, 2019).

Apenas simulações numéricas foram realizadas entre 2002 e 2005, testando diversos modelos para estudar diferentes parâmetros, nomeadamente, a forma, o sistema de ancoragem e o sistema responsável pela captação de energia. Fruto destes estudos, foi possível concluir que o dispositivo poderia alcançar anualmente uma produção energética de 600 MWh. Em 2005, construiu-se um protótipo à escala 1:12, sendo este testado em tanque de ondas na Escola Central de Nantes em 2006. Verificaram-se problemas aos níveis da robustez e da forma do dispositivo. Assim, entre 2006 e 2009 conceberam-se diversas versões para otimização da forma (Valente, 2019).



Figura 2.36: Representação do SEAREV. Adaptado de (Lagoun, Benalia e Benbouzid, 2010).

ISWEC – O Inertial Sea Wave Energy Converter foi desenvolvido pela empresa italiana Wave for Energy. É constituído por um giroscópio inserido dentro de um corpo flutuante que se move devido à ondulação e encontra-se ilustrado na Figura 2.37. O balançar do corpo e a velocidade de rotação de uma roda giratória incluída no giroscópio leva a que este se mova também, gerando um binário em volta do eixo que se encontra paralelo à direção das ondas, ativando o gerador (Valente, 2019).

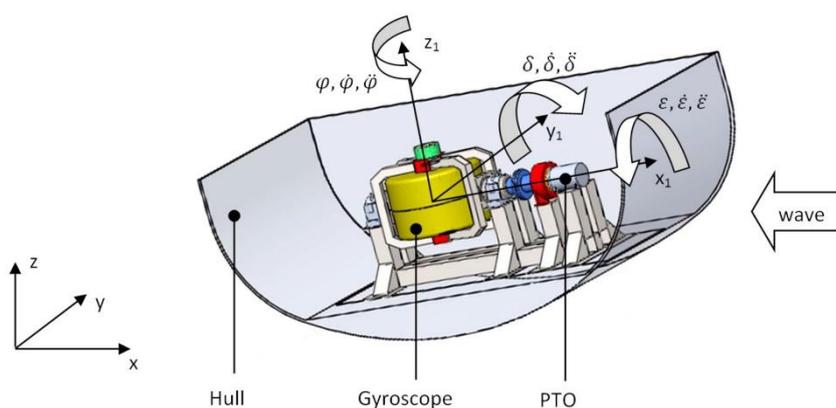


Figura 2.37: Ilustração do funcionamento do ISWEC. Adaptado de (Bracco et al., 2016).

Foi desenvolvido um primeiro protótipo à escala de 1:12 em 2009 num tanque de ondas da Universidade de Edimburgo, apresentando um problema comum a muitos WECs, a potência à saída era pulsante. Até esta data apenas se tinham efetuado testes numéricos e simulações. Em 2015 foi instalado em Itália um protótipo à escala real (Figura 2.38) (Valente, 2019).

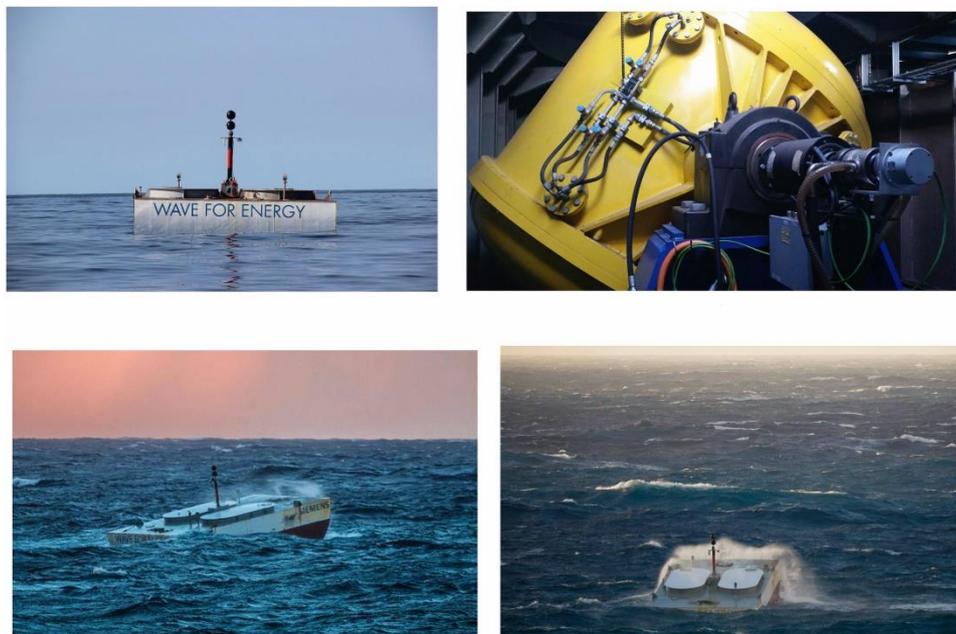


Figura 2.38: Representação do dispositivo ISWEC, em alto mar. Adaptado de (Khedkar et al., 2021).

Penguin – O Penguin foi desenvolvido pela empresa Wello Oy em 2008 e assemelha-se a um assimétrico com uma massa excêntrica no interior (Figura 2.39). Esta massa está acoplada a um veio e move-se devido ao movimento do barco motivado pela ondulação (Valente, 2019).



Figura 2.39: Representação do dispositivo Penguin, em construção e em alto mar. Adaptado de (Boren, 2015).

Entre 2008 e 2011 efetuaram-se testes com protótipos de escala 1:18 em tanques de ondas e em ambiente marinho com uma escala de 1:8, sendo os resultados positivos. Os bons indicadores levaram a equipa a investir num modelo à escala real de capacidade de 1 MW, que ficou instalado na Escócia em 2012. Em 2018, em parceria com a China International Marine Containers construiu-

se um terceiro conversor para ficar instalado na costa chinesa (*The Penguin - Wello Oy*, [s.d.]; Valente, 2019).

WITT – O WITT difere dos demais uma vez que não se trata de um verdadeiro dispositivo de aproveitamento de energia das ondas, mas sim de um conversor de energia cinética em energia elétrica, através de uma caixa de velocidades e um pêndulo (Figura 2.40). Tem a característica de operar à superfície e retirar energia ao longo de movimentos nos dois eixos horizontais, não sendo influenciado pela direção das ondas. Pode ser aplicado a boias em alto-mar para extração de energia. É um dispositivo resistente às condições do meio uma vez que todas as suas partes móveis se encontram dentro de um invólucro (Crowley *et al.*, 2018; Valente, 2019).

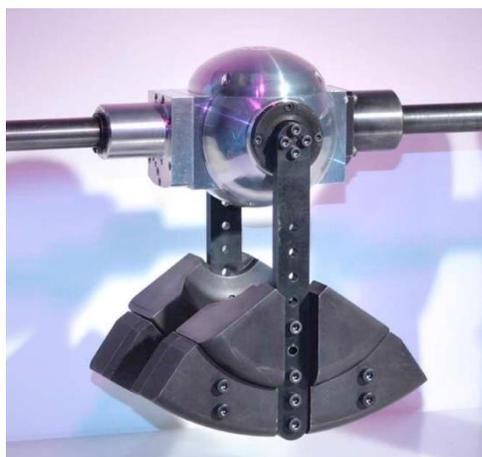


Figura 2.40: Representação do dispositivo WITT. Adaptado de (Crowley *et al.*, 2018).

2.13 Resumo da atualidade dos dispositivos

Como é possível verificar na Tabela 2.2, a esmagadora maioria dos dispositivos ainda se encontra em fase de testes e/ou simulações, apesar de alguns deles já estarem a ser desenvolvidos há vários anos. Outros projetos foram abandonados por falta de investimento ou por problemas detetados nos dispositivos durante as fases de testes marítimas.

Apesar de haver uma grande variedade de dispositivos e tecnologias, existem diversos problemas associados aos conversores, provocados na sua maioria pelas condições ambientais. A salinidade da água do mar degrada mais rapidamente os componentes que se encontram submersos. As tempestades danificam os dispositivos móveis que se encontram à superfície, no entanto já existem diversos conversores com sistemas de proteção contra essas condições mais adversas. Os sistemas de amarração ao fundo do mar também apresentam problemas de durabilidade, podendo partir ou arrastar o dispositivo.

Outros fatores importantes prendem-se com a distância à costa, a simplicidade de instalação e manutenção do dispositivo, afetando o custo dos conversores e a facilidade de ligação à rede.

Os poucos dispositivos que se encontram em fase de comercialização combatem alguns destes problemas, tornando-os mais viáveis para implementação à escala global. Assim, é imperativo analisar estes possíveis problemas ao desenvolver um novo conversor.

Idealmente, o dispositivo deveria encontrar-se relativamente perto da costa, conter mecanismos de fácil instalação e manutenção, não apresentar partes submersas, tendo o cuidado de proteger as partes móveis à superfície das tempestades e não ter sistemas de amarração.

No capítulo seguinte será abordado o conceito desenvolvido neste trabalho, que apresenta como características a ausência de sistemas de amarração e de partes submersas, tendo as suas partes móveis assentes numa plataforma flutuante.

Tabela 2.2: Resumo dos dispositivos e o seu estado atual.

Tipo de dispositivo	Nome do dispositivo	Estado atual
Absorvedores pontuais	Aquabuoy	Instalado um protótipo na costa dos EUA em 2007. Não produz energia elétrica, apenas serve para estudar a pressão de saída do dispositivo. Estava prevista em 2008 ser construída uma versão comercial de um dispositivo com 250 kW (<i>The Energy Blog: AquaBuOY 2.0 Deployed Off Oregon Coast</i> , [s.d.]).
	PowerBuoy	Versão pré-comercial instalada em 2019 com geração de potência até 3 kW (Valente, 2019).
	Pontoon Power Converter	Realizados estudos em tanques de ondas. Atualmente sem fundos para continuar estudos (Valente, 2019).
	CETO	Venceu a fase 3 do programa pré-comercial da EuropeWave, obtendo um fundo de 3,75 milhões de euros. Prevê-se a aplicação marítima em 2025 (<i>Carnegie wins €3.75m Phase 3 EuropeWave PCP Contract - Carnegie</i> , [s.d.]).
	Searaser	Fase de simulações numéricas (Mousavi <i>et al.</i> , 2021).
Atenuadores	Lifesaver	Problemas no sistema de ancoramento ao fundo do mar (Cross, 2020).
	Pelamis	A empresa criadora do dispositivo entrou em insolvência em 2014 e não foram comunicados novos desenvolvimentos (<i>Pelamis Wave Power : EMEC: European Marine Energy Centre</i> , [s.d.]).
	Stingray	Fase de testes marítimos para, posteriormente, entrar em fase de pré-comercialização (Lenee-Bluhm, 2022).
	The Power Wing and The Wave Clapper	Apresenta duas centrais ligadas diretamente à rede, uma em Gibraltar e outra em Israel (<i>Eco Wave Power - Wave Energy Company</i> , [s.d.]).
	Wavestar	Protótipo desativado em 2016 devido à falta de fundos, depois de ter gerado energia para a rede durante alguns anos (Valente, 2019).

	Floating Duck	Sob investigação após estudo de um protótipo em alto mar de 2015 a 2016 (Valente, 2019).
	Eagle	Implementado o primeiro dispositivo (500 kW) para averiguar a viabilidade de construção de uma futura central (« <i>Zhoushan</i> » - <i>First 500kW Sharp Eagle Wave Energy Converter Delivered---</i> <i>Chinese Academy of Sciences</i> , [s.d.]).
Conversores oscilantes de translação	Wave Roller	Criado um <i>pack</i> industrial para aplicação comercial. Serão preparados dois projetos piloto de centrais com capacidade de 15 MW (<i>WaveFarm creates industrial package</i> , [s.d.]).
	Bio Wave	Protótipo retirado de alto mar em 2019 devido a problemas no cabo de ligação à rede elétrica e incapacidade de geração de energia (Valente, 2019).
	Langlee System	Fase de pré-comercialização, enquanto espera investidores (<i>Canary Islands – the Wave Power Islands / Langlee Wave Power</i> , [s.d.]).
Coluna de água oscilante	Pico	Apresentou problemas de ressonância mecânica após alguns anos de funcionamento, o que levou a uma estrutura muito frágil, acabando por colapsar em 2018 e consequente remoção da ligação à rede elétrica (Valente, 2019).
	WaveCat	Fase de testes em tanques de água (Valente, 2019).
Galgamento	Wave Dragon	Fase de pré-comercialização (<i>Wave Dragon Project - Milla Fjord Site / Tethys</i> , [s.d.]).
	SSG	Fase de simulações numéricas (Valente, 2019).
Dispositivos submersos de diferença de pressão	mWave	Fase de testes finais antes de implementação no mar (<i>Bombora begins final test and assembly of world's most powerful Wave Energy Converter / Bombora</i> , [s.d.]).
Bulge wave	Anaconda	Após bons indicadores nos primeiros testes, foram desenvolvidas duas novas unidades de maior escala encontram-se para testagem em tanques de ondas (<i>Additional Research Undertaken - Checkmate Seaenergy</i> , [s.d.]).
	SEAREV	Problemas detetados na forma e na robustez do protótipo (Valente, 2019).
Rotating Mass	ISWEC	Instalação do primeiro dispositivo no mar (<i>ISWEC: energy from the sea / Eni</i> , [s.d.]).
	Penguin	Dispositivo à escala real, pronto a ser comercializado (<i>The Penguin - Wello Oy</i> , [s.d.]).
	WITT	Desconhecido.

Capítulo 3

3 Enquadramento do Conceito

Este capítulo tem como objetivo enquadrar o conceito a ser desenvolvido, tendo em conta os estudos realizados anteriormente, dado que se trata de um projeto de continuidade, e de salientar os componentes chave do dispositivo.

3.1 Projetos Anteriores

O projeto de desenvolvimento de um protótipo para recuperação de energia das ondas iniciou na Universidade de Aveiro em 2019 (Valente, 2019), onde foram analisados diversos conceitos de boias que acomodassem um sistema de geração de energia elétrica à base de geradores lineares. Analisando diferentes parâmetros, tais como: a inovação, o potencial de geração de energia, a resistência derivada do uso e do meio, a facilidade de manutenção, a viabilidade de construção e os impactos negativos causados à natureza e visuais. Assim, por se apresentar como o de maior potencial, foi escolhido o conceito de plataforma flutuante que funciona devido ao movimento relativo entre 2 boias. Contudo, a boia estática dá lugar à plataforma, onde existem diversas cavidades onde em cada uma entra uma boia de menores dimensões. A geração de eletricidade ocorre, dado que existem enrolamentos nas cavidades e ímanes nas boias, o movimento destas em relação à plataforma estática converte a energia das ondas em energia elétrica. Na Figura 3.1 é possível observar o conceito final desenvolvido.



Figura 3.1: Conceito final desenvolvido por (Valente, 2019).

Em 2021, dando continuidade ao trabalho descrito anteriormente, foi iniciado um novo projeto na Universidade de Aveiro (Cardoso, 2021), focado no desenvolvimento de um novo PTO. Inicialmente foi usado um PTO de acionamento elétrico direto, contudo, apresentava-se como uma tecnologia mais cara e difícil de incorporar num dispositivo de maior escala, uma vez que necessitam de um sistema especificamente construído para funcionar. Assim, optou-se por desenvolver um PTO mecânico, que para além de ser a melhor opção a nível de custos, é também mais fácil de implementar a larga escala. Para confirmar a viabilidade do conceito, fixou-se a potência máxima gerada nos 200 W, estabelecendo a escala e garantindo que gera energia elétrica suficiente.

Este trabalho começou por estudar um conceito de sistema semirrígido, em que o PTO e a haste da boia não se encontravam diretamente conectados um ao outro, permitindo que a haste se pudesse mover e inclinar ligeiramente até um certo ponto, acompanhando o movimento natural das ondas, e o PTO se mantivesse com funcionamento completamente linear. No entanto, os movimentos laterais iriam acrescentar forças de arrasto, limitando a eficiência energética ou até mesmo bloqueando completamente o sistema.

Assim, foi escolhido um sistema rígido com cremalheiras e pinhões, mais tradicional, e estudados dois conceitos, representados na Figura 3.2, que diferiam na posição das duas mangas de rolamentos, encarregues de guiar a haste e absorver forças laterais. O primeiro tinha o PTO colocado entre os rolamentos para que estes não sofressem cargas tão grandes, mas acaba por tornar difícil o seu alinhamento. Como acima do PTO a haste não sofre forças laterais, o uso de rolamentos aí não fazia muito sentido e esse conceito acabou por ser abandonado. Desta forma, um segundo foi estudado, no qual os dois rolamentos se encontravam abaixo do PTO. Esta mudança permitiu separar a haste principal em duas, uma para a boia e outra para fixar as cremalheiras.

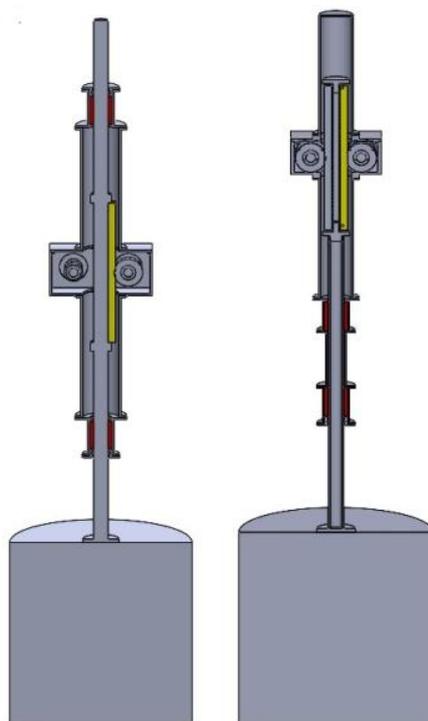


Figura 3.2: Conceito de guiamento desenvolvido por (Cardoso, 2021).

3.2 FMEA de conceito

Uma vez que este trabalho consiste na continuação direta da dissertação da Universidade de Aveiro (Cardoso, 2021), o ponto de partida centrou-se na revisão peça a peça e do conjunto desenvolvidos, com o intuito de proceder à realização de melhorias ao sistema e à otimização ou ajuste de peças já existentes. É possível observar na Figura 3.3, o conceito final desenvolvido por (Cardoso, 2021).



Figura 3.3: Conceito final desenvolvido por (Cardoso, 2021).

Seguidamente, na Tabela 3.1, encontra-se um FMEA de conceito onde se encontra explícita a análise do conceito. É possível verificar que existem pontos a ter em atenção para garantir que o protótipo a desenvolver monta e funciona corretamente. Aspetos como a posição de montagem dos rolamentos unidirecionais, a estabilidade da estrutura, o guiamento do sistema e a força necessária de fornecer à entrada foram estudados na elaboração do FMEA de conceito, para evitar possíveis falhas no desenvolvimento do protótipo a construir.

Tabela 3.1: FMEA de conceito.

Função	Potenciais Falhas	Causa da Falha	Possíveis Efeitos das Falhas	Termos Críticos das Falhas	Possíveis Ações Corretivas
Transformação do movimento linear em rotativo	Aproveitamento único do movimento ascendente ou descendente.	Rolamentos unidirecionais mal montados.	Perda de metade do potencial de geração de energia por parte do dispositivo.	Falha maior/crítica.	Corrigir posição dos rolamentos unidirecionais.
	Rotação do pinhão de saída em dois sentidos.		Dispositivo não funciona ou não gera energia.		
Atuação do movimento linear	Perda do movimento guiado.	Movimento da haste não perfeitamente vertical.	Dispositivo pode encravar.	Falha crítica.	Retificar a haste. Adicionar rolamentos para melhor guiar a haste.
			Possível destruição do dispositivo.		
Multiplicação	Rotação muito lenta do gerador.	Rotação insuficiente do dispositivo. Mau ajuste das ligações à entrada/saída do multiplicador.	Baixa geração de energia elétrica do sistema.	Falha maior.	Aumentar a força fornecida à entrada do sistema. Verificar ligações chavetadas e presas por atrito.
Função estrutural		Número de apoios insuficientes.	Possível queda da estrutura.		Aumentar o número de apoios.
	Estrutura instável.	Mau aperto dos elementos de fixação. Má localização do cárter.	Segurança de pessoas à volta em risco. Dano no dispositivo que se encontra na parte superior.	Falha crítica.	Verificar o aperto dos elementos de ligação. Rever o centro de massa.

Capítulo 4

4 Desenvolvimento do Conceito

Neste capítulo pretende-se descrever e explicar os processos de desenvolvimento do conceito, desde a análise dos esboços, até à construção do protótipo.

O objetivo definido no início desta dissertação consistia na construção e teste de um dispositivo para aproveitamento da energia das ondas, em laboratório e futuramente em tanque de ondas. Neste trabalho, a boia acabou por ser substituída por um cilindro pneumático, desenvolvido noutra dissertação, dada a impossibilidade de testar o dispositivo em tanque de ondas nesta fase. Na Figura 4.1 é possível visualizar o conceito final desenvolvido nesta dissertação.



Figura 4.1: Conceito final.

4.1 Componentes fulcrais do dispositivo

Nesta secção serão descritos os principais componentes, responsáveis pelo funcionamento característico deste protótipo.

4.1.1 Gerador

Na dissertação anterior foi escolhido o gerador Yuzo da Tesup, representado na Figura 4.2. Trata-se de uma pequena turbina eólica concebida para uso em barcos de recreio. Adicionalmente traz um conversor AC-DC, é responsável por converter em corrente contínua a corrente trifásica proveniente do gerador que é capaz de produzir 200 W de potência às 1000 RPM.



Figura 4.2: Representação da turbina eólica Yuzo e o seu controlador, ambos da Tesup. Adaptado de (Cardoso, 2021).

4.1.2 Boia/Cilindro

Para fornecer a força necessária ao sistema de modo a alcançar os 200 W máximos pretendidos, foi dimensionada por (Cardoso, 2021) uma boia, cujos parâmetros se encontram na Tabela 4.1, para que fornecesse uma força adequada a uma potência de 300 W. Esta é superior à capacidade do gerador, uma vez que tem em conta as ineficiências e perdas de energia ao longo do sistema.

Tabela 4.1: Parâmetros da boia.

Parâmetros	Valor
Peso (kg)	51
Volume (m³)	0,1022
Diâmetro (m)	0,5
Altura (m)	0,52

No entanto, como esta dissertação não previa a realização de testes em tanque de ondas, decidiu-se substituir a boia por um cilindro pneumático que replica o movimento e a carga que a boia efetuaria. Na Tabela 4.2 encontram-se as características deste cilindro.

Tabela 4.2: Parâmetros do cilindro.

Parâmetros	Valor
Força (N)	900
Pressão de trabalho (bar)	6
Diâmetro (m)	40
Curso (m)	400
Consumo de ar atmosférico (l/min)	291,34
Velocidade de operação (m/s)	0,369
Frequência (Hz)	0,392

4.1.3 Rolamentos unidirecionais

Os rolamentos unidirecionais são parte importante do sistema, uma vez que são o componente que permite que sejam aproveitados os movimentos ascendente e descendente, tornando o dispositivo num 2 em 1. Isto acontece porque, apesar de haver dois sentidos de rotação, apenas se transmite momento de rotação num deles quando os rolamentos unidirecionais entram em funcionamento. A rotação no outro sentido é solidária ao sistema e não transmite momento. Os rolamentos escolhidos foram Rodas Livres CSK 25 P 2rs, que dispõem de um escatel para chaveta no diâmetro interno para que possa existir transmissão de energia do veio para o rolamento e, conseqüentemente, para o pinhão onde rolamento está inserido por aperto. As características das rodas livres encontram-se abaixo na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Parâmetros das Rodas Livres. Adaptado de (Roues libres, 2019).

Parâmetros	Valor
Referência	CSK 25 P 2rs
Diâmetro interno, d (mm)	25 H7
Diâmetro externo, D (mm)	52 h5
Largura, L (mm)	20
Largura do escatel, b (mm)	8 js10
Altura do escatel, t (mm)	2
Carga dinâmica, C (kN)	10,7
Carga estática, Co (kN)	5,46
Momento, TkN (N.m)	85
Velocidade limite (RPM)	5200
Peso (kg)	0,14

4.1.4 Multiplicador

Outro componente muito importante neste projeto é a caixa multiplicadora, responsável por reduzir o momento que recebe à entrada e assim aumentar a velocidade de rotação à saída. Assim é possível multiplicar em várias vezes a rotação de um sistema para que seja usada por outros componentes cujo funcionamento está associado à velocidade de rotação, como é o caso de geradores rotativos.

A caixa multiplicadora usada nesta dissertação trata-se, na verdade, de uma caixa redutora planetária montada ao contrário, uma vez que tem essa possibilidade. Assim o veio originalmente de entrada passa a ser o de saída e o veio originalmente de saída passa a ser o de entrada, conseguindo uma multiplicação da rotação em oito vezes. Depois de muito procurar caixas que se adequassem às dimensões, velocidades, forças, momentos, fixação e preço pretendidos, a escolhida foi a caixa planetária da Nanotec GPLE80-1S-8F87 que se encontra na Figura 4.3 abaixo. Na Tabela 4.4 a seguir estão especificados os diferentes parâmetros da caixa.

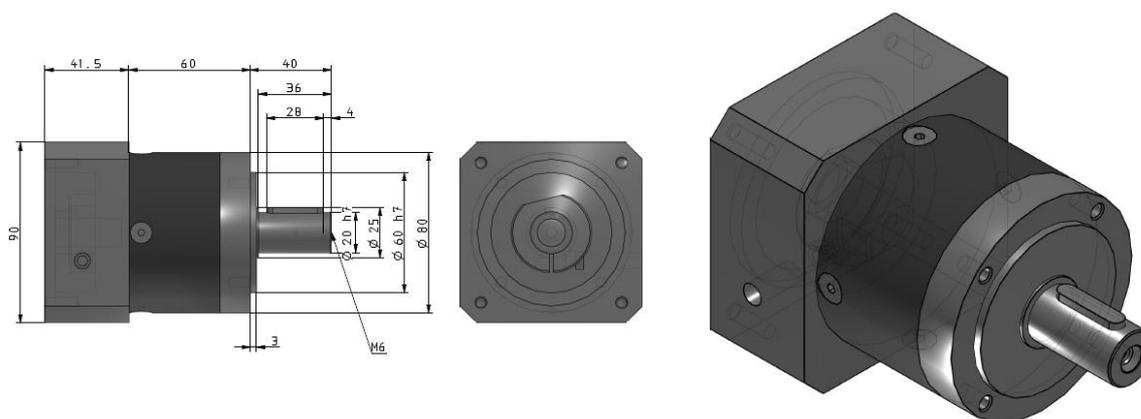


Figura 4.3: Ilustração da caixa redutora/multiplicadora escolhida. Adaptado de (Catalog e Catalog, [s.d.]).

Tabela 4.4: Parâmetros da caixa redutora/multiplicadora. Adaptado de (Catalog e Catalog, [s.d.]).

Parâmetros	Valor
Referência	GPLE80-1S-8-F87
Para tamanho de motor	NEMA 34
Eficiência (%)	97
Folga máxima (arco-minuto)	7
Binário de saída nominal (Nm)	50
Binário de saída máximo (Nm)	80
Fator de redução	8
Velocidade máxima à entrada (RPM)	7000
Momento de inércia (kg*mm²)	39
Horas de serviço (h)	30000
Temperatura de operação (°C)	-25 to +90
Comprimento (mm)	60
Comprimento da Flange (mm)	41,5
Peso (kg)	2,1
Carga axial admissível (N)	900
Carga radial admissível (N)	650
Fator de proteção IP	IP54

4.2 Melhorias ao sistema

Esta secção vai debruçar-se sobre as peças criadas de raiz, que têm como finalidade acrescentar uma melhoria ao conceito estudado anteriormente, estando representadas através de desenhos 3D desenvolvidos em *software* Computer-Aided Design (CAD). Todas as peças têm os seus desenhos técnicos na secção de Anexos.

4.2.1 Suporte do gerador

Após a visualização do dispositivo, ficou evidenciada uma alteração necessária de ser realizada. A peça que servia de suporte ao gerador não se mostrava adequada à sua função. Consistia numa placa fina em forma de “L” que fixava, por atrito, o gerador junto ao veio de saída. Uma vez que este se encontrava suspenso e, dada a natureza do suporte, com o aumento da velocidade de rotação, as vibrações naquele local seriam elevadas, o que se apresenta como algo indesejado. Outro problema era o facto de o veio de saída estar orientado lateralmente em vez de verticalmente, no sentido de cima para baixo.

Assim, projetou-se um novo suporte, mais compacto, robusto e com fixação do gerador à mesa, evitando um aumento de vibrações derivadas de estar suspenso. Na Figura 4.4 encontra-se representado o novo suporte do gerador que, na sua parte mais larga, serve como porca de fixação para segurar o gerador à mesa e no diâmetro mais estreito tem furos passantes para fixar o gerador, impedindo-o de rodar no plano horizontal.

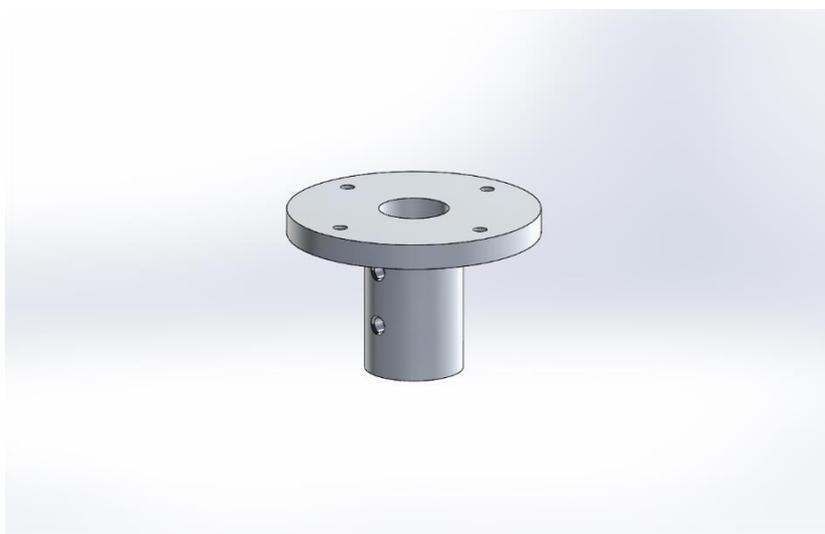


Figura 4.4: Desenho do suporte do gerador.

4.2.2 Volante de inércia

Seguidamente, procurou-se desenvolver soluções que aumentassem a eficiência do sistema. Existe uma diminuição gradual da velocidade quando a onda se aproxima do pico, sendo nula quando o atinge. Desta forma, o sistema também terá alturas em que não estará a converter energia.

Para colmatar este problema, foi analisada a implementação de um variador de velocidade contínuo ou de um volante de inércia. Tendo em conta a facilidade de incorporação no sistema e de produção e os custos associados, optou-se por usar um volante de inércia.

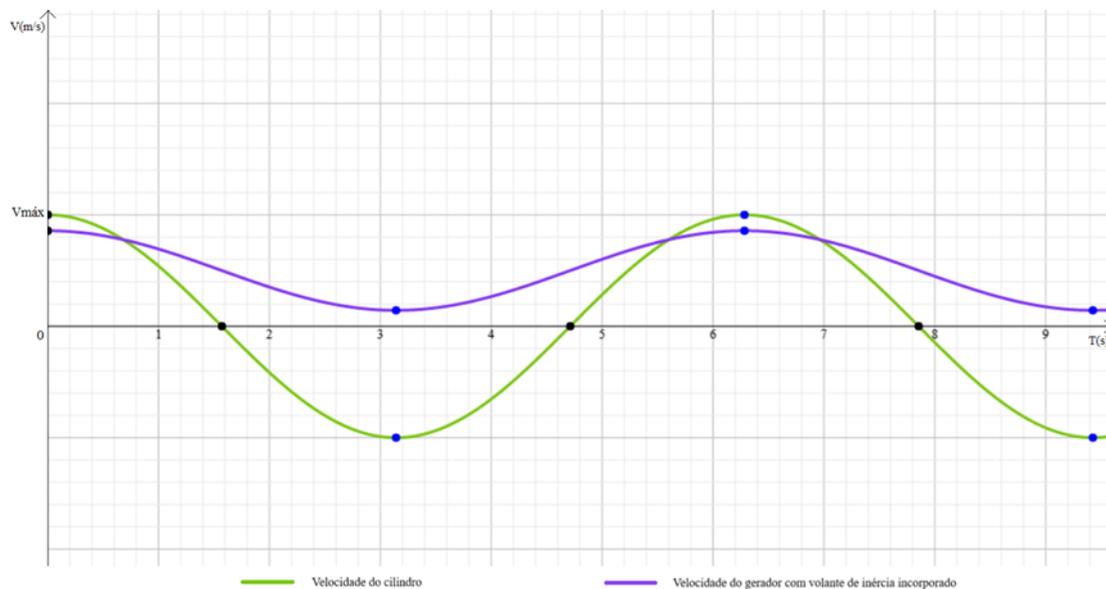


Figura 4.5: Gráfico ilustrativo das velocidades do cilindro e do gerador quando incorporado um volante de inércia no sistema.

O seu funcionamento assemelha-se a uma bateria, só que mecânica, no sentido em que acumula energia. Neste caso, não se trata de uma acumulação de energia elétrica, mas sim de inércia rotacional. Uma parte do movimento linear fornecido pelas ondas, e que é convertido em movimento rotativo, é absorvido pelo volante de inércia fazendo-o rodar a alta velocidade. Quando a onda se aproxima dos picos, a inércia rotacional acumulada no volante é devolvida ao sistema, permitindo atenuar as variações de velocidade sofridas.

Na Figura 4.5, meramente ilustrativa, é possível visualizar o efeito provocado pela aplicação de um volante de inércia ao sistema. Na curva a verde está representada a velocidade do cilindro pneumático. Apresenta vertentes positiva e negativa que correspondem ao movimento de subida e de descida do pistão do cilindro. A curva a roxo representa a velocidade do gerador, sempre positiva uma vez que este roda sempre no mesmo sentido. Devido à incorporação do volante de inércia, a velocidade não chega a ser máxima dado que este componente absorve parte da energia fornecida. Como pontos positivos, evita que o gerador pare (velocidade igual a zero) e permite que a velocidade seja mais constante (onda atenuada).

Contudo, a implementação de um volante de inércia tem o entrave de impedir o pico máximo de energia fornecido pela onda, dado que parte dessa energia é absorvida pelo volante e não é devolvida ao sistema na sua totalidade. Para diminuir essa perda, o volante encontra-se colocado diretamente a seguir ao multiplicador de rotação e antes do gerador. Apesar da perda do pico máximo da onda, consegue-se uma conversão de energia mais contínua e estável, conseguindo obter uma maior eficiência.

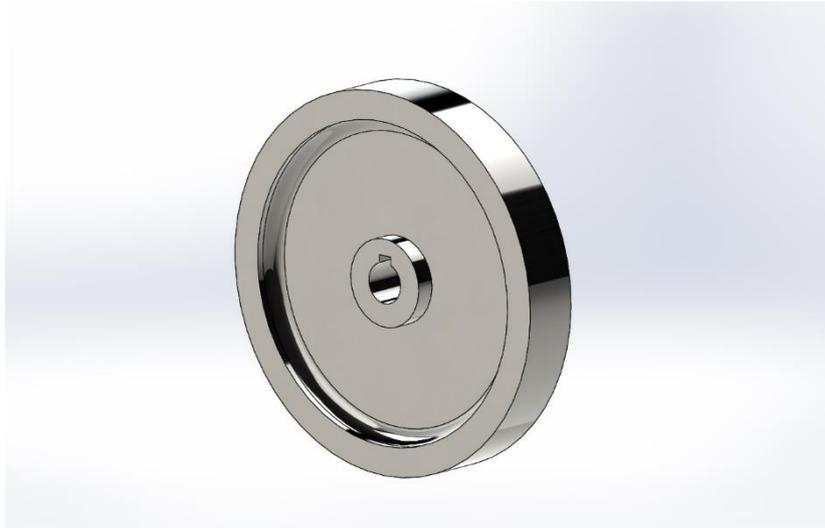


Figura 4.6: Desenho do volante de inércia.

Para dimensionar o volante de inércia (Figura 4.6) estabeleceu-se que este deveria ter uma capacidade de acumular uma energia equivalente a 25% da energia do sistema. Esta percentagem refere-se ao tempo em que a onda abranda, atinge o pico e inicia a aceleração. Calculada a percentagem obteve-se o valor de 75 J. O cálculo foi efetuado com base no Teorema de Steiner, equação (4.1), dado que a estrutura do volante não é uniforme, sendo necessário dividir o objeto em vários mais pequenos. É possível usar o Teorema porque o eixo de rotação é o mesmo para todos os objetos. Assim, obtém-se o momento de inércia (I) de cada componente, somando o momento de inércia em relação ao centro (I_c) ao produto da massa do corpo (M) com o quadrado da distância entre dois eixos (h^2).

Calcula-se a massa de cada corpo através da fórmula da massa volúmica (ρ), equação (4.2), que corresponde à razão entre a massa do objeto (M) e o seu volume (V). O volume obtém-se a partir da multiplicação de pi com o quadrado do raio da base (r^2) e a altura (h), equação (4.3).

$$I = I_c + Mh^2 \quad (4.1)$$

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (4.2)$$

$$V = \pi r^2 h \quad (4.3)$$

Sendo a massa volúmica do aço 7800 kg/m^3 , a massa do volante de inércia é 2,12 kg e o seu momento de inércia é $0,015 \text{ kg.m}^2$.

Sabendo o momento de inércia, obtém-se a energia através da fórmula da energia cinética em movimento rotacional, equação (4.4). A energia (K) é igual a metade do produto do momento de inércia (I) com o quadrado da velocidade angular (ω^2). Esta tem o valor de 104,7 rad/s que corresponde a 1000 RPM.

$$K = \frac{I\omega^2}{2} \quad (4.4)$$

Assim, obtém-se uma energia cinética de 82 J.

4.3 Otimização e ajustes de peças existentes

Nesta secção serão abordadas todas as peças que sofreram alterações, ou foram completamente remodeladas, de forma a otimizar o sistema a nível de fabrico e custos, ou a ajustar peças que precisaram de ser adaptadas por influência de outras.

4.3.1 Movimento linear

Nesta secção encontram-se as peças responsáveis por efetuar o movimento linear do sistema.

4.3.1.1 Haste

A haste da boia inicialmente tinha rosca fêmea na ponta que ligava à peça que a unia com o suporte das cremalheiras e uma flange soldada com furos na outra ponta, onde fazia ligação à boia. Com a alteração para cilindro pneumático, a sua configuração mudou e agora passa a ser uma haste de cilindro (Figura 4.7), com roscas fêmeas, uma em cada ponta. Numa vai enroscar o cilindro e na outra a peça nova que irá suportar as cremalheiras. Esta alteração tornou a peça mais simples, evitando a flange soldada na ponta que ligava à boia como estava no conceito inicial.

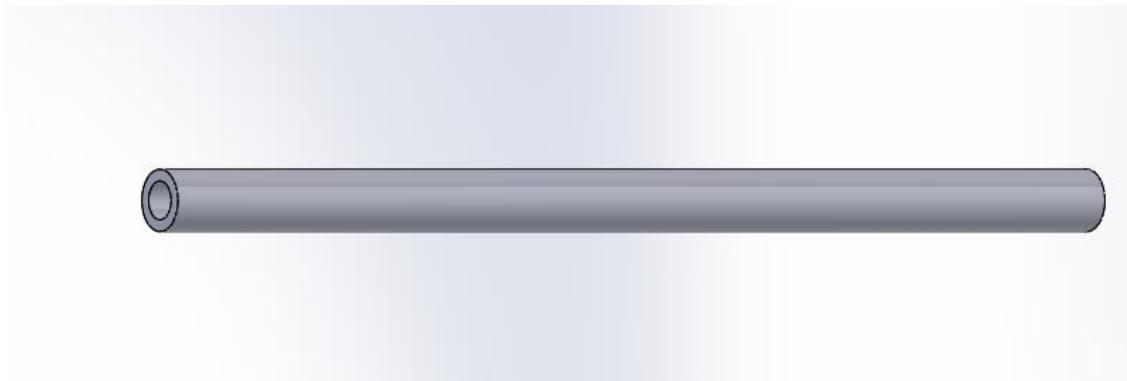


Figura 4.7: Desenho da haste.

4.3.1.2 Suporte das Cremalheiras

O suporte para as cremalheiras também sofreu uma remodelação (Figura 4.8), de forma a simplificar os processos de fabrico e eliminando peças adicionais. O seu material também foi alterado de aço para polietileno extrudido de alta densidade (PE-HD), dado que é uma peça de fixação que não está sujeita a grandes tensões. Inicialmente existia uma peça de junção do suporte das cremalheiras à haste, que corresponde à parte com rosca macho e ao batente de maior diâmetro, que, entretanto, foi incorporada neste novo suporte.

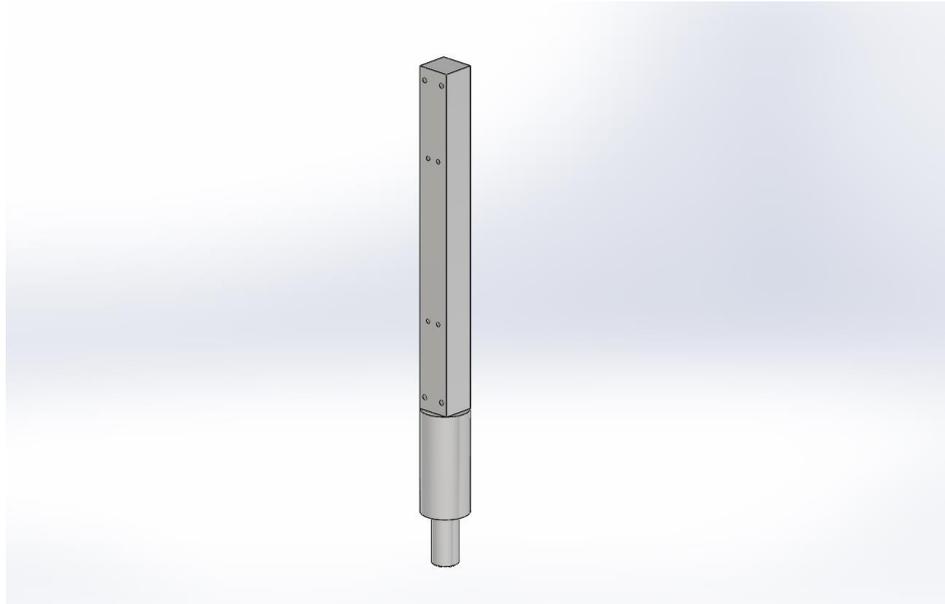


Figura 4.8: Desenho do suporte das cremalheiras.

4.3.2 Movimento rotativo

Aqui encontram-se as peças responsáveis por efetuar o movimento rotativo do sistema.

4.3.2.1 Pinhão de entrada

No conceito inicial, os rolamentos unidirecionais escolhidos estavam incorporados dentro dos pinhões de entrada, no entanto, à data de início deste projeto os mesmo não se encontravam no mercado. A alternativa encontrada apresentava dimensões superiores às deste pinhão, então foi necessário realocar os rolamentos para os pinhões intermédios, de maior diâmetro. Devido a esta mudança, o diâmetro interno foi reduzido para se ajustar ao veio e foi aberto um escatel (Figura 4.9).

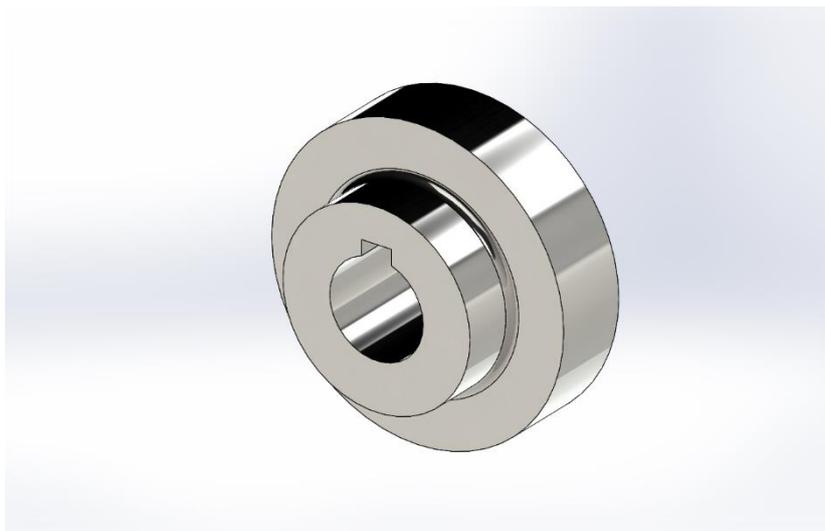


Figura 4.9: Desenho do pinhão de entrada.

4.3.2.2 Pinhão intermédio

Como os rolamentos unidirecionais foram realocados para estarem dentro dos pinhões intermédios, o seu diâmetro interno teve de ser ajustado para os acomodar. Também foi retirado o escatel que tinham uma vez que os rolamentos se fixam com ajustamento forte. O pinhão encontra-se representado na Figura 4.10.

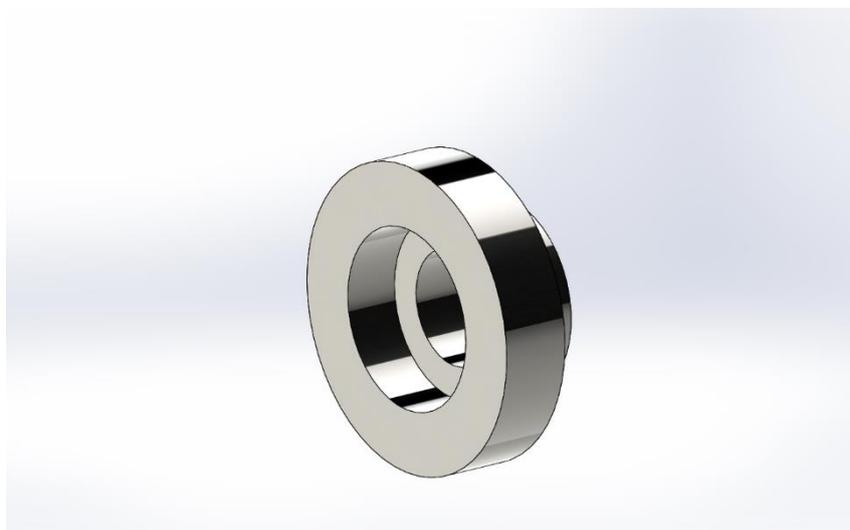


Figura 4.10: Desenho do pinhão intermédio.

4.3.2.3 Pinhão de saída

Dado que a caixa multiplicadora adquirida é diferente da do conceito inicial, uma vez que esta já não se encontrava disponível no mercado, o veio de ligação ao pinhão apresentava dimensões diferentes das estipuladas inicialmente. Assim, o diâmetro interno do pinhão de saída foi alargado, bem como o escatel, para acomodar uma chaveta maior (Figura 4.11).



Figura 4.11: Desenho do pinhão de saída.

4.3.2.4 Veios do cárter

Com a mudança dos rolamentos unidirecionais, os veios do cárter também sofreram alterações. Na zona do pinhão de entrada foi aberto um escotel e uma ranhura para anel elástico para fixação. Na região do pinhão intermédio mudou-se a tolerância do diâmetro do veio e ajustou-se o escotel, ambos de acordo com as tolerâncias fornecidas pelo fabricante dos rolamentos. O veio encontra-se ilustrado na Figura 4.12.



Figura 4.12: Desenho de um dos veios do cárter.

4.3.3 Estruturais

Esta secção contém as peças estruturais do sistema.

4.3.3.1 Cárter

Devido à alteração da caixa multiplicadora, a parede do cárter onde esta encaixaria teve de ser ajustada (Figura 4.13). Procedeu-se ao ajuste do furo passante para o veio de entrada do multiplicador e à cavidade onde este encaixa no cárter. Abriu-se uma nova ranhura para o o-ring de vedação e mudaram-se também as dimensões dos furos para colocar os parafusos de fixação da caixa multiplicadora. Estes furos agora são passantes e inicialmente eram roscados.

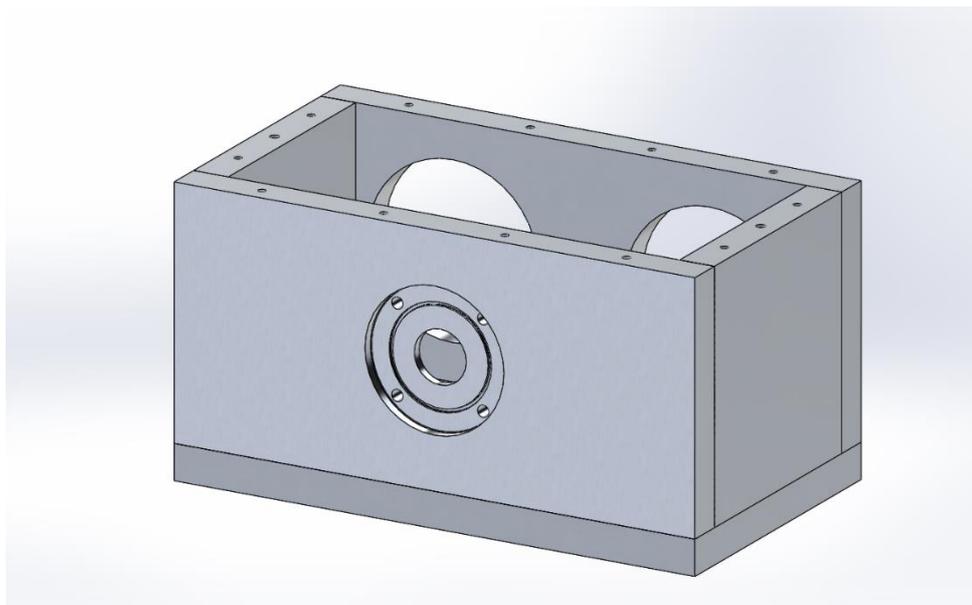


Figura 4.13: Desenho do cárter.

4.3.3.2 Mesa

A mesa representada na Figura 4.14, que servirá de suporte para o PTO, sofreu poucas alterações. Foram feitas furações para o novo suporte do gerador e a sua espessura aumentou de 6 mm para 10 mm, para evitar deflexões devido ao peso do sistema.

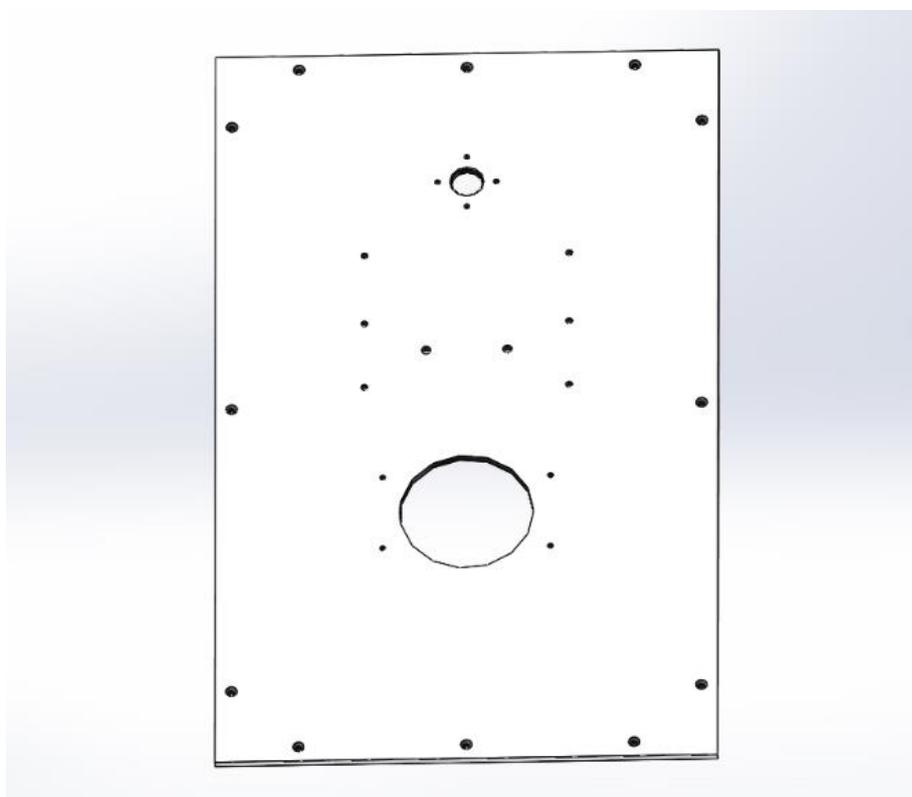


Figura 4.14: Desenho da mesa.

4.3.3.3 Tampa superior

Como peça de blindagem e vedação, a tampa superior apenas teve um reforço da parede superior de 2,5 mm para 5mm e encontra-se representada abaixo, na Figura 4.15.

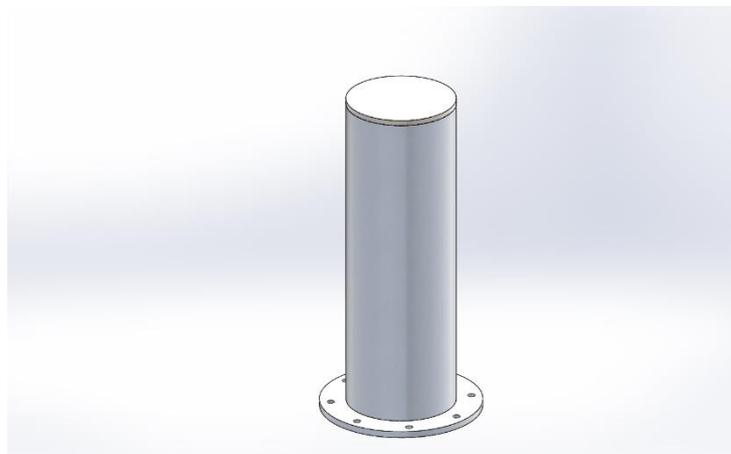


Figura 4.15: Desenho da tampa superior.

4.3.4 Outros

Nesta secção encontra-se uma peça que não se enquadrava nas secções apresentadas anteriormente.

4.3.4.1 Espaçador

Como peça cuja função é garantir que os rolamentos não saiam do sítio devido à existência de folgas, sofreu um ajuste na sua largura de 7 mm para 3 mm devido à recolocação dos rolamentos unidireccionais nos pinhões intermédios (Figura 4.16).



Figura 4.16: Desenho do espaçador.

4.4 Protótipo final

Finalmente, o culminar desta dissertação resultou na construção do protótipo, levando o conceito para a fase seguinte. Encontra-se representado na Figura 4.17 o cárter com os veios e pinhões montados, responsável pela conversão do movimento linear em rotativo. Na Figura 4.18 observa-se o dispositivo na sua totalidade em vista frontal e também uma vista de cima do sistema, sem a tampa do cárter para poder observar as cremalheiras.

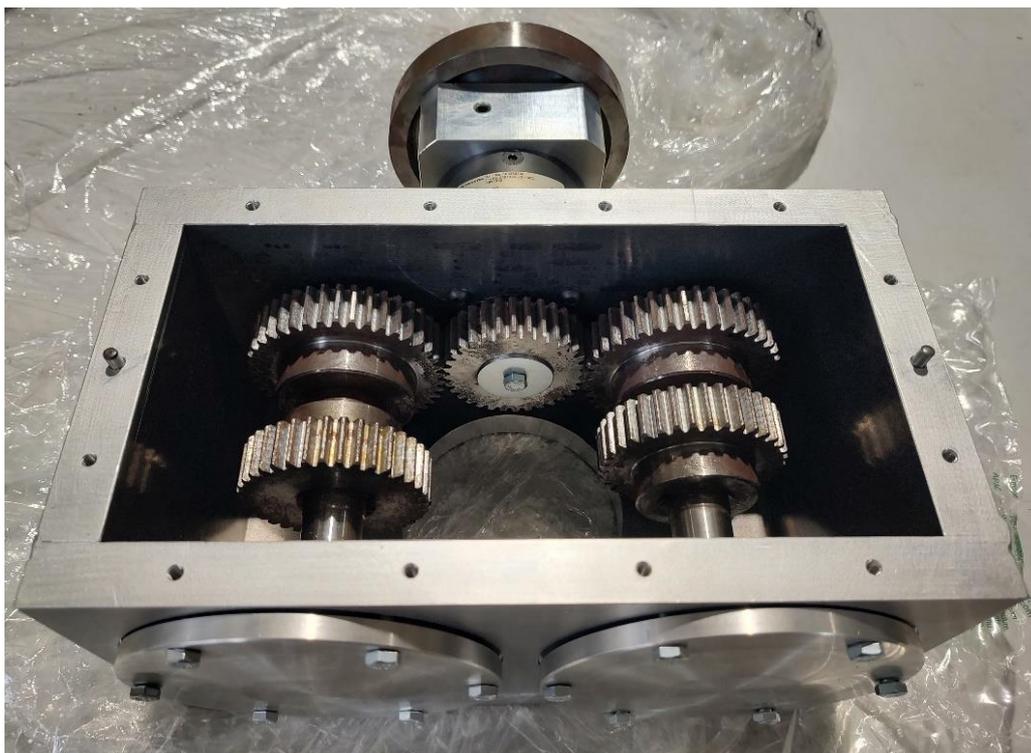


Figura 4.17: Cárter montado, com os pinhões e veios.

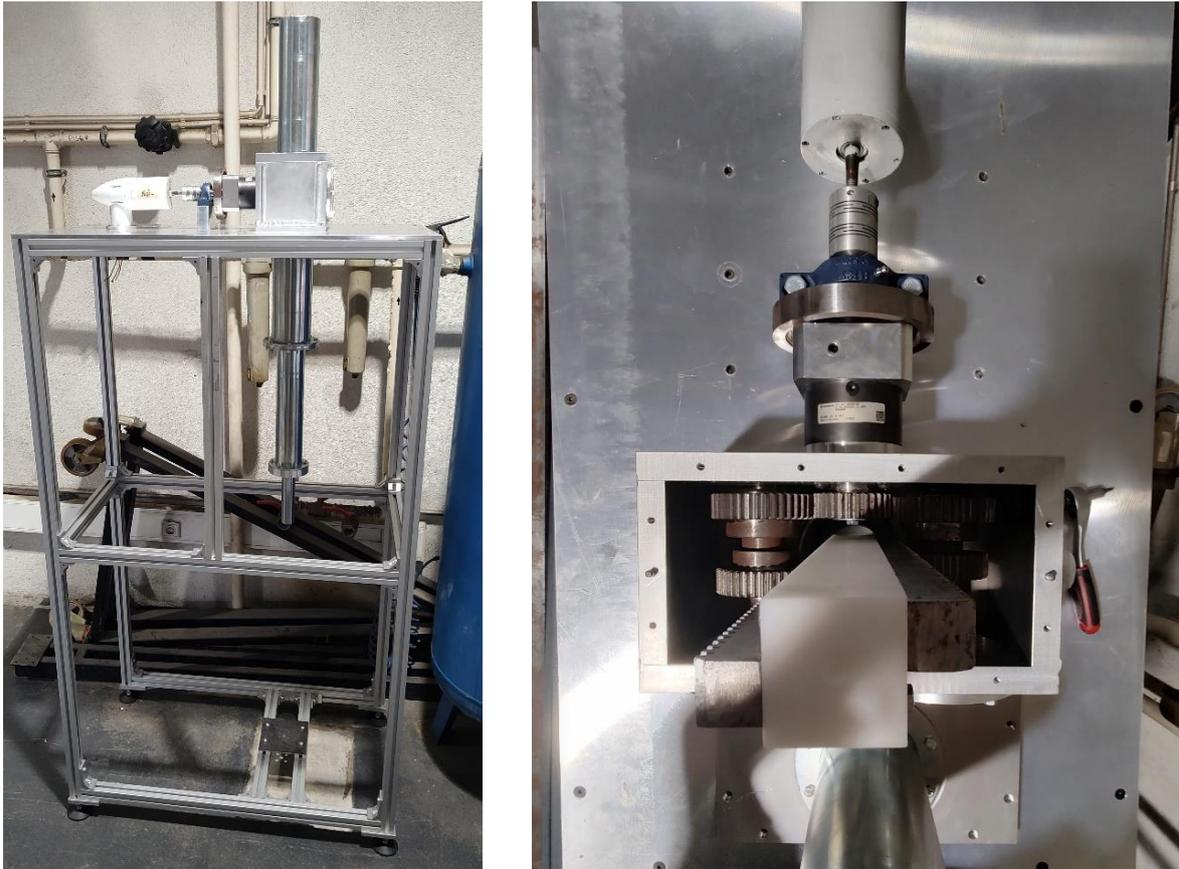


Figura 4.18: Protótipo construído. À esquerda, vista frontal do dispositivo. À direita, vista de cima sem a tampa do cárter.

Capítulo 5

5 Conclusão e Trabalhos Futuros

Concluindo, nesta dissertação foi continuado o desenvolvimento do conceito de um sistema PTO para futura aplicação num conversor de energia das ondas. Apresenta-se como um dispositivo capaz de conversão de movimento linear em rotativo, conseguindo aproveitar a potência gerada nos movimentos ascendente e descendente, derivado da incorporação de rolamentos unidirecionais no sistema. A conversão em movimento rotativo é efetuada com um sistema de pinhão-cremalheira, dividindo o sistema em dois, uma parte responsável pelo movimento ascendente e a outra pelo movimento descendente. Para isso existem duas cremalheiras acopladas à haste vertical, transmitindo a energia para dois veios diferentes que convergem num único pinhão de saída que mantém sempre o mesmo sentido de rotação. A rotação do pinhão é transmitida a uma caixa planetária redutora, que se encontra montada ao contrário para efetuar multiplicação da rotação, adequando a velocidade de rotação à máxima admitida pelo gerador e, assim, conseguir que este converta a energia mecânica em energia elétrica com a maior eficiência possível.

Para que a curva de energia que chega ao gerador seja mais uniforme, evitando alturas em que a energia é superior à admissível e outras em que é demasiado baixa, foi incorporado um volante de inércia que acumula inércia rotacional, libertando a energia gradualmente para o sistema. Tem o entrave de reduzir os picos máximos de energia que se conseguem obter, dado que parte dessa energia é absorvida pelo volante e nunca chega a ser devolvida ao sistema, mas permite obter uma geração de energia elétrica mais constante e estável. Para aumentar a eficiência, foi colocado imediatamente a seguir à caixa multiplicadora e antes do gerador, de forma a reduzir as perdas de energia por atrito.

O objetivo da construção do protótipo funcional à escala foi cumprido, existindo uma substituição da boia do conceito inicial por um cilindro pneumático para se efetuar testes em laboratório, uma vez que o protótipo ainda não se encontra preparado para entrar na fase de testes em tanque de ondas.

Infelizmente, não foi possível alcançar o objetivo de realizar os testes laboratoriais que viriam a validar a eficiência de conversão de energia mecânica em energia elétrica do dispositivo. Devido a demoras na obtenção de orçamentos e atrasos no fabrico da elevada quantidade de peças necessárias, a construção do protótipo só ficou concluída quase no fim do prazo de entrega deste documento. Assim, tornou-se impossível efetuar qualquer teste ao dispositivo.

5.1 Trabalhos futuros

Relativamente a trabalhos futuros, estes centram-se, obviamente, na realização dos testes de eficiência do dispositivo em contexto laboratorial com a atuação do cilindro pneumático. Este pode ser programado em Arduino, permitindo variar as características da onda simulada: frequência, amplitude e velocidade. Inicialmente poderia realizar-se um estudo para diferentes períodos de onda, com amplitude constante, seguidamente fixar o período e variar a amplitude e, por fim, usar as características médias das ondas da costa portuguesa e, especialmente, as da região de Aveiro.

Um outro teste passa pela aleatoriedade das características, simulando a imprevisibilidade do mar. É bastante comum uma onda alta ser seguida por diversas ondas mais baixas em rápida sucessão e, novamente, haver um período maior até à próxima onda. Este teste permitiria também analisar o comportamento estrutural do sistema, dado que o fornecimento de energia não seria efetuado de forma gradual.

Numa fase mais avançada, espera-se adaptar o dispositivo para testes em tanque de ondas, aproximando-se mais das condições aplicadas em contexto real. Aí seria necessário substituir o cilindro pela boia, ajustando o seu encaixe à haste responsável pela transmissão do movimento linear. Os testes a realizar seriam semelhantes aos descritos anteriormente em contexto laboratorial.

Capítulo 6

6 Referências Bibliográficas

(PDF) Protocol to develop an environmental impact study of wave energy converters - [Em linha] [Consult. 26 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.researchgate.net/publication/258331271_Protocol_to_develop_an_environmental_impact_study_of_wave_energy_converters#full-text>.

Additional Research Undertaken - Checkmate Seaenergy - [Em linha] [Consult. 29 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:<https://www.checkmateukseaenergy.com/news/additional-research-undertaken/>>.

AHAMED, Raju; MCKEE, Kristoffer; HOWARD, Ian - Advancements of wave energy converters based on power take off (PTO) systems: A review. **Ocean Engineering**. . ISSN 0029-8018. 204:(2020) 107248. doi: 10.1016/J.OCEANENG.2020.107248.

AHMED, Ammar *et al.* - On the S-shaped floaters for a Wavestar-like wave energy converter with an I-shaped mechanical power take-off. **Energy Conversion and Management: X**. . ISSN 2590-1745. 19:(2023) 100387. doi: 10.1016/J.ECMX.2023.100387.

BERTRAM, D. V. *et al.* - A systematic approach for selecting suitable wave energy converters for potential wave energy farm sites. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. . ISSN 1364-0321. 132:(2020) 110011. doi: 10.1016/J.RSER.2020.110011.

Bombora begins final test and assembly of world's most powerful Wave Energy Converter | Bombora - [Em linha] [Consult. 29 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:<https://bomborawave.com/latest-news/bombora-begins-final-test-and-assembly-of-worlds-most-powerful-wave-energy-converter/>>.

BOREN, Blake C. - Vertical Axis Pendulum Wave Energy Converters : Investigating Control Strategies and the Deployment of a Scaled Generic Prototype. (2015).

BRACCO, Giovanni *et al.* - Experimental validation of the ISWEC wave to PTO model. **Ocean Engineering**. . ISSN 0029-8018. 120:(2016) 40–51. doi: 10.1016/J.OCEANENG.2016.05.006.

BRITISH PETROLEUM - Statistical Review of World Energy 2021

Canary Islands – the Wave Power Islands | Langlee Wave Power - [Em linha] [Consult. 29 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:<http://www.langleewp.com/?q=news/canary-islands---wave-power-islands>>.

CARDOSO, Paulo - **Development of a Power Take-off for wave energy generation**

- Carnegie wins €3.75m Phase 3 EuropeWave PCP Contract - Carnegie** - [Em linha] [Consult. 29 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.carnegiece.com/carnegie-wins-e3-75m-phase-3-europewave-pcp-contract/>.
- CATALOG, Mechanical Product; CATALOG, Product - GPLE80-1S-8-F87 Precision planetary gearboxes 3D View GPLE80-1S-8-F87 Precision planetary gearboxes. [s.d.] 3–6.
- CROSS, Patrick - Recent Developments at the U.S. Navy Wave Energy Test Site. Golden, CO (United States). 2020). doi: 10.2172/1680056.
- CROWLEY, S. *et al.* - Modelling of the WITT wave energy converter. **Renewable Energy**. . ISSN 0960-1481. 115:2018) 159–174. doi: 10.1016/J.RENENE.2017.08.004.
- DREW, B.; PLUMMER, A. R.; SAHINKAYA, M. N. - A review of wave energy converter technology. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy**. . ISSN 2041-2967. 223:8 (2009) 887–902. doi: 10.1243/09576509JPE782.
- Eco Wave Power - Wave Energy Company** - [Em linha] [Consult. 29 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.ecowavepower.com/>.
- Eco Wave Power - Wave Energy Company** - [Em linha] [Consult. 26 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.ecowavepower.com/>.
- Eco Wave Power developing two new wave-power devices** - [Em linha] [Consult. 29 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://newatlas.com/eco-wave-power-developing-two-new-wave-power-devices/20989/>.
- FALCÃO, António F. D. O. - Wave energy utilization: A review of the technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. . ISSN 13640321. 14:3 (2010) 899–918. doi: 10.1016/j.rser.2009.11.003.
- FERNANDEZ, H. *et al.* - The new wave energy converter WaveCat: Concept and laboratory tests. **Marine Structures**. . ISSN 0951-8339. 29:1 (2012) 58–70. doi: 10.1016/J.MARSTRUC.2012.10.002.
- HANDOKO, C. R.; MUKHTASOR - The development of power take-off technology in wave energy converter systems: A Review. Em **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**
- Home - Checkmate Seaenergy** - [Em linha] [Consult. 26 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.checkmateukseaenergy.com/>.
- How it works - Eco Wave Power** - [Em linha] [Consult. 26 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.ecowavepower.com/our-technology/how-it-works/>.
- HUANG, Shuo *et al.* - Numerical design study of multipoint mooring systems for the floating wave energy converter in deep water with a sloping bottom. **Renewable Energy**. . ISSN 0960-1481. 136:2019) 558–571. doi: 10.1016/J.RENENE.2019.01.027.
- ISWEC: energy from the sea | Eni** - [Em linha] [Consult. 29 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.eni.com/en-IT/operations/iswec-eni.html/>.
- JAHANGIR, Mohammad Hossein; GHANBARI MOTLAGH, Saheb - Feasibility study of CETO wave energy converter in Iranian coastal areas to meet electrical demands (a case study). **Energy for Sustainable Development**. . ISSN 0973-0826. 70:2022) 272–289. doi: 10.1016/J.ESD.2022.07.017.
- KHEDKAR, Kaustubh *et al.* - The inertial sea wave energy converter (ISWEC) technology: Device-physics, multiphase modeling and simulations. **Ocean Engineering**. . ISSN 0029-8018. 229:2021) 108879. doi: 10.1016/J.OCEANENG.2021.108879.

- KHOJASTEH, Danial *et al.* - A large-scale review of wave and tidal energy research over the last 20 years. **Ocean Engineering**. . ISSN 0029-8018. 282:2023) 114995. doi: 10.1016/J.OCEANENG.2023.114995.
- KOCA, K. *et al.* - Recent Advances in the Development of Wave Energy Converters. (2012).
- LAGOUN, M. S.; BENALIA, A.; BENBOUZID, M. E. H. - Ocean wave converters: State of the art and current status. **2010 IEEE International Energy Conference and Exhibition, EnergyCon 2010**. 2010) 636–641. doi: 10.1109/ENERGYCON.2010.5771758.
- LEHMANN, Marcus *et al.* - Ocean wave energy in the United States: Current status and future perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. . ISSN 1364-0321. 74:2017) 1300–1313. doi: 10.1016/J.RSER.2016.11.101.
- LENEE-BLUHM, Pukha - DE-EE0008954-Optimization, Design, And Commercialization Planning Of Next-Generation Stingray H3 Wave Energy Converter. (2022).
- MOUSAVI, Seyed Milad *et al.* - Deep Learning for Wave Energy Converter Modeling Using Long Short-Term Memory. **Mathematics 2021, Vol. 9, Page 871**. . ISSN 2227-7390. 9:8 (2021) 871. doi: 10.3390/MATH9080871.
- Pelamis Wave Power : EMEC: European Marine Energy Centre** - [Em linha] [Consult. 29 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/pelamis-wave-power/>.
- REHMAN, Shafiqur *et al.* - A review of energy extraction from wind and ocean: Technologies, merits, efficiencies, and cost. **Ocean Engineering**. . ISSN 0029-8018. 267:2023) 113192. doi: 10.1016/J.OCEANENG.2022.113192.
- RITCHIE, Hannah; ROSER, Max - Emissions by sector - Our World in Data. **University of Oxford**. (2020).
- Roues libres - (2019).
- SHAHRIAR, Tanvir *et al.* - Modelling and optimization of Searaser wave energy converter based hydroelectric power generation for Saint Martin’s Island in Bangladesh. **Ocean Engineering**. . ISSN 0029-8018. 192:2019) 106289. doi: 10.1016/J.OCEANENG.2019.106289.
- The Energy Blog: AquaBuOY 2.0 Deployed Off Oregon Coast** - [Em linha] [Consult. 29 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://thefraserdomain.typepad.com/energy/2007/09/aquabuoy20-depl.html>.
- The Penguin - Wello Oy** - [Em linha] [Consult. 29 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://wello.eu/the-penguin-2/>.
- TONGPHONG, Watchara *et al.* - A study on the design and performance of ModuleRaft wave energy converter. **Renewable Energy**. . ISSN 0960-1481. 163:2021) 649–673. doi: 10.1016/J.RENENE.2020.08.130.
- VALENTE, Daniela - **Repositório Institucional da Universidade de Aveiro: Mecanismos inovadores para recuperação de energia do movimento do mar** [Em linha] [Consult. 26 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://ria.ua.pt/handle/10773/29142>.
- VALENTE, Daniela Tavares - **Mecanismos inovadores para recuperação de energia do movimento do mar** [Em linha] [Consult. 26 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://ria.ua.pt/handle/10773/29142>.
- VALENTE, Daniela Tavares - Mecanismos inovadores para recuperação de energia do movimento do mar. (2019).

VICINANZA, Diego *et al.* - The SSG Wave Energy Converter: Performance, Status and Recent Developments. **Energies** **2012**, Vol. **5**, Pages **193-226**. . ISSN 1996-1073. 5:2 (2012) 193–226. doi: 10.3390/EN5020193.

Wave Dragon Project - Milla Fjord Site | Tethys - [Em linha] [Consult. 29 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://tethys.pnnl.gov/project-sites/wave-dragon-project-milla-fjord-site>.

Wave Star – Unlimited Clean Energy - [Em linha] [Consult. 26 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://wavestarenergy.com/>.

WaveFarm creates industrial package - [Em linha] [Consult. 29 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://oceans-and-fisheries.ec.europa.eu/news/wavefarm-creates-industrial-package-2021-05-26_en>.

Waveroller - AW-Energy - [Em linha] [Consult. 29 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://aw-energy.com/waveroller/>.

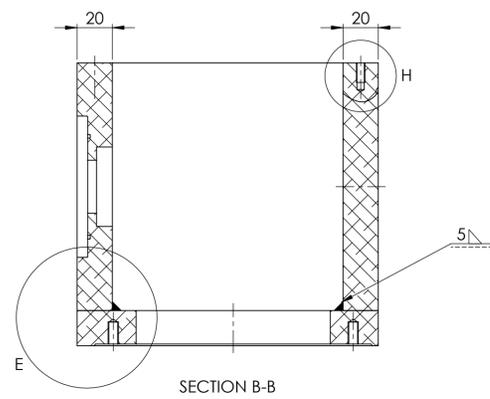
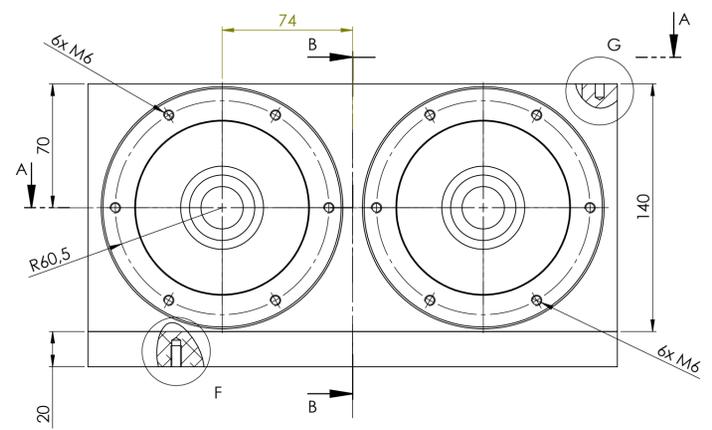
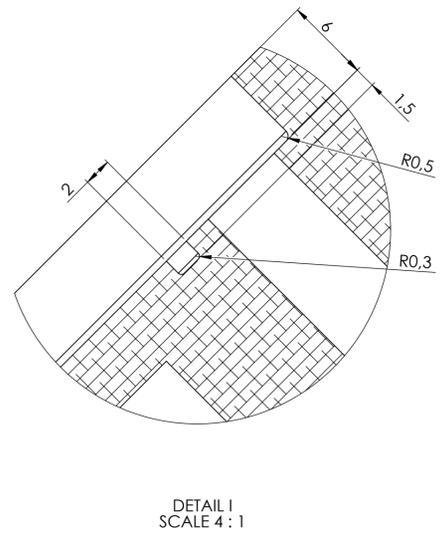
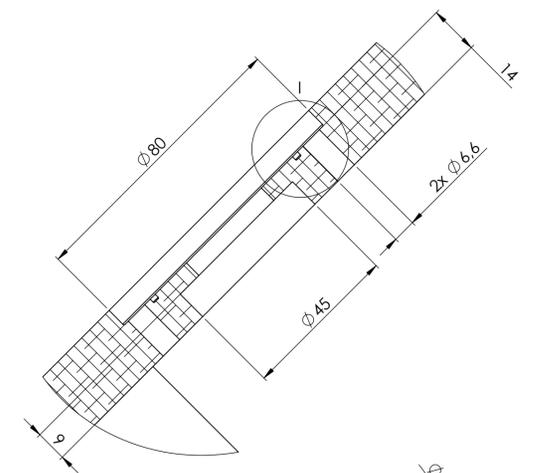
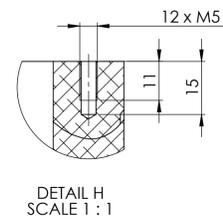
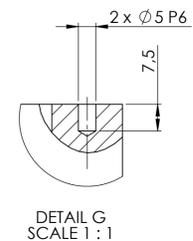
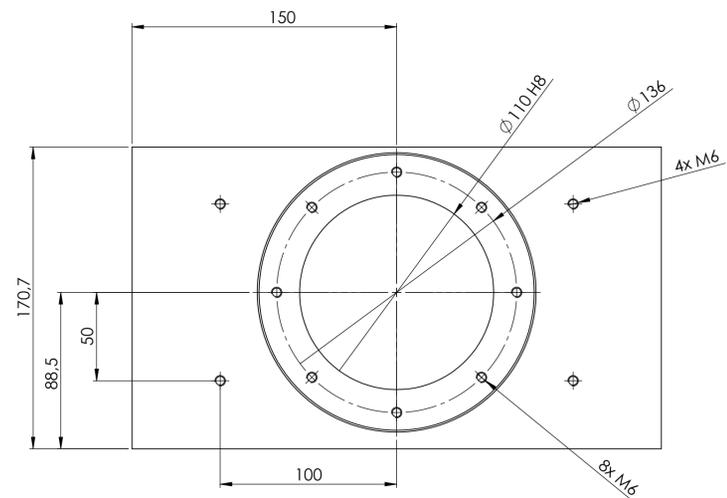
YAZDI, Hossein *et al.* - Wave power extraction by Multi-Salter’s duck WECs arrayed on the floating offshore wind turbine platform. **Energy**. . ISSN 0360-5442. 278:2023) 127930. doi: 10.1016/J.ENERGY.2023.127930.

ZHANG, Yongxing *et al.* - Ocean wave energy converters: Technical principle, device realization, and performance evaluation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. . ISSN 1364-0321. 141:2021) 110764. doi: 10.1016/J.RSER.2021.110764.

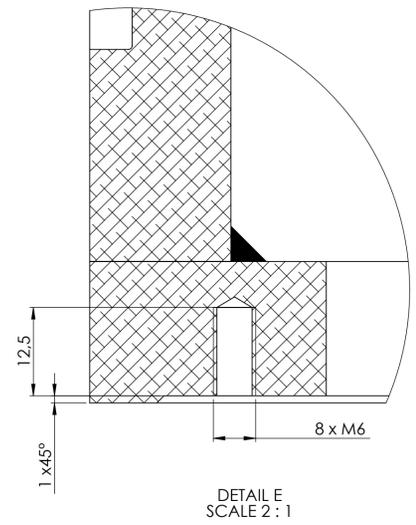
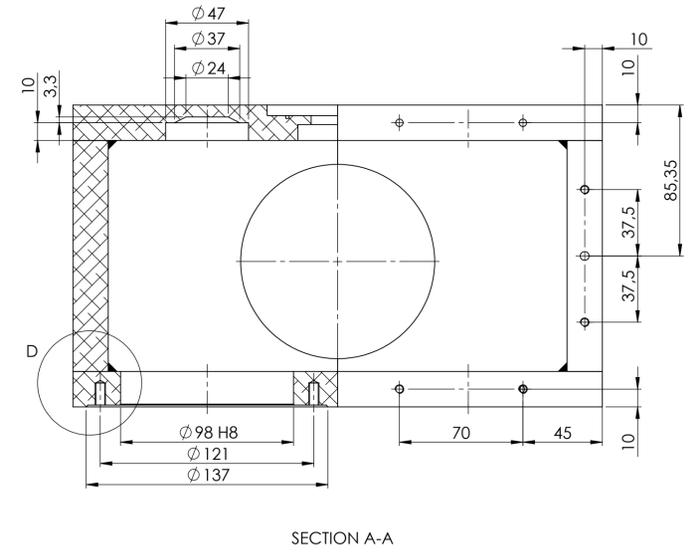
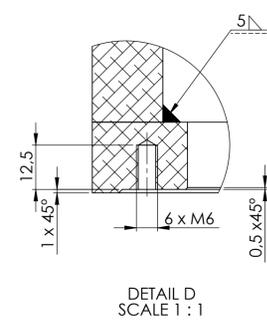
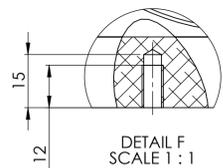
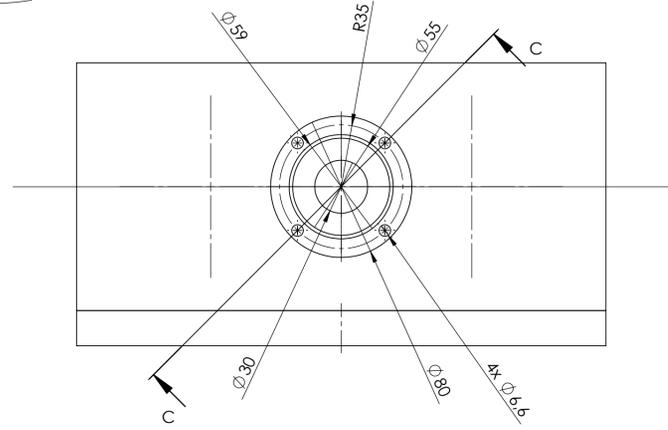
ZHENG, Siming; ZHANG, Yongliang; IGLESIAS, Gregorio - Concept and performance of a novel wave energy converter: Variable Aperture Point-Absorber (VAPA). **Renewable Energy**. . ISSN 0960-1481. 153:2020) 681–700. doi: 10.1016/J.RENENE.2020.01.134.

«Zhoushan» - First 500kW Sharp Eagle Wave Energy Converter Delivered---Chinese Academy of Sciences - [Em linha] [Consult. 29 out. 2023]. Disponível em WWW:<URL:https://english.cas.cn/newsroom/news/202007/t20200703_240149.shtml>.

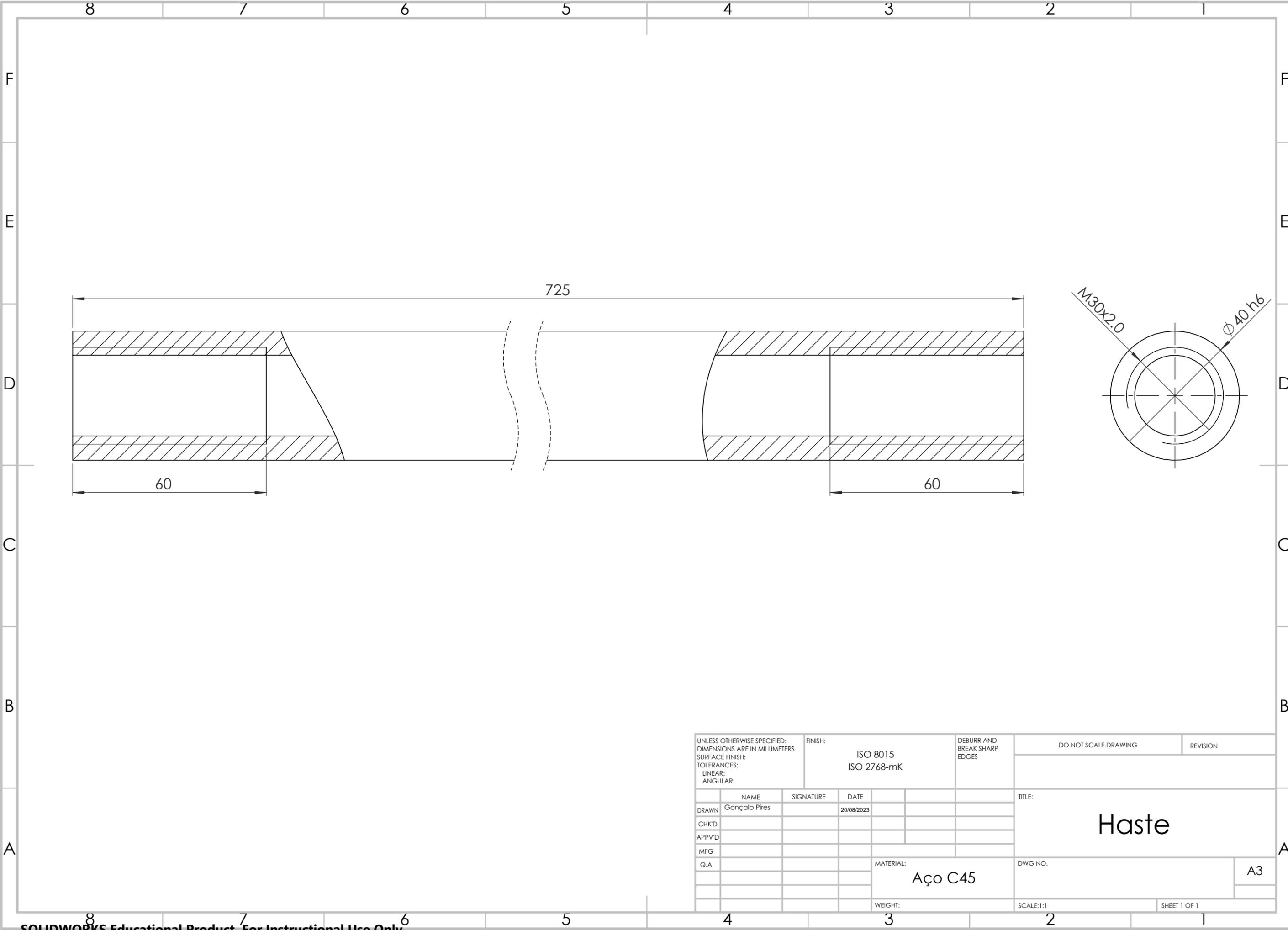
Anexos



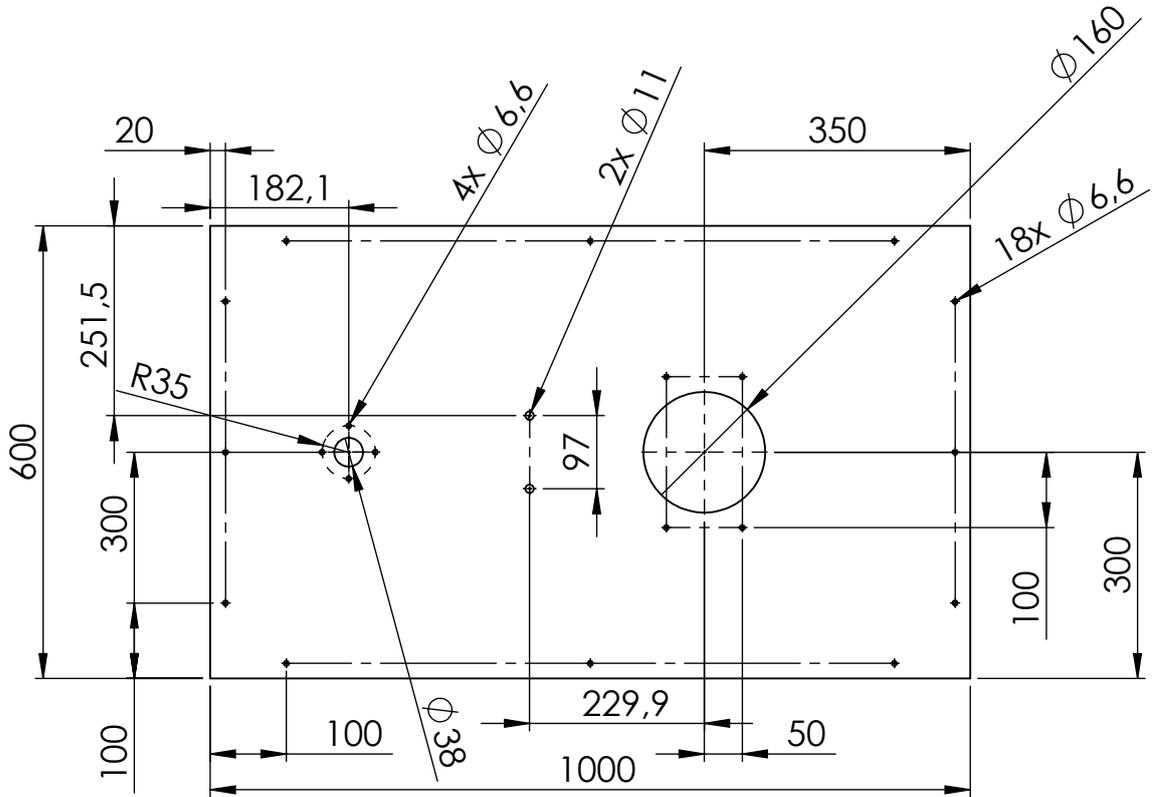
SECTION C-C
SCALE 1:1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH: ISO 8015 ISO 2768 - mK	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN: Gongolo Pires			SIGNATURE:	DATE: 18/04/2023	MATERIAL: AL 6XXX
CHECKED:			TITLE: CarterAssemb		DWG NO.:
APPROVED:			SCALE: 1:2		SHEET 1 OF 1
MFG:			WEIGHT:		A1
Q.A.:					



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH: ISO 8015 ISO 2768-mK		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION		
DRAWN Gonçalo Pires			SIGNATURE		DATE 20/08/2023		TITLE: Haste				
CHK'D											
APPV'D											
MFG											
Q.A							MATERIAL: Aço C45		DWG NO.		A3
							WEIGHT:		SCALE:1:1		SHEET 1 OF 1



Thickness: 10mm

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS

FINISH:

ISO 8015
ISO 2768 - mK

DEBURR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE	MATERIAL:	TITLE:
DRAWN	Gonçalo Pires		17/04/2023	AL 6xxx	Tampo_Mesa
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					



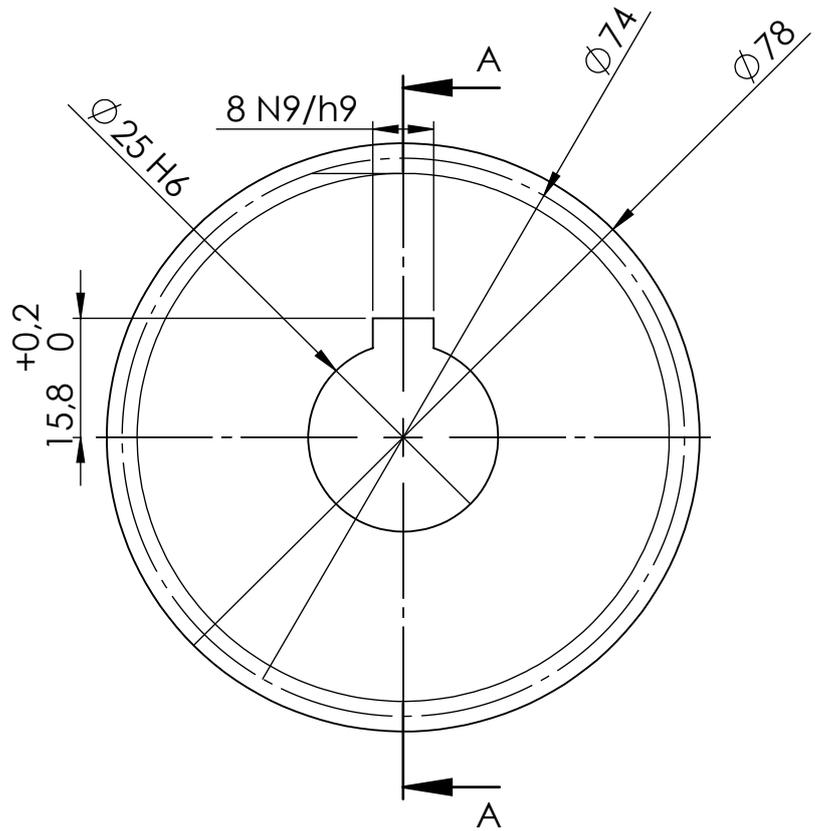
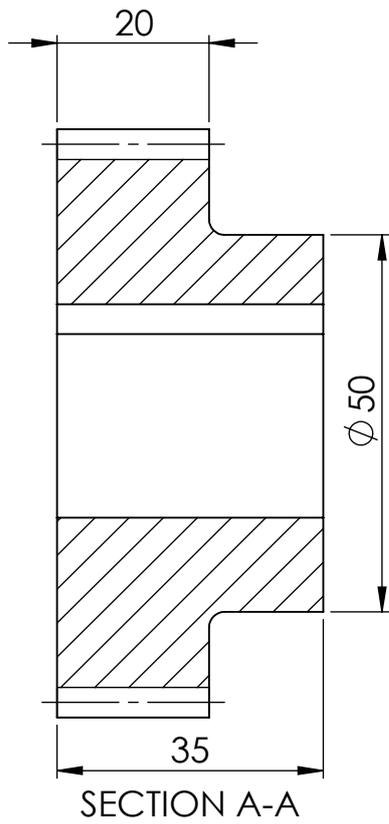
DWG NO.

A4

WEIGHT:

SCALE:1:10

SHEET 1 OF 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS

FINISH:

ISO 8015
ISO 2768 -mK

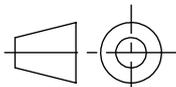
DEBURR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

20° STRAIGHT TEETH SPURGEAR MODULE 2, 37 TEETH

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN	Gonçalo Pires		14/07/2022
CHKD			
APPVD			
MFG			
Q.A			



MATERIAL:

STEEL C45

TITLE:

Roda_Entrada

DWG NO.

A4

WEIGHT:

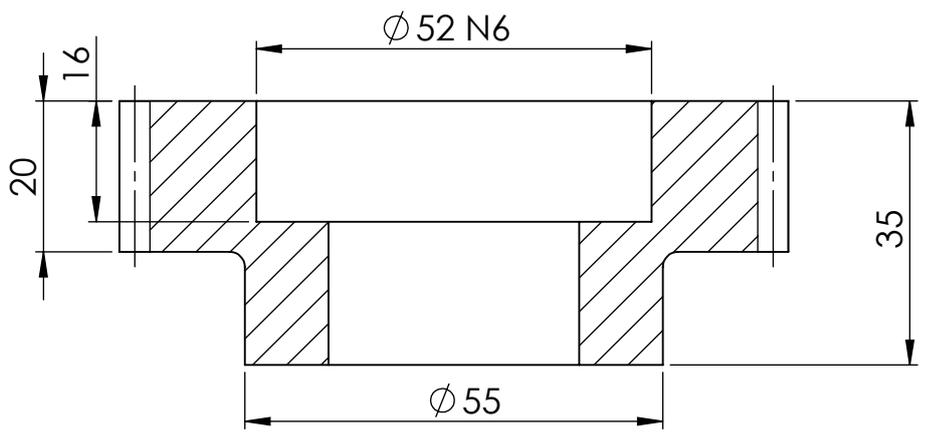
SCALE:1:1

SHEET 1 OF 1

4 3 2 1

F

F



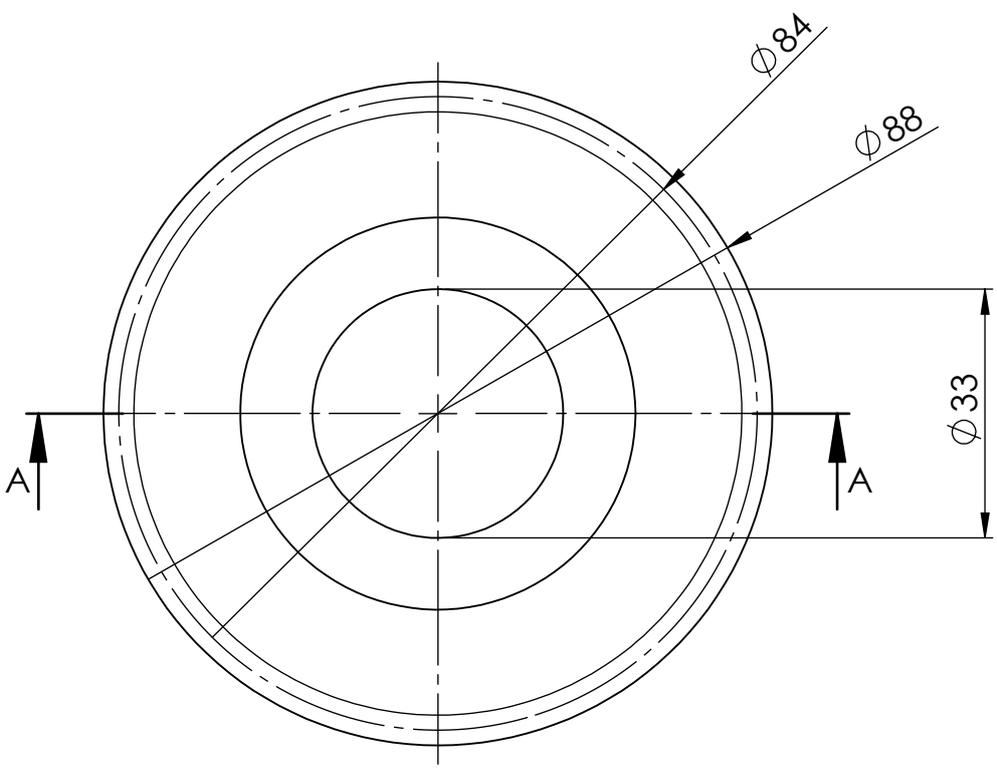
SECTION A-A

E

E

D

D



C

C

B

B

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
TOLERANCES: ISO 8015
GENERAL: ISO 2768 - mK

FINISH:

ISO 8015
ISO 2768 - mK

DEBURR AND
BREAK SHARP
EDGES

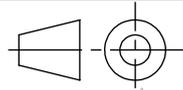
DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

20° STRAIGHT TEETH SPURGEAR MODULE 2, 42 TEETH

	NAME	SIGNATURE	DATE	MATERIAL:	TITLE:
DRAWN	Gonçalo Pires		14/04/2023	STEEL C45	Roda_Intermedia
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					

DWG NO.	
WEIGHT:	
SCALE:1:1	
SHEET 1 OF 1	



A4

A

A

4 3 2 1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

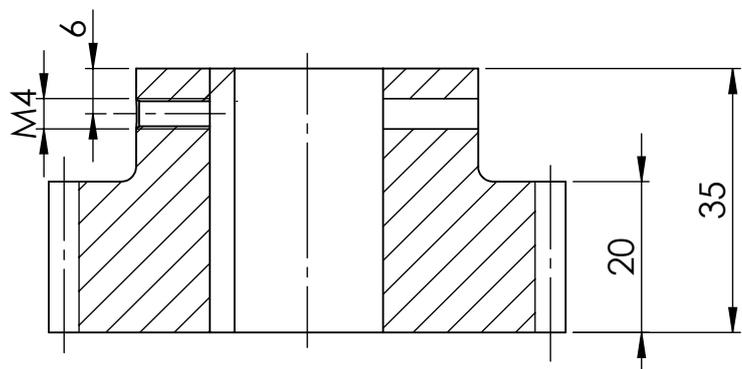
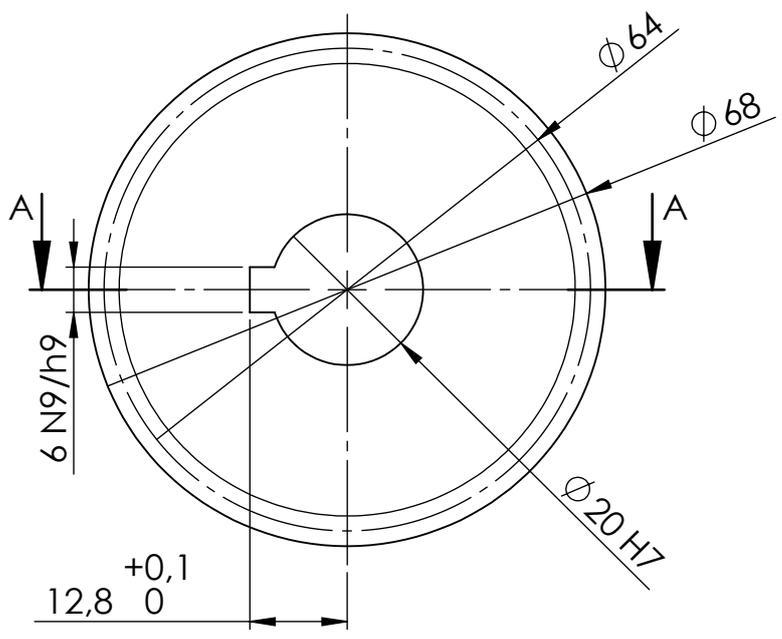
C

B

B

A

A



SECTION A-A

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS

FINISH:
**ISO 8015
ISO 2768 - mK**

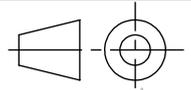
DEBURR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

20° STRAIGHT TEETH SPURGEAR MODULE 2, 32 TEETH

	NAME	SIGNATURE	DATE	MATERIAL:	TITLE:
DRAWN	Gonçalo Pires		15/04/2023	STEEL C45	Roda_Saida
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					



DWG NO.

A4

WEIGHT:

SCALE:1:1

SHEET 1 OF 1

4 3 2 1

8 7 6 5 4 3 2 1

F

E

D

C

B

A

F

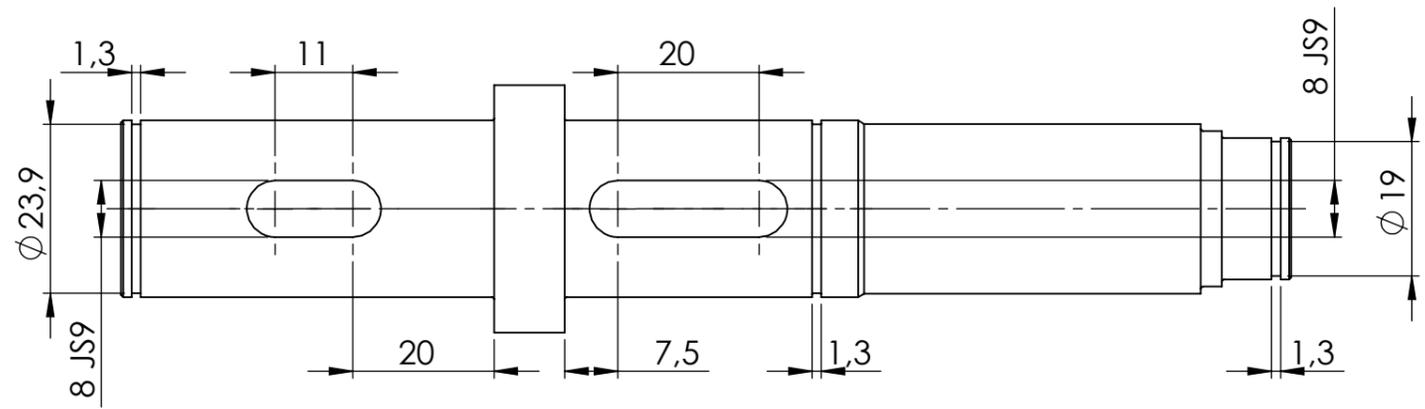
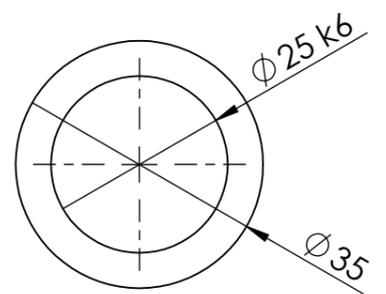
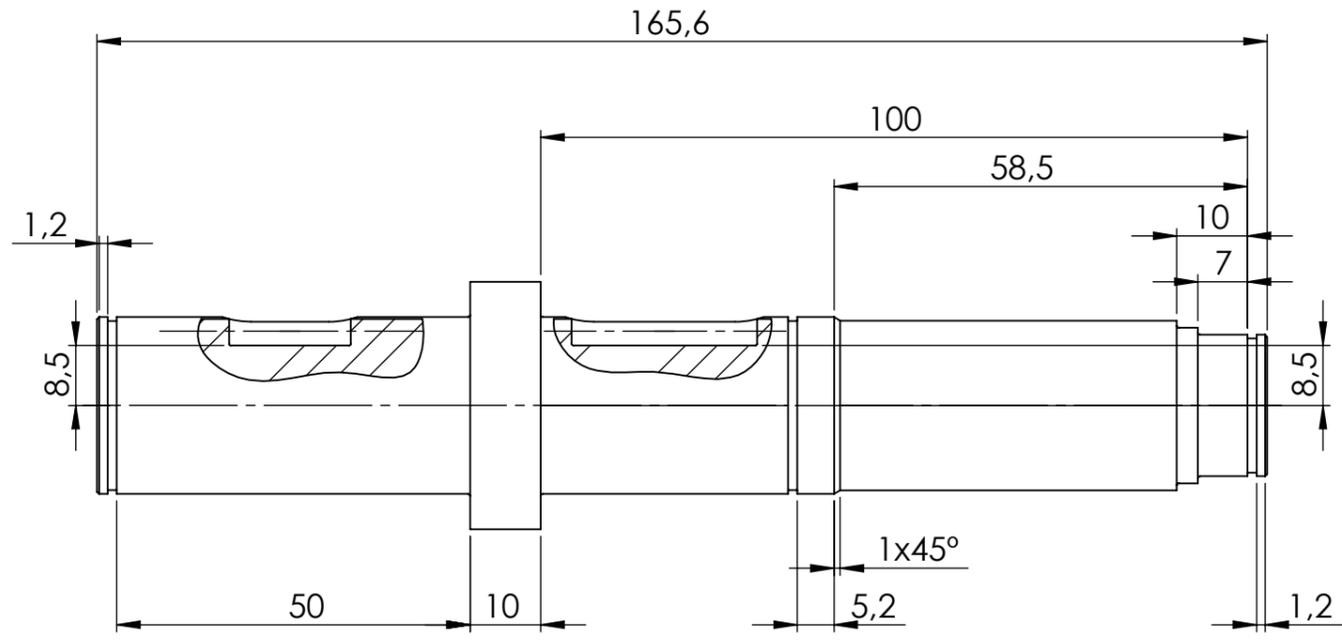
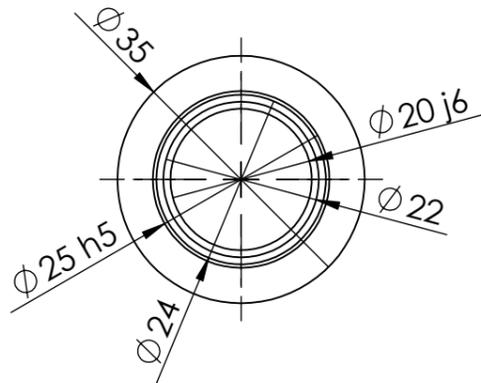
E

D

C

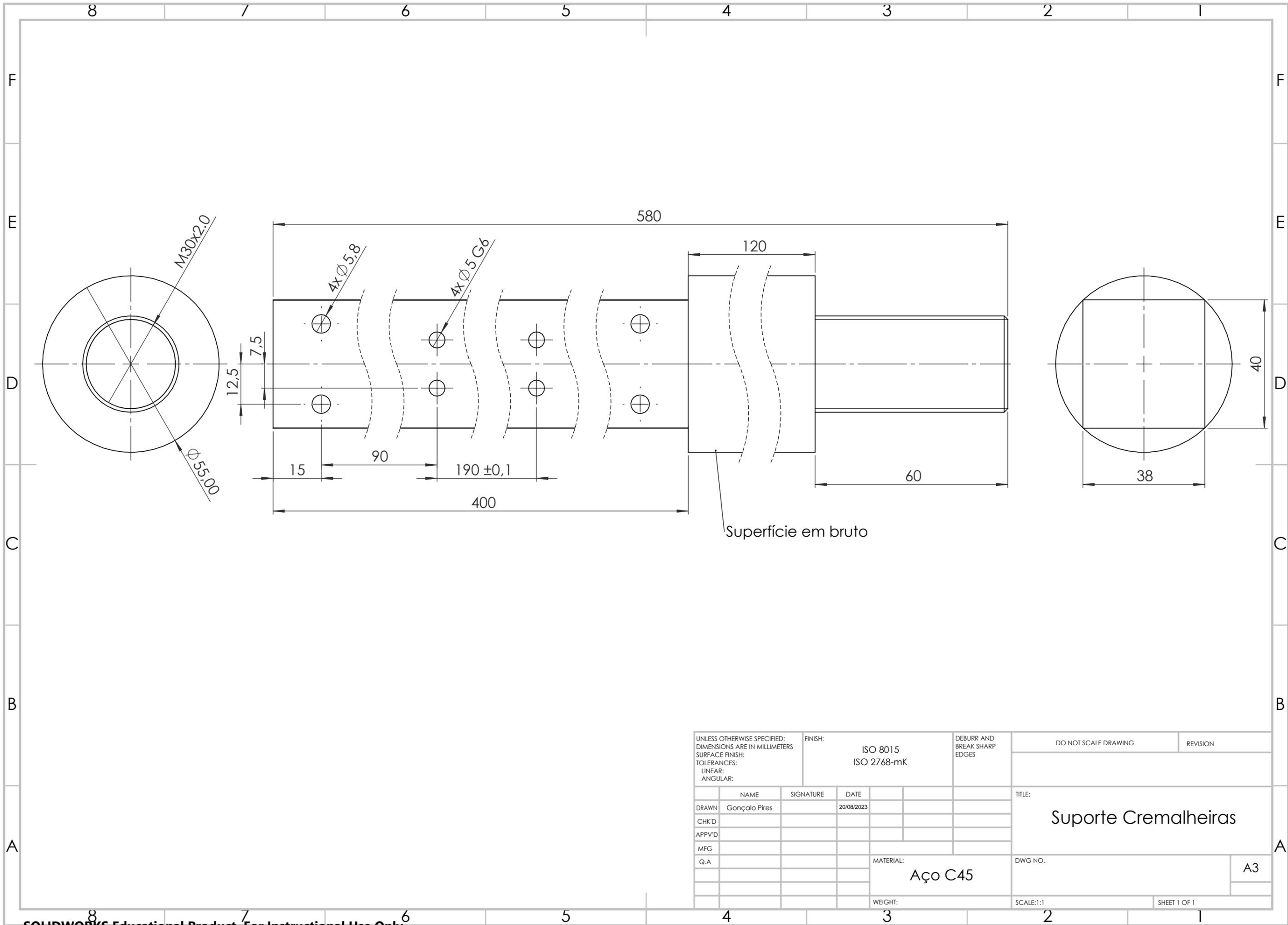
B

A

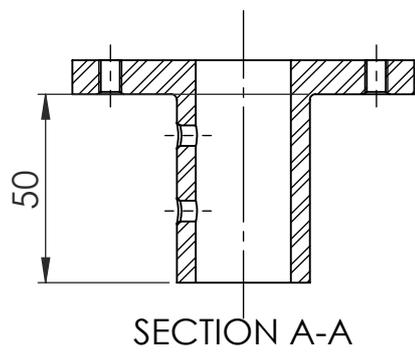
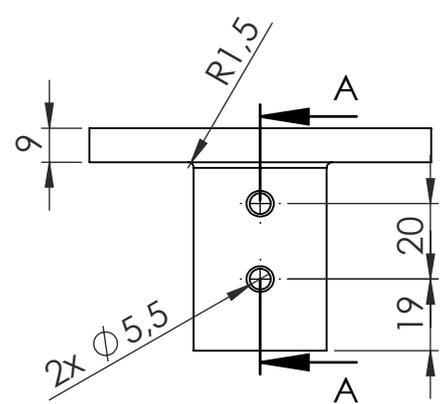
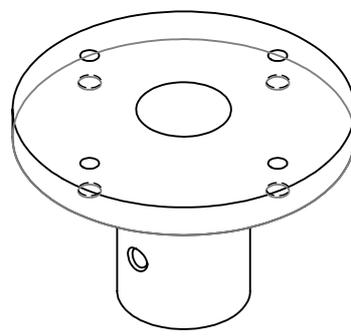
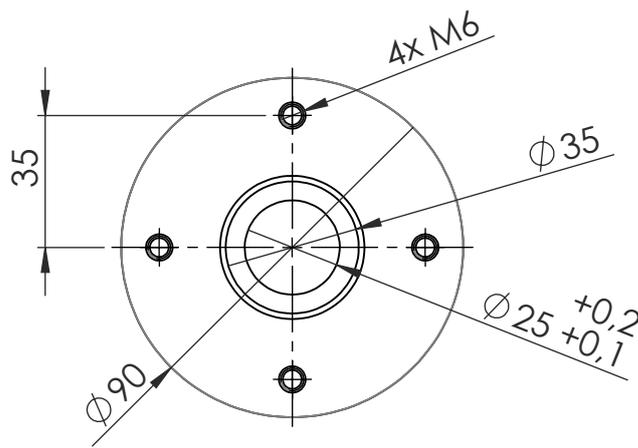


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH: ISO 8015 ISO 2768 - fH		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
								Chanfros de concordância 0,3x45° Raios de concordância 0,3			
								TITLE:			
DRAWN		Gonçalo Pires		SIGNATURE		DATE		01/06/2023			
CHK'D											
APPV'D											
MFG											
Q.A											
						Quantidade - 2					
						MATERIAL:		Aço C45		DWG NO. P5_Veio	
						WEIGHT:				SCALE:1:1	
										SHEET 1 OF 1	

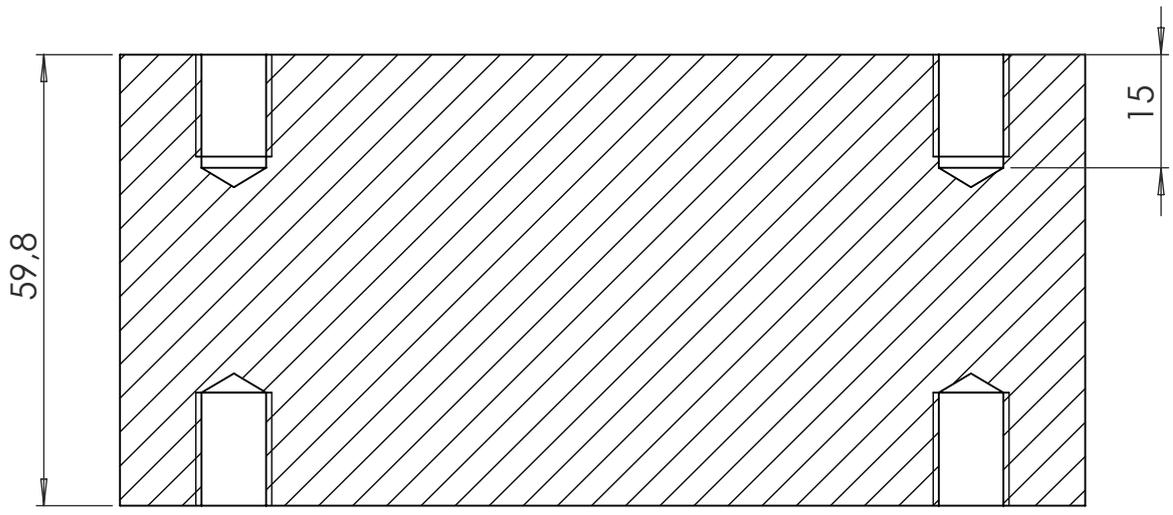
8 7 6 5 4 3 2 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH: ISO 8015 ISO 2768-mK		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION		
DRAWN Gonçalo Pires			SIGNATURE		DATE 20/08/2023		TITLE: Suporte Cremalheiras				
CHK'D											
APPV'D											
MFG											
Q.A							MATERIAL: Aço C45		DWG NO.		
							WEIGHT:		SCALE:1:1		SHEET 1 OF 1
									A3		



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH: ISO 2768-mk ISO 8015	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE:			
DRAWN Gonçalo Pires		05/07/2022				
CHK'D						
APPV'D						
MFG						
Q.A			MATERIAL: Al 5xxx	DWG NO. suporte gerador v3	A4	
			WEIGHT:	SCALE:1:2	SHEET 1 OF 1	



SECTION A-A

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH: ISO 8015 ISO 2768 - mK		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN Gonçalo Pires		SIGNATURE		DATE 29/05/2023		TITLE: Suporte rolamento			
CHK'D									
APPV'D									
MFG									
Q.A		MATERIAL: AL 5xxx				DWG NO.		A4	
		WEIGHT:		SCALE:1:1		SHEET 1 OF 1			

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

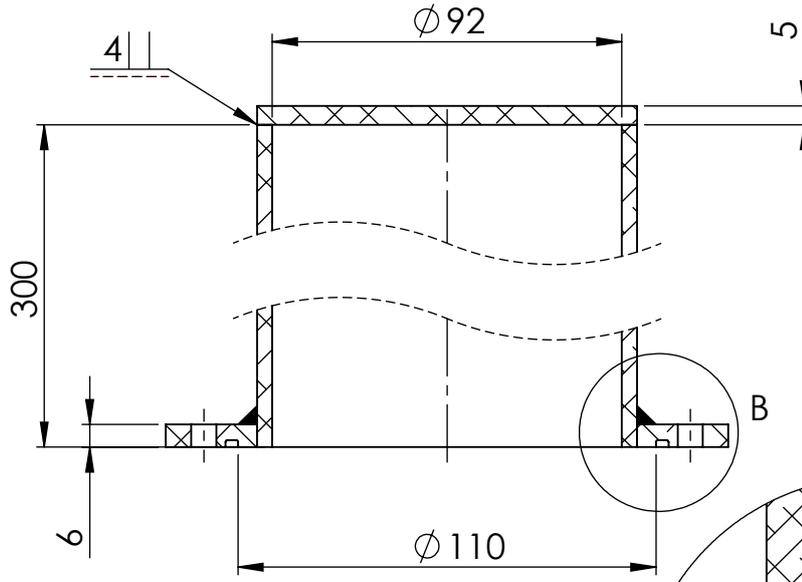
C

B

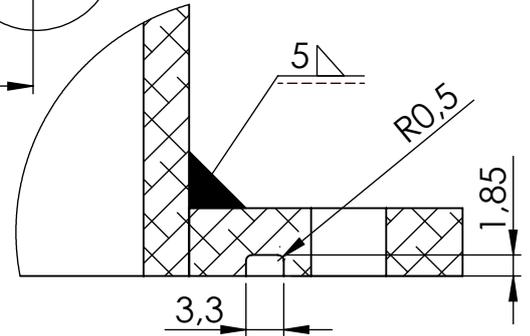
B

A

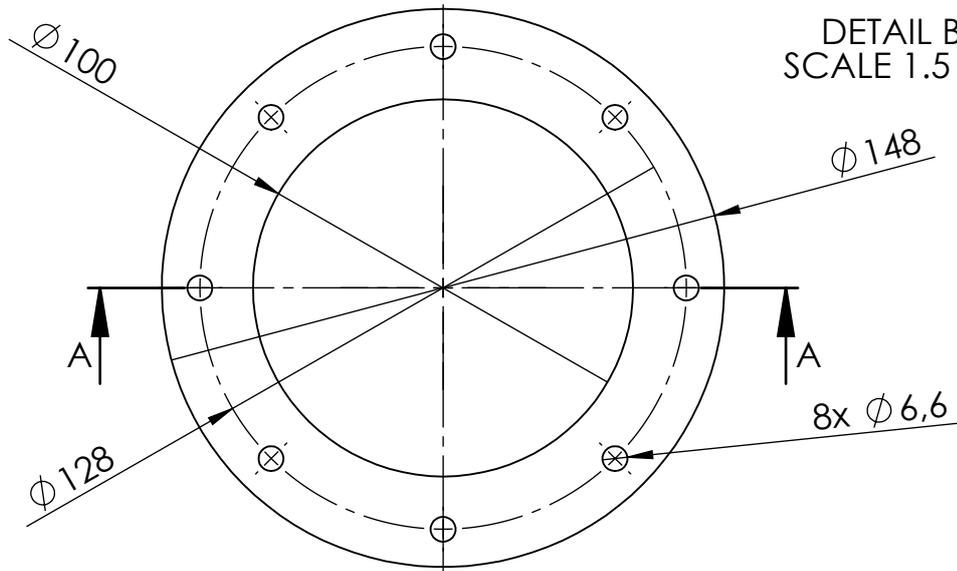
A



SECTION A-A



DETAIL B
SCALE 1.5 : 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS

FINISH:
ISO 8015
ISO 2768 - mK

DEBURR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE	MATERIAL:	TITLE:
DRAWN	Gonçalo Pires		14/07/2022	AL 5xxx	
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					



DWG NO.

Tampa_Sup

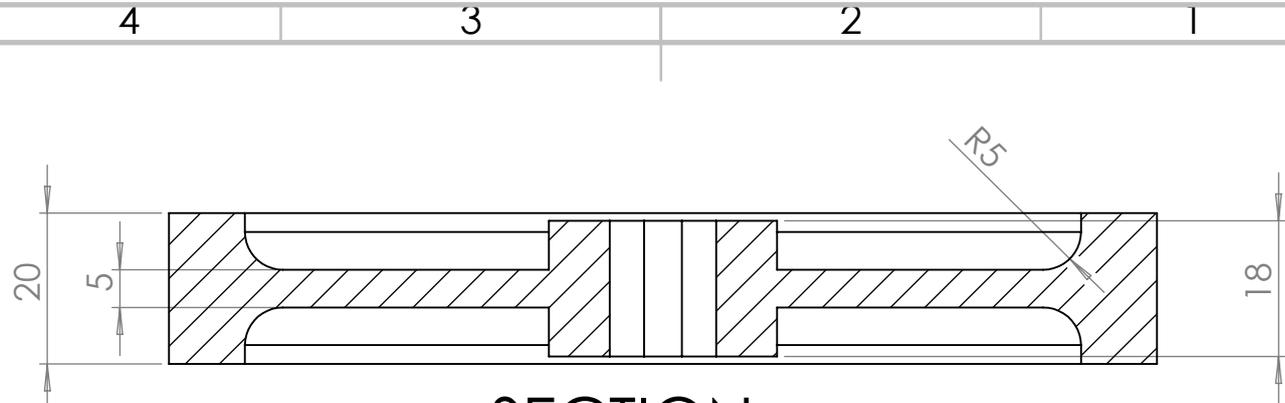
A4

WEIGHT:

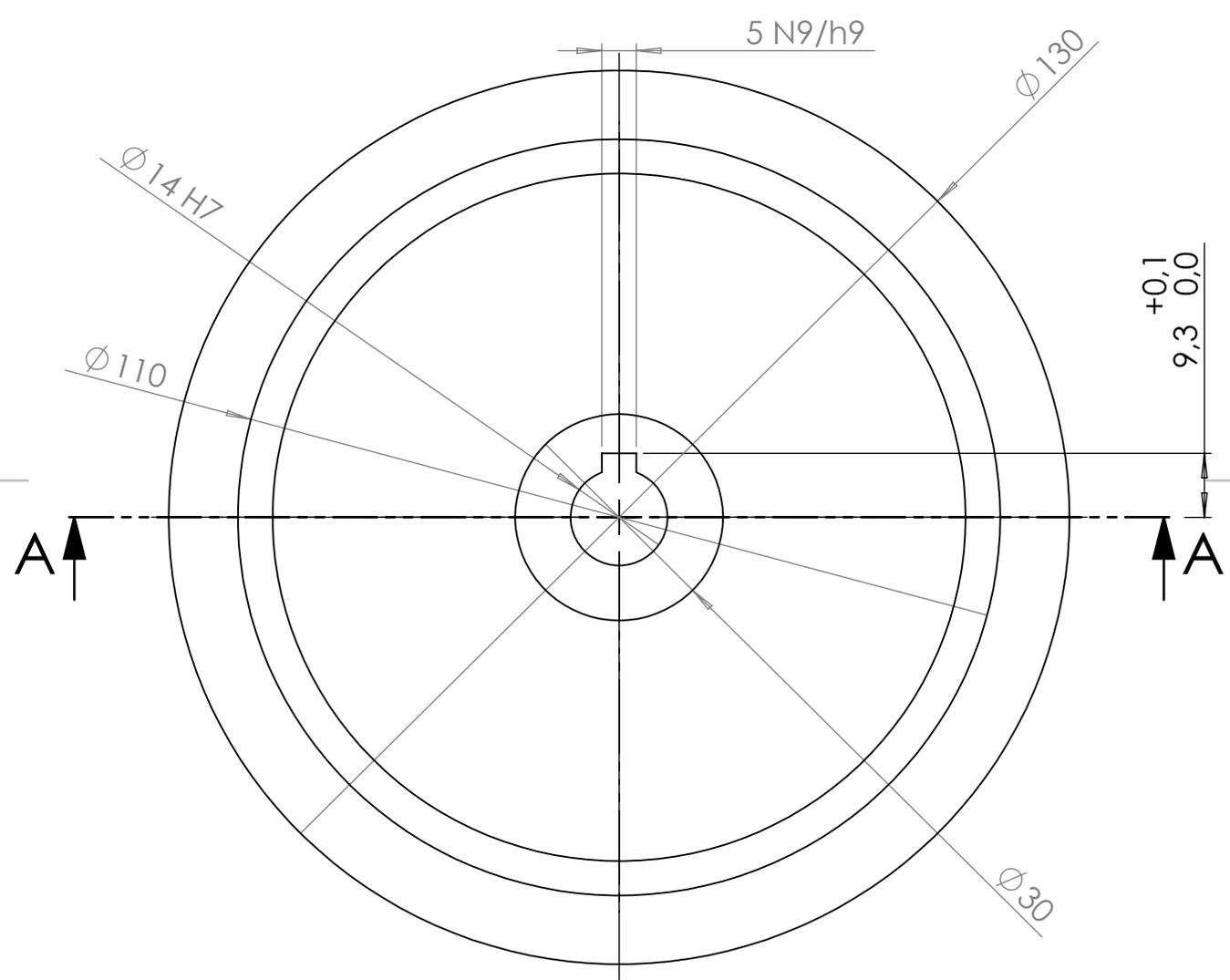
SCALE:1:2

SHEET 1 OF 1

4 3 2 1



SECTION A-A



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH: ISO 8015 ISO 2768 - mK	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION																				
<table border="1"> <thead> <tr> <th>NAME</th> <th>SIGNATURE</th> <th>DATE</th> <th>TITLE:</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DRAWN</td> <td>Gonçalo Pires</td> <td>11/02/2023</td> <td rowspan="5">volante de inércia</td> </tr> <tr> <td>CHK'D</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>APPV'D</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>MFG</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Q.A</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE:	DRAWN	Gonçalo Pires	11/02/2023	volante de inércia	CHK'D			APPV'D			MFG			Q.A			MATERIAL: Steel C45	DWG NO.	A4
NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE:																							
DRAWN	Gonçalo Pires	11/02/2023	volante de inércia																							
CHK'D																										
APPV'D																										
MFG																										
Q.A																										
WEIGHT:				SCALE:1:1	SHEET 1 OF 1																					

4 3 2 1

F

F

E

E

D

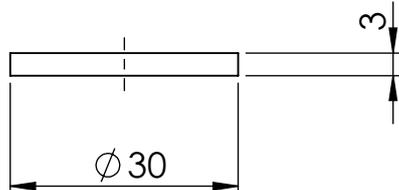
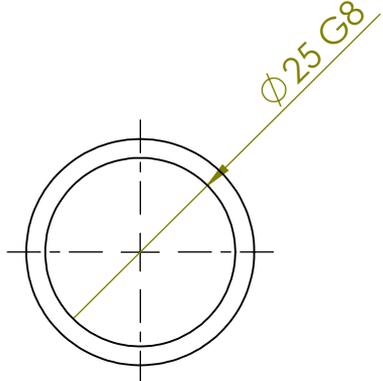
D

C

C

B

B



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS

FINISH:
ISO 8015
ISO 2768 - mK

DEBURR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE
DRAWN	Gonçalo Pires		15/04/2023
CHK'D			
APPV'D			
MFG			
Q.A			

MATERIAL:

STEEL
C45

TITLE:

Espacador



DWG NO. _____

A4

WEIGHT:

SCALE:1:1

SHEET 1 OF 1

4 3 2 1