

INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO

GELSON LUIZ CARNEIRO

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO PARA
GERAÇÃO DE ENERGIA ONDOMOTRIZ EM DISPOSITIVOS
FLUTUANTES MULTICORPOS**

CURITIBA

2022

GELSON LUIZ CARNEIRO

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO PARA
GERAÇÃO DE ENERGIA ONDOMOTRIZ EM DISPOSITIVOS
FLUTUANTES MULTICORPOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, Área de Concentração em Sistemas Energéticos – Convencionais e Alternativos, do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento de Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Renato de Arruda
Penteado Neto

CURITIBA

2022

C289

Carneiro, Gelson Luiz

Avaliação do comportamento hidráulico para geração de energia ondomotriz em dispositivos flutuantes multicorpos [recursos eletrônico] / Gelson Luiz Carneiro – Curitiba: LACTEC: IEP, 2022.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, Área de concentração – Sistemas Energéticos Convencionais e Alternativos, do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná (IEP).

Orientador: Prof. Dr. Renato de Arruda Penteado Neto

1. Geração de energia. 2. Energia – Fontes alternativas. 3. Hidráulica. I. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. II. Instituto de Engenharia do Paraná. III. Penteado Neto, Renato de Arruda. IV. Título.

TERMO DE APROVAÇÃO

GELSON LUIZ CARNEIRO

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ONDOMOTRIZ EM DISPOSITIVOS FLUTUANTES MULTICORPOS

Trabalho de conclusão de curso aprovado como requisito para obtenção do grau de Mestre, no Mestrado Profissional do Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, realização do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná (IEP), pela seguinte banca examinadora:

RENATO DE ARRUDA PENTEADO NETO

RENATO DE ARRUDA PENTEADO NETO (1 de March de 2022 17:49 GMT-3)

ORIENTADOR (A): Prof. Dr. Renato de Arruda Penteado Neto
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)



Prof. Dr. Vitoldo Swinka Filho
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)

Emerson Luiz Alberti

Emerson Luis Alberti (25 de February de 2022 15:41 GMT-3)

Prof. Dr. Emerson Luiz Alberti
ELEJOR



Prof. Dr. Mauricio Pereira Cantão
Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Curitiba, 23 de fevereiro de 2022.

Dedico este trabalho aos meus pais, Jair Cecilio Reina Carneiro e Teresinha Salete Carneiro, pelo incentivo constante, amor incondicional, exemplo de fé e gratidão, ao meu irmão Marco Aurelio Carneiro, pela inspiração técnica, dedicação profissional e amor fraterno.

O homem não teria alcançado o possível se, repetidas vezes, não tivesse tentado o impossível.

Max Weber

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, por minha saúde, pela família, amigos, pela graça de um novo dia.

Ao meu querido orientador, o Professor Dr. Renato de Arruda Penteado Neto, por sua gentileza, orientação, cobrança e exemplo profissional.

A minha querida e amada companheira, Giselle Elizabeth Miranda e Lima, pelo amor, carinho, paciência e compreensão nesta etapa.

Ao grupo Global Energia S.A. e ao programa de P&D Aneel, pela disponibilização de recursos para o desenvolvimento do PD-06961-0009/2019, “GEO – Gerador de Energia Ondomotriz”.

A equipe deste projeto, pelo apoio e colaboração com as atividades.

Ao meu colega Rodrigo Paludo, coordenador do projeto, pelo incentivo à realização deste trabalho.

Ao Lactec e colegas, pela contribuição, pela infraestrutura, pelo ambiente agradável.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

A busca por sistemas de geração de energia elétrica renováveis e eficientes tem sido cada vez mais necessária para toda a sociedade, visto a crescente necessidade desta forma de energia, dos problemas sociais e, principalmente, ambientais correlacionados aos tradicionais sistemas baseados na utilização de combustíveis fósseis. Diante das diversas fontes de energias renováveis disponíveis na natureza, a geração de energia ondomotriz tem se destacado, visto o potencial no mundo e as tecnologias atuais que permitem que os custos de implantação, operação e manutenção sejam reduzidos. Dentro destas tecnologias, a utilização de sistemas de tomada de força hidráulicos apresenta bons resultados para os diversos tipos de localização dos parques de geração, sejam os mais afastados ou mais próximos da costa. Para o projeto destes sistemas de geração de energia ondomotriz, diversos modelos computacionais podem ser utilizados, porém, sua integração tem sido bastante complexa, pelo fato de que alguns softwares permitem somente a simulação fluidodinâmica com partes mecânicas, ou somente um modelo de acionamento hidráulico sem correlação da movimentação de atuadores e válvulas. Desta forma, através da utilização do software MATLAB e sua ferramenta de simulação Simulink, com suas bibliotecas Simscape e Simscape Fluids, elaborou-se um modelo de simulação para um sistema de tomada de força hidráulica, que permite a variação de escala, número de flutuadores, componentes hidráulicos e com possibilidade para a integração de dados oriundos de outro software. Sua validação foi realizada através de um modelo reduzido ensaiado em um tanque de ondas, nas instalações do Lactec, onde suas limitações são apresentadas e perspectivas futuras de ampliação são consideradas. Através das simulações e testes do circuito hidráulico no tanque de ondas, os resultados obtidos indicam a possibilidade de conversão de até 18,06 W de potência pelo PTO (*Power Take-Off*) para uma onda com potência média disponível de 40,32 W/m.

Palavras-chave: Energia renovável. Geração de energia ondomotriz. PTO hidráulico. Modelo hidráulico de simulação.

ABSTRACT

The search for renewable and efficient electric power generation systems has been increasingly necessary for all of society, given the growing need for this form of energy and the social and, mainly, environmental problems related to traditional systems based on the use of fossil fuels. Given the various sources of renewable energy available in nature, wave energy generation has stood out, given the potential in the world and current technologies that allow the costs of implementation, operation and maintenance to be reduced. Within these technologies, the use of hydraulic power take-off systems presents good results for the different types of location of the generation parks, whether the furthest or closest to the coast. For the design of these wave power generation systems, several computational models can be used, however, their integration has been quite complex, due to the fact that some software only allow fluid dynamic simulation with mechanical parts, or only a hydraulic drive model without correlation of the movement of actuators and valves. Thus, through the use of MATLAB software and its simulation tool Simulink, with its Simscape and Simscape Fluids libraries, a simulation model was developed for a hydraulic power take-off system, which allows for the variation of scale, number of floats, hydraulic components and with the possibility to integrate data from other software. Its validation was carried out through a reduced model tested inside a wave tank, in the Lactec installations, where its limitations are presented, and future expansion perspectives are considered. Through simulations and tests of the hydraulic circuit in the wave tank, the results obtained indicate the possibility of converting up to 18,06 W of power by the PTO (Power Take-Off) to a wave with an average available power of 40,32 W/m.

Keywords: Renewable energy. Wave energy converter. Hydraulic PTO. Hydraulic simulation model.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE FONTES RENOVÁVEIS.....	18
FIGURA 2 - GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DA ENERGIA MARINHA.....	19
FIGURA 3 - DENSIDADE MÉDIA ANUAL DE POTÊNCIA DAS ONDAS (COR) E MELHOR DIREÇÃO MÉDIA ANUAL (→).....	23
FIGURA 4 - CONDIÇÕES NECESSÁRIAS PARA A FORMAÇÃO DE ONDAS DO TIPO SWELL.....	24
FIGURA 5 - DEFINIÇÕES BÁSICAS DAS CARACTERÍSTICAS DE UMA ONDA ...	25
FIGURA 6 - INTERAÇÃO ENTRE AS ONDAS E O FUNDO, CONFORME SE APROXIMAM DA COSTA	25
FIGURA 7 - MOVIMENTO DAS PARTÍCULAS DE ÁGUA DE ACORDO COM A PROFUNDIDADE E O COMPRIMENTO DA ONDA	26
FIGURA 8 - REGIÕES DO MAR EM RELAÇÃO À PROFUNDIDADE.....	28
FIGURA 9 - DISPOSITIVO DO TIPO ATENUADOR.....	28
FIGURA 10 - DISPOSITIVO DO TIPO ABSORVEDOR DE PONTO	29
FIGURA 11 - DISPOSITIVO DO TIPO OWSC	30
FIGURA 12 - DISPOSITIVO DO TIPO OWC	31
FIGURA 13 - DISPOSITIVO DO TIPO OVERTOPPING	32
FIGURA 14 - DISPOSITIVO DO TIPO DIFERENCIAL DE PRESSÃO SUBMERSO	33
FIGURA 15 - DISPOSITIVO DO TIPO ONDAS PROTUBERANTES.....	33
FIGURA 16 - DISPOSITIVO DO TIPO MASSA ROTATIVA.....	34
FIGURA 17 - DIAGRAMA ELÉTRICO DE UM SISTEMA DE CAPTURA DE ENERGIA DAS ONDAS OCEÂNICAS: CONVERSOR CC/CC ONSHORE	36
FIGURA 18 - DIAGRAMA ELÉTRICO DE UM SISTEMA DE CAPTURA DE ENERGIA DAS ONDAS OCEÂNICAS: CONVERSOR CC/CC OFFSHORE	36
FIGURA 19 - DIAGRAMA ELÉTRICO DE UM SISTEMA DE CAPTURA DE ENERGIA DAS ONDAS OCEÂNICAS: TRANSFORMADOR OFFSHORE	37
FIGURA 20 - DIAGRAMA ELÉTRICO DE UM SISTEMA DE CAPTURA DE ENERGIA DAS ONDAS OCEÂNICAS: LINHA DE TRANSMISSÃO CC EM ALTA TENSÃO....	37
FIGURA 21 - WAVE STAR, UM SISTEMA ABSORVEDOR DE MÚLTIPLOS PONTOS	41
FIGURA 22 - ESTRUTURA GERAL DE UM SISTEMA DE CONTROLE.....	42

FIGURA 23 – DIAGRAMA COM DIFERENTES CAMINHOS CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS EM ELETRICIDADE	52
FIGURA 24 – EXEMPLO DE UM SISTEMA DE UM PTO HIDRÁULICO PARA CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS	53
FIGURA 25 – TECNOLOGIA USADA EM UM SISTEMA HIDRÁULICO PARA PRODUZIR ELETRICIDADE A PARTIR DE ONDAS	54
FIGURA 26 – SISTEMA ESQUEMÁTICO SIMPLIFICADO DO GEO PELAMIS.....	54
FIGURA 27 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UM DISPOSITIVO DE ARTICULAÇÃO MULTICORPOS.....	55
FIGURA 28 – VISTA LATERAL E EM PLANTA DA MCCABE WAVE PUMP	55
FIGURA 29 – GEO NO LOCAL DE INSTALAÇÃO, CAPACIDADE DE 10 kW	56
FIGURA 30 – ESQUEMÁTICO DO SISTEMA DE PRESSÃO HIDRÁULICO	57
FIGURA 31 – ACUMULADORES NO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA HIDRÁULICA.....	57
FIGURA 32 – DIAGRAMA DE BLOCOS BÁSICO DO MODELO W2W	58
FIGURA 33 – CLASSIFICAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE EM UM SISTEMA DE CONVERSÃO DE ONDAS DE ACORDO COM DIFERENTES CRITÉRIOS.....	60
FIGURA 34 – PTO HIDRÁULICO DE PRESSÃO CONSTANTE COM BASE NA UTILIZAÇÃO DE QUATRO VÁLVULAS DE RETENÇÃO E ADIÇÃO DE ACUMULADORES EXTRAS ANEXADOS AO ATUADOR DO CILINDRO POR MEIO DE VÁLVULAS DE GAVETA	61
FIGURA 35 – PTO HIDRÁULICO DE PRESSÃO CONSTANTE COM BASE NA UTILIZAÇÃO DE DUAS VÁLVULAS DE RETENÇÃO	62
FIGURA 36 – PTO HIDRÁULICO DE PRESSÃO CONSTANTE COM BASE NA UTILIZAÇÃO DE UMA VÁLVULA DE CONTROLE DIRECIONAL.....	63
FIGURA 37 – PTO HIDRÁULICO DE PRESSÃO CONSTANTE COM BASE NA UTILIZAÇÃO MÚLTIPLAS VÁLVULAS DE CONTROLE DIRECIONAL	64
FIGURA 38 – PTO HIDRÁULICO DE PRESSÃO CONSTANTE COM BASE NA UTILIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR HIDRÁULICO	66
FIGURA 39 – MODELO REDUZIDO DO SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ONDOMOTRIZ.....	68
FIGURA 40 – CIRCUITO HIDRÁULICO PARA O PTO DO SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ONDOMOTRIZ.....	69

FIGURA 41 – MODELO DE SIMULAÇÃO CONSIDERADO.....	70
FIGURA 42 – BATEDOR TIPO PISTÃO PROJETADO PARA O TANQUE DE ONDAS COSTEIRAS DO LACTEC	71
FIGURA 43 – PROJETO DO TANQUE DE ONDAS COSTEIRAS DO LACTEC	72
FIGURA 44 – TANQUE DE ONDAS COSTEIRAS DO LACTEC: (A) VISÃO GERAL, (B) REGIÃO DO BATEDOR, (C) REGIÃO DA PRAIA	73
FIGURA 45 – ELEMENTOS DO PTO PARA TESTE	75
FIGURA 46 – CILINDRO HIDRÁULICO UTILIZADO NOS TESTES DE VALIDAÇÃO DO MODELO HIDRÁULICO	75
FIGURA 47 – ONDA GERADA PARA TESTES DE VALIDAÇÃO DO MODELO HIDRÁULICO	76
FIGURA 48 – CIRCUITO HIDRÁULICO CONSIDERADO PARA SIMULAÇÃO E TESTES DE VALIDAÇÃO NO TANQUE DE ONDAS	77
FIGURA 49 – CIRCUITO HIDRÁULICO MONTADO PARA OS TESTES DE VALIDAÇÃO NO TANQUE DE ONDAS.....	78
FIGURA 50 – CURSO DO CILINDRO DURANTE A SIMULAÇÃO.....	79
FIGURA 51 – PRESSÃO GERADA NO CILINDRO HIDRÁULICO DURANTE A SIMULAÇÃO	80
FIGURA 52 – FORÇA GERADA NO CILINDRO HIDRÁULICO DURANTE A SIMULAÇÃO	80
FIGURA 53 – VELOCIDADE GERADA NO CILINDRO HIDRÁULICO DURANTE A SIMULAÇÃO	81
FIGURA 54 – PRESSÃO GERADA NO ACUMULADOR HIDRÁULICO DURANTE A SIMULAÇÃO	82
FIGURA 55 – PRESSÃO GERADA NO ACUMULADOR HIDRÁULICO DURANTE OS TESTES NO TANQUE DE ONDAS	83
FIGURA 56 – PRESSÃO GERADA NO ACUMULADOR HIDRÁULICO DURANTE A SIMULAÇÃO: CIRCUITO COMPLETO SEM ATRASO DE TEMPO ENTRE FLUTUADORES.....	84
FIGURA 57 – PRESSÃO GERADA NO ACUMULADOR HIDRÁULICO DURANTE A SIMULAÇÃO: CIRCUITO COMPLETO COM ATRASO DE TEMPO ENTRE FLUTUADORES.....	85

LISTA DE SIGLAS

APE	<i>Adaptive Parameter Estimation</i>
AWS	<i>Archimedes Wave Swing</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CLP	Controlador Lógico Programável
FSA	<i>Force-Scan Algorithm</i>
GEO	Geração de Energia Ondomotriz (em inglês, <i>Wave Energy Converter – WEC</i>)
HPS	<i>Hydraulic Power System</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
LPMG	<i>Linear Permanent Magnet Generator</i>
MEC	<i>Maximum Efficiency Conversion</i>
MPC	<i>Model Predictive Control</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
MRC	<i>Multi Resonant Chambers</i>
OE Buoy	<i>Ocean Energy Buoy</i>
OPT	<i>Ocean Power Technologies</i>
OWC	<i>Oscillating Water Column</i>
OWSC	<i>Oscillating Wave Surge Converters</i>
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PD	<i>Proportional Derivative</i>
PDC3	<i>Proportional Derivative Complex Conjugate Control</i>
PDDFC	<i>Pressure Drop Database as the Feedback Control</i>
PID	Proporcional Integral Derivativo
PS	<i>Pseudo-Spectral</i>
PTO	<i>Power Take-Off</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
R-MPC	<i>Robust Model Predictive Control</i>
SA	<i>Singular Arc</i>
SB	<i>Shape Base</i>
SSG	<i>Sea Wave Slot Cone Generator</i>

W2W

Wave-to-Wire

WPEA

Wave Power Extraction Algorithm

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 CONTEXTO	17
1.2 OBJETIVOS	20
1.2.1 <i>Objetivo geral</i>	20
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i>	20
1.3 JUSTIFICATIVA	21
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	22
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1 POTENCIAL DE GERAÇÃO NO MUNDO E NO BRASIL	23
2.2 GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DAS ONDAS DO MAR – ONDOMOTRIZ..	23
2.3 TECNOLOGIAS DE SISTEMAS ONDOMOTRIZ EM FUNÇÃO DE SUA LOCALIZAÇÃO	27
2.4 TECNOLOGIAS DE SISTEMAS ONDOMOTRIZ EM FUNÇÃO DA FORMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA	28
2.5 TOPOLOGIAS DE SISTEMAS DE CONTROLE APLICÁVEIS À GERAÇÃO ONDOMOTRIZ	37
2.5.1 <i>Estratégias de controle</i>	41
2.6 PTO BASEADO EM SISTEMA HIDRÁULICO MULTICORPOS	51
3. TRABALHOS CORRELATOS	59
3.1 ACUMULADOR HIDRÁULICO COM VÁLVULA DE CONTROLE ATIVO	61
3.2 CILINDRO HIDRÁULICO COM VÁLVULA DE CONTROLE ATIVO	63
3.3 TRANSFORMADOR HIDRÁULICO COM MECANISMO DE CONTROLE DIGITAL	65
3.4 MECANISMO DE CONTROLE NO MÓDULO DE CONDICIONAMENTO	66
4. MATERIAIS E MÉTODO	68
4.1 MATERIAIS	68
4.2 MÉTODO	74
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	79

6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	86
REFERÊNCIAS.....	88

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

No mundo todo, assim como no Brasil, são muitos os desafios para a implementação de sistemas e políticas que assegurem o desenvolvimento sustentável, em especial os que tratam de fontes alternativas para a geração de energia elétrica. Anualmente, novos impactos ambientais, sociais e econômicos se apresentam quanto à utilização de sistemas de energias renováveis em comparação aos sistemas de energia convencionais. Isto proporciona novos desafios de pesquisas e avanços tecnológicos voltados à utilização de energias renováveis como uma alternativa segura e viável para a geração de energia elétrica.

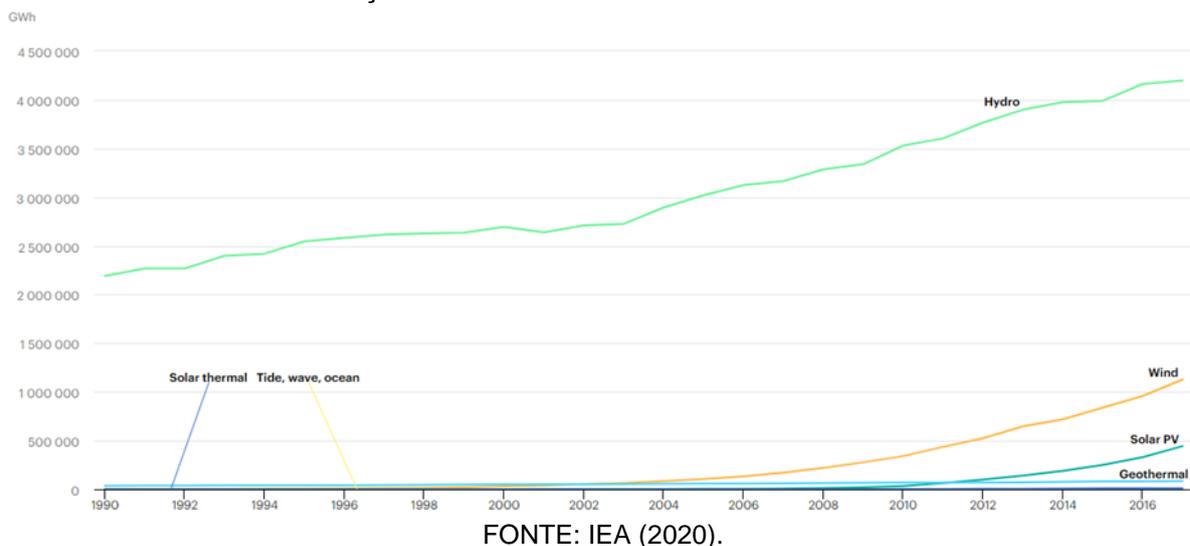
Nos dias atuais, problemas como o aquecimento global, conflitos políticos e militares em regiões detentoras de combustíveis fósseis provocam, no meio científico e em diversos setores industriais, o avanço tecnológico na utilização dos recursos renováveis, pois contribuem para a redução destes tipos de problemas. Diversas características devem ser avaliadas para a utilização das energias renováveis. Por exemplo, as fontes dos recursos renováveis possuem elevada imprevisibilidade, o que torna sua utilização e eficiência ainda questionáveis. Além disso, a capacidade de geração destas fontes renováveis não suporta a geração proporcionada pelas fontes convencionais.

Para Kåberger (2018), a eletricidade renovável de baixo custo está começando a substituir os combustíveis fósseis em diversos setores. Tornar o mundo independente dos limitados combustíveis fósseis será possível apenas quando a energia renovável substituir os combustíveis fósseis não só pela geração de eletricidade, mas também para outros fins, como sistemas de aquecimento, setor de transporte, entre outros. As comparações de preços de energia de eletricidade renovável e os diferentes combustíveis fósseis não são os únicos fatores que definem o sucesso dessa substituição.

Segundo informações da IEA (2020), a matriz energética mundial é extremamente dependente da geração de energia elétrica a partir de fontes convencionais. Conforme é apresentado na FIGURA 1, pode-se verificar a composição da matriz energética mundial em relação à geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis.

Uma destas fontes renováveis é a energia elétrica obtida a partir da energia marinha. Neste meio, são diversas as possíveis fontes de energia. Uma delas é a energia das marés, proveniente da interação dos campos gravitacionais da Lua e do Sol. Outra é a energia térmica dos oceanos, proveniente da radiação solar incidente. Existe também a energia das correntes marítimas, proveniente dos gradientes de temperatura e salinidade e na ação das marés. Por fim, a energia das ondas, proveniente do efeito do vento na superfície dos oceanos.

FIGURA 1 - GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE FONTES RENOVÁVEIS



Como pode ser observado na FIGURA 2, os valores de geração de energia a partir da energia marinha (maré, ondas e outras formas de geração) frente à disponibilidade do potencial das fontes renováveis ainda é muito pequeno, abaixo de 1 %, equivalente a 1.044 GWh (dados coletados até 2017).

A proposta deste trabalho é a de apresentar um estudo voltado à geração de energia elétrica a partir das ondas, princípio conhecido como GEO.

Um estudo apresentado por Gunn; Stock-Williams (2012), indica que o recurso global de energia das ondas é de aproximadamente $2,11 \pm 0,05$ TW. Deste total, a América do Sul dispõe de aproximadamente 374 ± 16 GW. No Brasil, conforme estudo apresentado por Fleming (2012), o potencial teórico para o litoral brasileiro pode variar de 91 a 165 GW.

FIGURA 2 - GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DA ENERGIA MARINHA



FONTE: IEA (2020).

Para Tiron et al. (2015), embora a extração de energia renovável leve a uma redução da dependência humana de combustíveis fósseis, é preciso também garantir que isso seja feito com o mínimo de consequências ambientais. No entanto, a produção de energia é um negócio e, como tal, regras de mercado serão aplicadas. À medida que os combustíveis fósseis se tornam mais caros, o desenvolvimento de matrizes de GEOs em larga escala se tornará mais competitivo.

Como apresentado por Felix et al. (2019), onde foi realizado um estudo sobre a utilização de sistemas de GEO em regiões tropicais, os desafios mais urgentes para a extração de energia das ondas podem ser separados em questões técnicas relacionadas aos dispositivos, incluindo a própria tecnologia GEO, bem como sua implementação (colocação, operação, manutenção e remoção), além das questões sociais e ecológicas, onde os desafios são determinar os pontos-chaves em condições tropicais que devem ser protegidos. A exploração dessas oportunidades é limitada pela dependência das economias nacionais de combustíveis fósseis, restrições políticas e sociais e imaturidade tecnológica.

Para Pecher et al. (2017), o uso generalizado de eletricidade acessível convertida a partir das ondas do oceano seria uma conquista fabulosa, pois apresenta vários benefícios significativos para a sociedade, como:

- É outra fonte de energia sustentável e interminável, que pode contribuir significativamente para o mix de energias renováveis;

- A eletricidade a partir da energia das ondas tornará os países mais autossuficientes em energia e, portanto, menos dependentes da importação de energia de outros países;
- Contribuirá para a criação de um novo setor de desenvolvimento tecnológico, proporcionando inovação e emprego;
- Sistemas de GEO podem ser construídos à uma distância considerável da costa, portanto, não requer espaço em terra nem provoca impacto visual significativo.

À medida que as necessidades mundiais de energia continuarem aumentando, enquanto as reservas de combustíveis fósseis se esgotarem, a energia das ondas se tornará de importância significativa.

1.2 OBJETIVOS

A partir da contextualização do problema apresentado no capítulo anterior e de forma a garantir a justificativa para o investimento da pesquisa e investigação para a solução deste problema, são apresentados os objetivos geral e específicos para o desenvolvimento deste trabalho de dissertação.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um modelo computacional multiparâmetros visando a avaliação do comportamento hidráulico para geração de energia ondomotriz em dispositivos flutuantes multicorpos.

1.2.2 Objetivos específicos

De forma a alcançar o objetivo geral deste trabalho de dissertação, foram elencados os seguintes objetivos específicos:

- Elaborar o circuito do conjunto hidráulico do sistema de GEO;
- Utilizar um software que permita a simulação de diferentes componentes hidráulicos, bem como a utilização de dados de entrada e/ou saída de outros aplicativos;
- Simular numericamente a característica principal de um sistema com PTO hidráulico, a geração de pressão;

- Testar um protótipo em modelo reduzido do sistema de GEO dentro de um ambiente controlado, como um tanque de ondas;
- Analisar os resultados obtidos nos testes para validação do circuito hidráulico.

1.3 JUSTIFICATIVA

Segundo Calejo (2012) e Assis (2010), os sistemas de conversão de energia das ondas podem ser classificados quanto à sua distância à costa: dispositivos costeiros (*shoreline* ou *onshore*); dispositivos próximos da costa (*nearshore*); dispositivos afastados da costa (*offshore*).

Existem muitos projetos em andamento para aproveitar a energia das ondas. Uma maneira de classificá-los, é pelo método usado para capturar a energia das ondas. Revisões técnicas sobre estes modelos são apresentadas por Hong et al. (2014) e Maria-Arenas et al. (2019). Para Khaligh; Onar (2010), a energia das ondas é uma fonte de energia renovável promissora para o futuro. Os dispositivos *nearshore*, GEOs instalados próximos a costa até uma profundidade de aproximadamente 50 m, devem crescer em número de aplicações em todo o mundo.

Em colaboração ao projeto de P&D vinculado à esta proposta de projeto de dissertação, o GEO avaliado neste trabalho é de aplicação *nearshore* e utiliza um sistema de conversão por corpos oscilantes, também denominados boias ou flutuadores, que provocam, a partir do movimento das ondas do mar, a movimentação de atuadores hidráulicos, que pressurizam um sistema hidráulico, fazendo girar um motor hidráulico conectado a um gerador elétrico. Estes sistemas costumemente utilizam acumuladores de pressão para armazenar energia por algum tempo, desta forma permite se adaptar melhor ao movimento lento dos elementos oscilantes e suavizar as flutuações irregulares na energia de ondas. Os movimentos dos corpos oscilantes de um GEO são fortemente afetados pela variação de pressão. As interações entre os corpos acionados por ondas e os módulos de tomada de força (PTO), têm efeitos significativos na eficiência de conversão de energia do GEO.

Por este motivo, este trabalho pretende investigar o comportamento de um sistema com PTO hidráulico, para melhoria da eficiência de geração de sistema GEO com utilização de dispositivos flutuantes multicorpos, considerando os componentes

do circuito eletro hidráulico do conjunto, bem como as possíveis soluções de circuito aplicáveis a este conjunto.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação está dividida em seis capítulos. O primeiro capítulo, introdução, apresenta o contexto no qual o tema deste trabalho está inserido, indicando os objetivos de seu desenvolvimento e a justificativa para tanto.

O segundo capítulo, fundamentação teórica, apresenta, de maneira geral, como estão correlacionados os temas envolvidos aos sistemas de geração ondomotriz baseado, principalmente, em artigos científicos e conceitos apresentados em livros. Assim, conceitos como potencial de geração de energia ondomotriz no mundo e diversos dispositivos para transformação desta energia em energia elétrica são apresentados. Já o terceiro capítulo, trabalhos correlatos, apresenta os trabalhos desenvolvidos envolvendo especificamente os dispositivos cuja tomada de força é realizada por um sistema hidráulico, através de um conjunto de componentes (cilindros, válvulas, motor, entre outros) conectados à um dispositivo flutuante, que recebe a energia ondomotriz.

No quarto capítulo, materiais e métodos, é descrito quais softwares para simulação e projeto dos sistemas hidráulicos são utilizados, além de apresentar o método de validação dos dados gerados por simulação em comparação aos dados medidos num tanque de ondas. No quinto capítulo, resultados e discussão, são apresentados os dados coletados durante os ensaios no tanque de ondas e sua avaliação com relação aos resultados obtidos por simulação computacional.

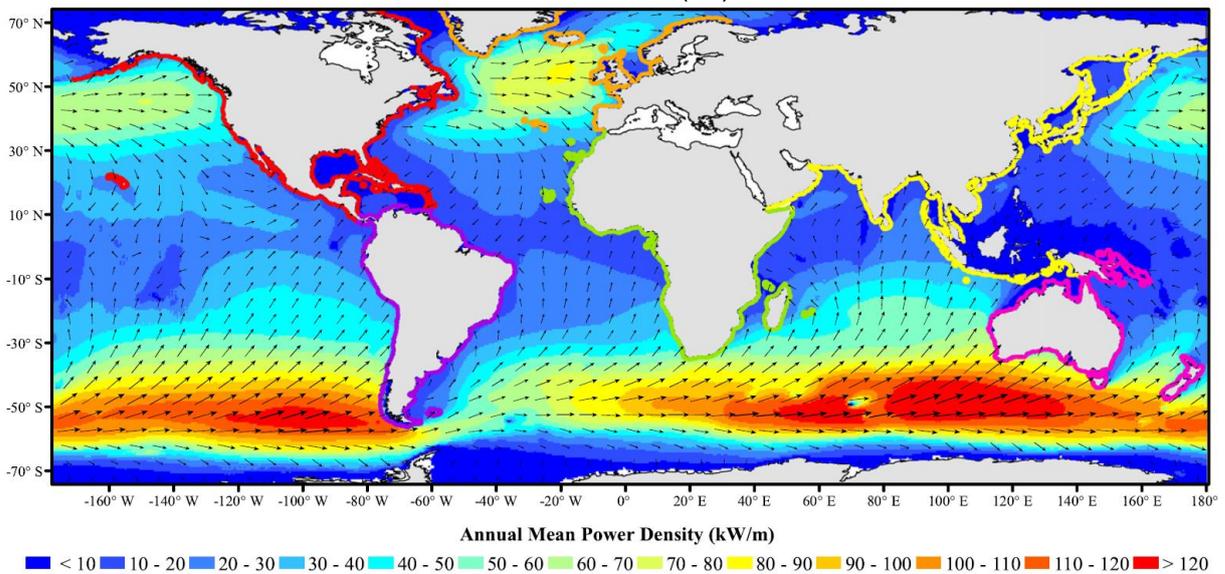
Por fim, o sexto capítulo, conclusões e trabalhos futuros, traz um comentário geral sobre os resultados esperados e alcançados com esta dissertação, apontando suas limitações e proposições para novos desenvolvimentos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 POTENCIAL DE GERAÇÃO NO MUNDO E NO BRASIL

Um estudo apresentado por Gunn; Stock-Williams (2012), indica que o recurso global de energia das ondas é de aproximadamente $2,11 \pm 0,05$ TW. Deste total, a América do Sul dispõe de aproximadamente 374 ± 16 GW. Além disso, a FIGURA 3 apresenta a distribuição global da densidade média anual de energia. As setas no gráfico representam a melhor direção média, isto é, a direção das médias dos vetores de densidade de potência.

FIGURA 3 - DENSIDADE MÉDIA ANUAL DE POTÊNCIA DAS ONDAS (COR) E MELHOR DIREÇÃO MÉDIA ANUAL (→)



FONTE: Gunn; Stock-Williams (2012).

Isso demonstra que os locais de maior interesse para a energia das ondas estão na costa oeste de massas terrestres, pois as ondas fluem principalmente de oeste para leste.

No Brasil, conforme estudo apresentado por Fleming (2012), o potencial teórico para o litoral brasileiro pode variar de 91 a 165 GW.

2.2 GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DAS ONDAS DO MAR – ONDOMOTRIZ

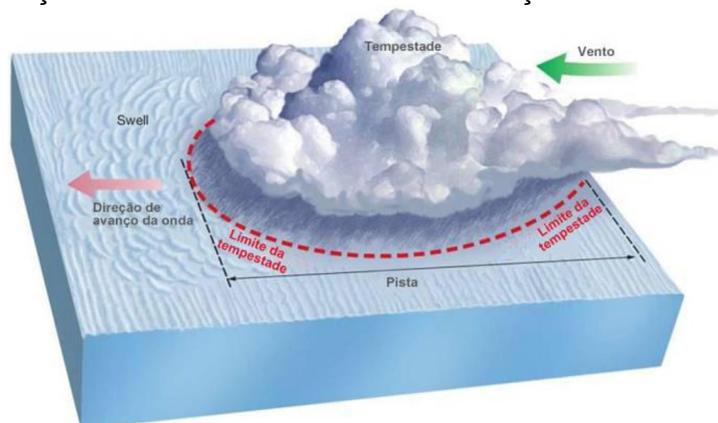
Conforme Fleming (2012) e Zandomenigo, R.; Schmidt, N. L.; D'Aquino (2015), as ondas que quebram em uma praia, podem viajar centenas ou até milhares

de quilômetros desde sua região de formação. Entre todas as ondas oceânicas, as geradas pelos ventos são as que possuem maior concentração de energia.

Nos oceanos as ondas superficiais são geradas pela interação dos ventos com a superfície. Ao soprarem paralelos à superfície, os ventos transferem energia cinética para o mar e uma parte desta energia acaba por gerar as ondas. A quantidade de energia transferida do vento para a superfície do mar vai depender: (i) da intensidade do vento, (ii) do tempo de atuação deste vento e (iii) da área sobre a qual está atuando, a chamada pista, como mostra a FIGURA 4. Sendo assim, quanto maior a velocidade, o tempo e a pista, maior será a onda resultante.

Segundo Omar (2018), podemos distinguir dois tipos de ondas oceânicas causadas por ventos: as vagas e os *swells*. As ondas vagas são o resultado de vento local, que dissipam rapidamente a sua energia e altura devido à tensão de superfície da água pela qual se deslocam. Entretanto, nas ondas do tipo *swell*, a energia obtida é suficiente para que a onda atravesse várias centenas ou mesmo milhares de quilômetros, até atingir a costa.

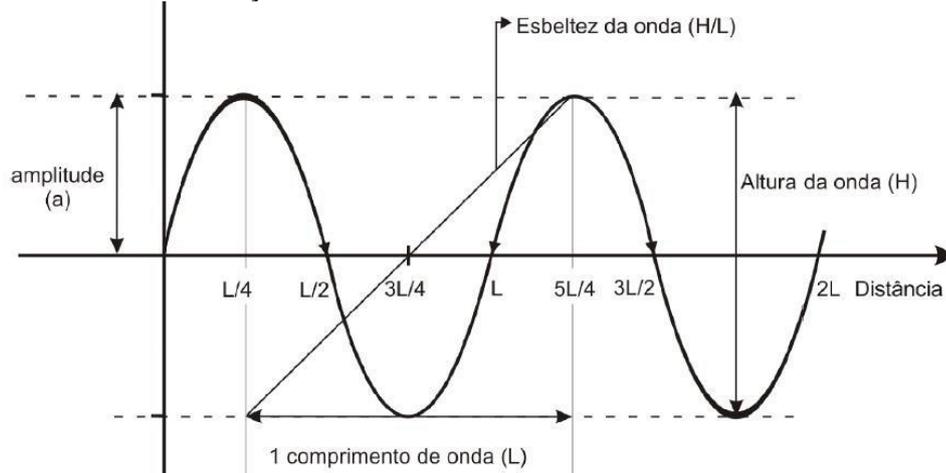
FIGURA 4 - CONDIÇÕES NECESSÁRIAS PARA A FORMAÇÃO DE ONDAS DO TIPO SWELL



FONTE: Fleming (2012).

Como pode ser observado na FIGURA 5, segundo Fleming (2012), as principais características de uma onda são o comprimento de onda (L), que é a distância horizontal entre duas cristas, a altura (H), que é a distância vertical entre a crista e o vale, e o período, que é o tempo de passagem de duas cristas. Outra característica importante é a esbeltez, que é a relação entre a altura e o comprimento de onda (tangente do ângulo formado por estas variáveis).

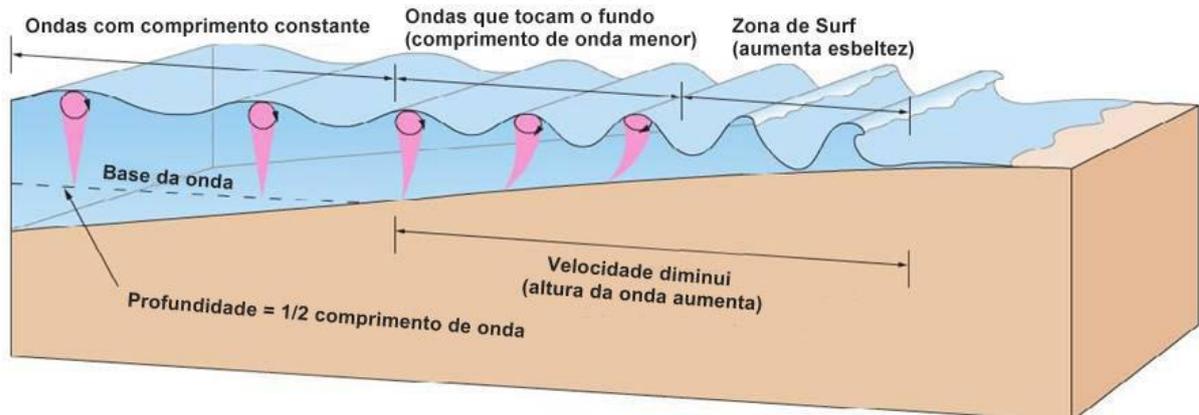
FIGURA 5 - DEFINIÇÕES BÁSICAS DAS CARACTERÍSTICAS DE UMA ONDA



FONTE: Fleming (2012).

Segundo Fleming (2012) e Espindola (2017), as ondas podem percorrer centenas de quilômetros sem perdas significativas de energia. As perdas ocorrem basicamente quando a onda começa a interagir com o fundo, na forma de atrito. Isso começa a ocorrer quando a profundidade se torna menor do que metade do comprimento da onda, passando de água profunda a água intermediária (até profundidade igual $L/20$) e água rasa (profundidade menor que $L/20$). Nesse trajeto a onda começa a perder velocidade e o comprimento de onda começa a diminuir, tendo como consequência o aumento da altura, até que a onda se torna “muito alta” e quebra, conforme apresentado na FIGURA 6.

FIGURA 6 - INTERAÇÃO ENTRE AS ONDAS E O FUNDO, CONFORME SE APROXIMAM DA COSTA

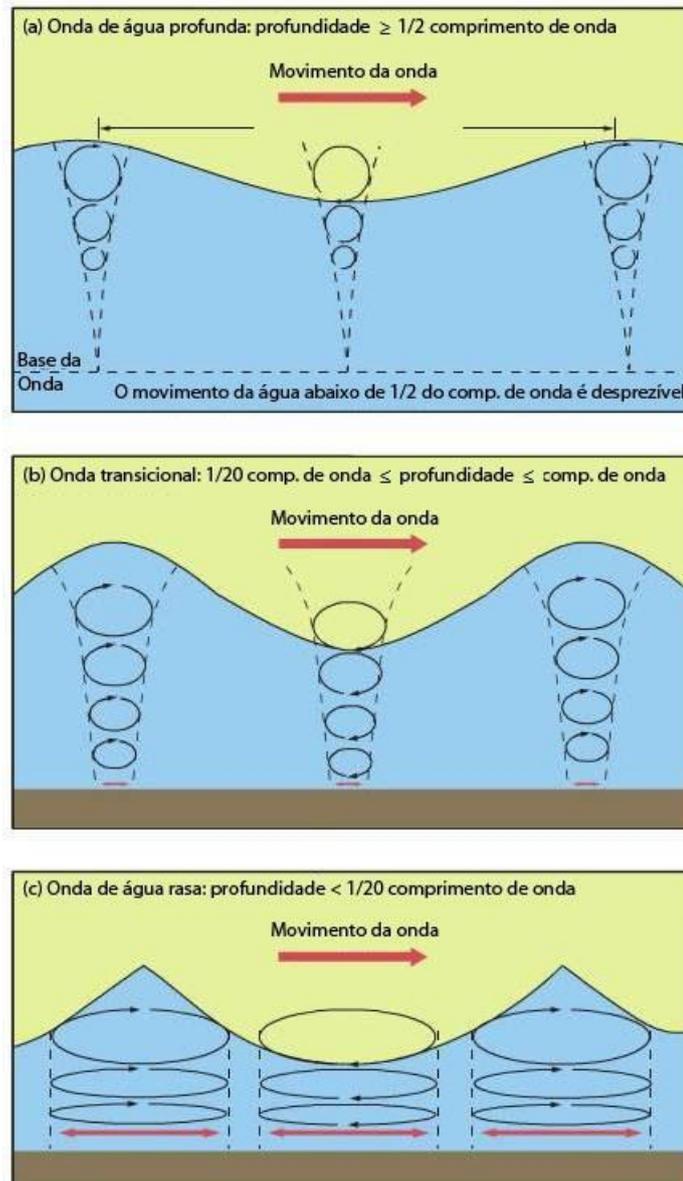


FONTE: Fleming (2012).

O movimento das partículas de água também se altera, passando de circular em águas profundas a elíptico, se tornando cada vez mais achatado até que, junto ao

fundo em águas rasas, o movimento se torna apenas horizontal, para frente e para trás, como mostra a FIGURA 7.

FIGURA 7 - MOVIMENTO DAS PARTÍCULAS DE ÁGUA DE ACORDO COM A PROFUNDIDADE E O COMPRIMENTO DA ONDA



FONTE: Fleming (2012).

De maneira simplificada, pode-se determinar o fluxo de energia, considerando a energia total da onda, ou seja, a soma da energia cinética e energia potencial da mesma, por unidade de área. Assim:

$$P = \frac{H^2 \cdot T}{2}$$

Equação
1

onde H é a altura da onda, em [m], T é o período da onda, em [s]. A potência média em um metro de frente de onda é representada por P , dada em [kW/m].

2.3 TECNOLOGIAS DE SISTEMAS ONDOMOTRIZ EM FUNÇÃO DE SUA LOCALIZAÇÃO

Segundo Calejo (2012) e Assis (2010), os sistemas de conversão de energia das ondas podem ser classificados quanto à sua distância à costa: dispositivos costeiros (*shoreline* ou *onshore*); dispositivos próximos da costa (*nearshore*); dispositivos afastados da costa (*offshore*).

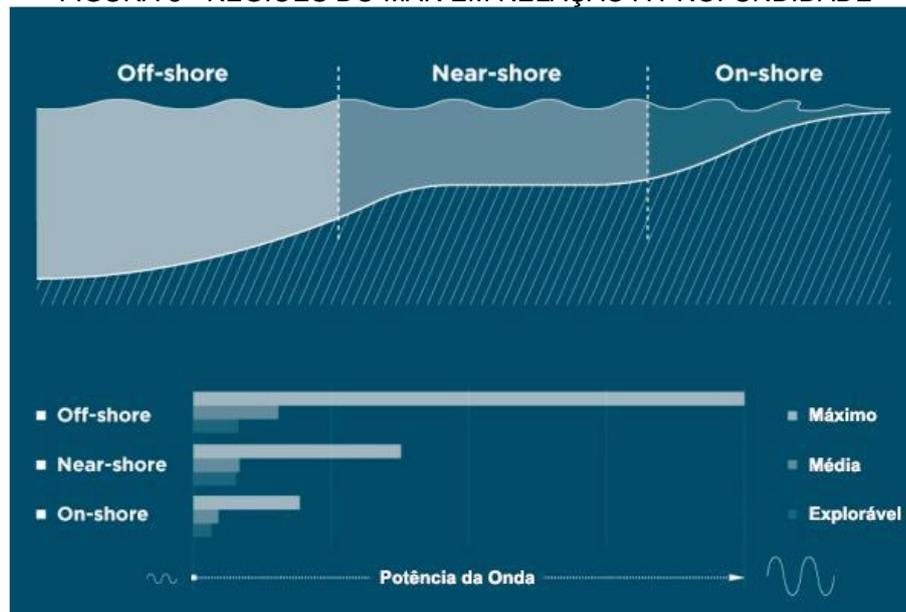
Os mecanismos *shoreline*, também denominados como *onshore*, são caracterizados por todos os sistemas construídos para operar na costa e as profundidades são, normalmente, inferiores a 20 m. Apresentam como principal vantagem a facilidade de ancoragem e de acesso para a realização de operações de manutenção. Os custos da instalação são normalmente inferiores aos dos restantes mecanismos, e as perdas no transporte de eletricidade são baixas dada a proximidade com a rede elétrica. Por outro lado, além do impacto visual que poderão causar, a energia que conseguem aproveitar é muito inferior à energia transportada pela onda antes de ocorrer a dissipação energética resultante do atrito com o solo marítimo junto à costa.

Nos mecanismos do grupo *nearshore* incluem-se os sistemas mecânicos instalados até uma profundidade de aproximadamente 50 m. Estes tipos de dispositivos, operam numa área com maior densidade energética que os dispositivos *shoreline*, provocam menores impactos visuais e apresentam um investimento inicial mais elevado. Além disso podem representar uma barreira para a navegabilidade marítima junto à costa.

Os mecanismos *offshore* caracterizam-se por operarem em águas profundas, além dos 50 m de profundidade e onde os regimes de energia das ondas são mais elevados. Em contrapartida, os principais pontos fracos que apresentam são os elevados custos de construção, as dificuldades de instalação e manutenção, e as elevadas perdas elétricas de transporte devido à distância até à rede de distribuição.

A FIGURA 8 apresenta um esquema da localização de cada uma dessas zonas e a potência da onda inerente a elas. Fica evidente por ela, que quanto mais afastado da costa, mais energético se torna o mar.

FIGURA 8 - REGIÕES DO MAR EM RELAÇÃO À PROFUNDIDADE



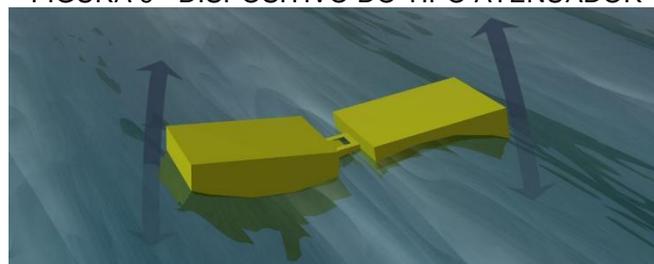
FONTE: Espindola (2017).

2.4 TECNOLOGIAS DE SISTEMAS ONDOMOTRIZ EM FUNÇÃO DA FORMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA

Segundo informações disponibilizadas pela Aqua-RET (2020), existem muitos projetos em andamento para aproveitar o poder das ondas. Uma maneira de classificá-los, é pelo método usado para capturar a energia das ondas:

- **Atenuador** – É um dispositivo flutuante longo, alinhado perpendicularmente à frente da onda. O dispositivo atravessa efetivamente as ondas e captura a energia à medida que a onda passa, restringindo seletivamente os movimentos ao longo de seu comprimento. Um exemplo atual para o atenuador é o dispositivo Pelamis; os conceitos anteriores foram o McCabe Wave Pump (testes no mar) e o Cockerel Raft (testes de conceito). A FIGURA 9 ilustra este tipo de dispositivo.

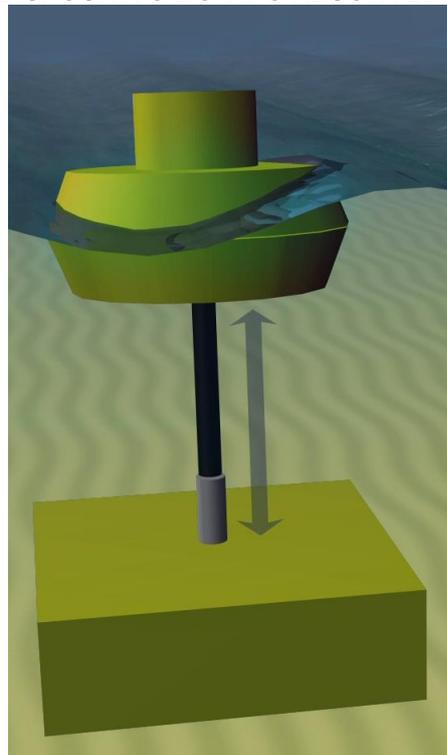
FIGURA 9 - DISPOSITIVO DO TIPO ATENUADOR



FONTE: Aqua-RET (2020).

- **Absorvedor de ponto** – É uma estrutura flutuante que absorve a energia das ondas em todas as direções em virtude de seus movimentos na superfície ou perto da superfície da água. Possui pequenas dimensões em comparação com o comprimento de onda típico, tendendo a ter diâmetros de alguns metros. A característica de absorção de pontos basicamente significa a capacidade de absorver energia da área do mar maior que as dimensões do dispositivo. Em referência ao mesmo efeito fundamental nas ondas de rádio (ou seja, acústicas), esse efeito também é chamado de efeito de antena. Projetos do tipo boia, por exemplo, atuam como absorvedores de pontos. Normalmente, mas não necessariamente, essas boias são simétricas em torno do eixo. Exemplos atuais para esta categoria são o Wavebob, o OPT PowerBuoy e o Aquabuoy. Um exemplo de absorvedor de pontos assimétrico em torno do eixo, porém com características muito semelhantes, é o SeaREV. As boias de OWC (OE Buoy, Sperboy, MRC) também possuem características de absorção de pontos, no entanto são geralmente consideradas na categoria de OWC. A FIGURA 10 ilustra este tipo de dispositivo.

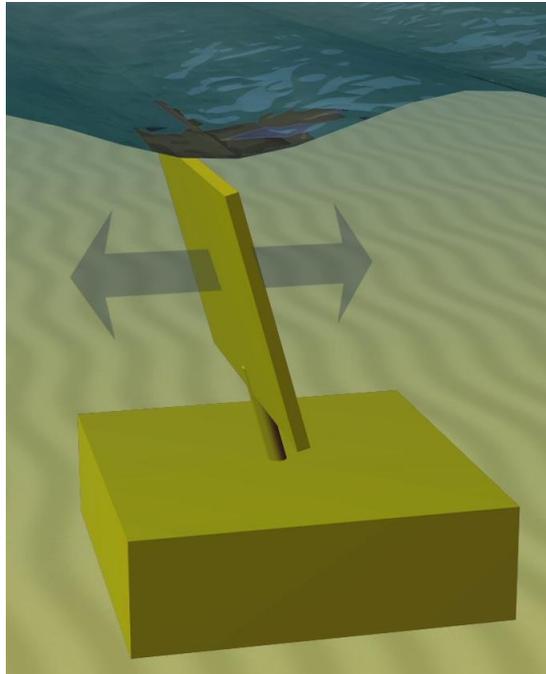
FIGURA 10 - DISPOSITIVO DO TIPO ABSORVEDOR DE PONTO



FONTE: Aqua-RET (2020).

- **Conversores de onda oscilante (OWSC)** – Este é um coletor próximo à superfície d'água, montado em um braço articulado próximo ao fundo do mar. O braço oscila como um pêndulo invertido devido ao movimento das partículas de água nas ondas. Exemplos atuais para esta categoria são o Waveroller (completamente submerso) e o Oyster, que atravessa a superfície do mar. Um dispositivo anterior a estes, o pêndulo japonês, tinha a aba articulada perto da superfície, pendurada para baixo, fixada num dispositivo flutuante. A FIGURA 11 ilustra este tipo de dispositivo.

FIGURA 11 - DISPOSITIVO DO TIPO OWSC

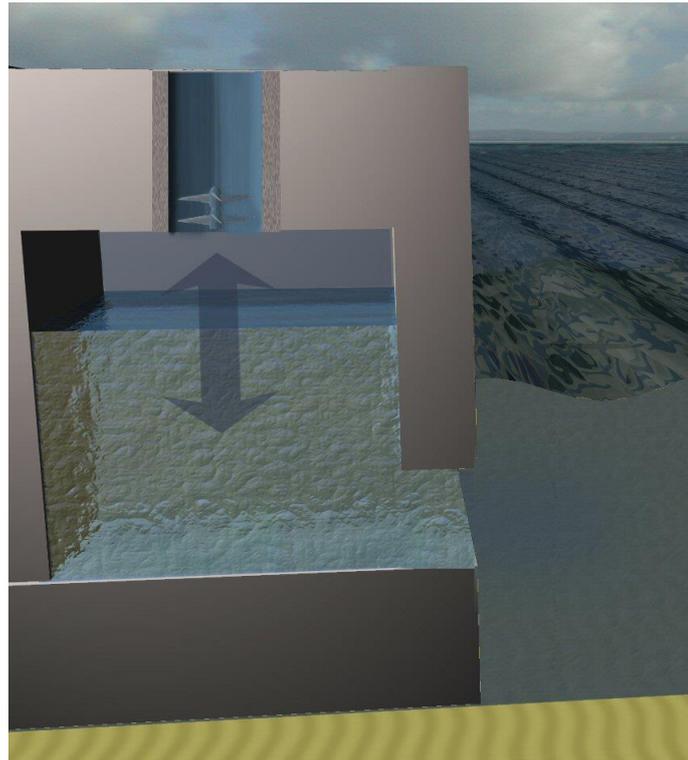


FONTE: Aqua-RET (2020).

- **Coluna de água oscilante (OWC)** – Essa é uma estrutura oca parcialmente submersa, que é aberta para o mar abaixo da superfície da água, de modo a conter o ar preso acima de uma coluna de água. As ondas fazem a coluna subir e descer, agindo como um pistão, comprimindo e descomprimindo o ar. Esse ar é canalizado através de uma turbina a ar para produzir energia. Quando projetados adequadamente para o estado marinho predominante, os OWCs podem ser ajustados para o período de ondas incidentes, a fim de ressoar. Por esse meio, o OWC pode realmente ser bastante eficiente e apresentar características de absorção de pontos. Um caso específico dessa categoria é a boia OWC, que é um OWC

flutuante. Entre os dispositivos atualmente propostos estão o Sperboy, o MRC e o duto Backward Bent tipo OE Buoy. Os OWCs clássicos são dispositivos para aplicações shoreline, construídos diretamente na linha da costa (Pico OWC, Limpet OWC) ou integrados em quebra-mares (Mutriku OWC). A FIGURA 12 ilustra este tipo de dispositivo.

FIGURA 12 - DISPOSITIVO DO TIPO OWC

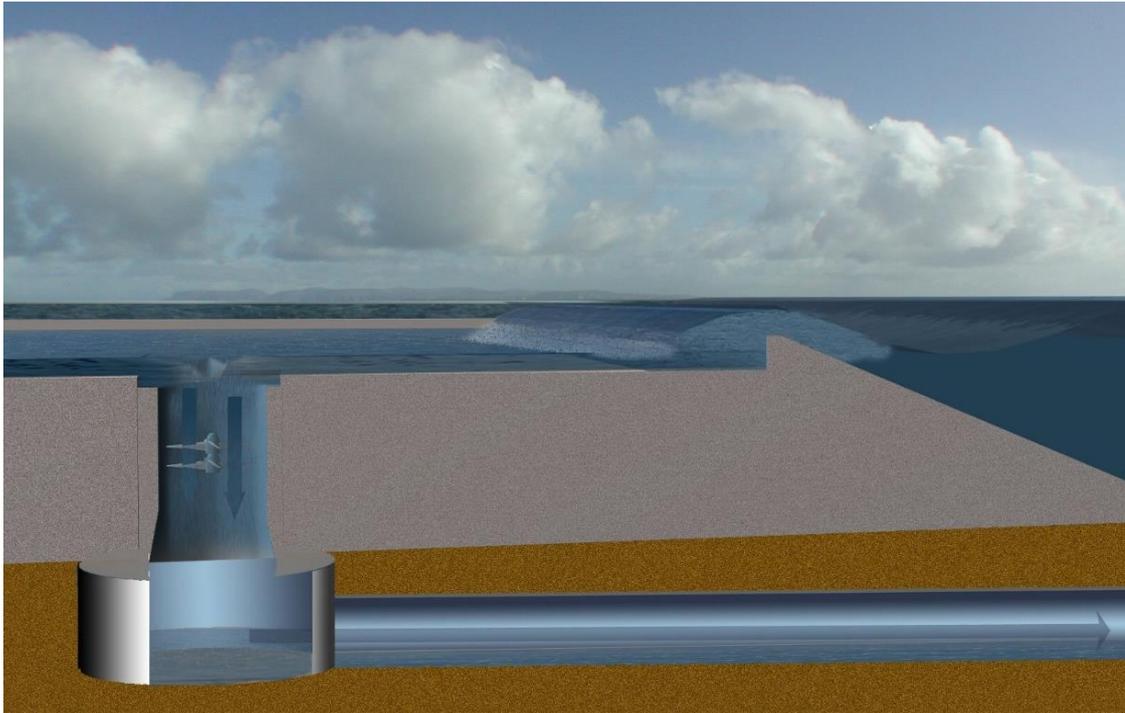


FONTE: Aqua-RET (2020).

- **Dispositivo de transbordamento/galgamento (*Overtopping*)** – Este tipo de dispositivo consiste em uma parede sobre a qual as ondas transbordam, coletando a água em um reservatório de armazenamento superior. As ondas de entrada criam uma coluna de água, que é lançada de volta ao mar através de turbinas convencionais instaladas no fundo do reservatório. Um dispositivo de transbordamento pode usar coletores para concentrar a energia das ondas. Os dispositivos de *overtopping* são tipicamente estruturas grandes devido ao espaço necessário para o reservatório, que precisa ter uma capacidade mínima de armazenamento. Os dispositivos podem flutuar como o Wave Dragon, atualmente o maior conversor de energia das ondas em desenvolvimento, ou estruturas fixas terrestres, como o SSG (integrado a um quebra-mar). Um dos primeiros

exemplos de dispositivos de *overtopping* foi o dispositivo TAPChan em Toftestallen, na Noruega, onde um canal cônico provocou ondas de *overtopping* em um reservatório em terra. A FIGURA 13 ilustra este tipo de dispositivo.

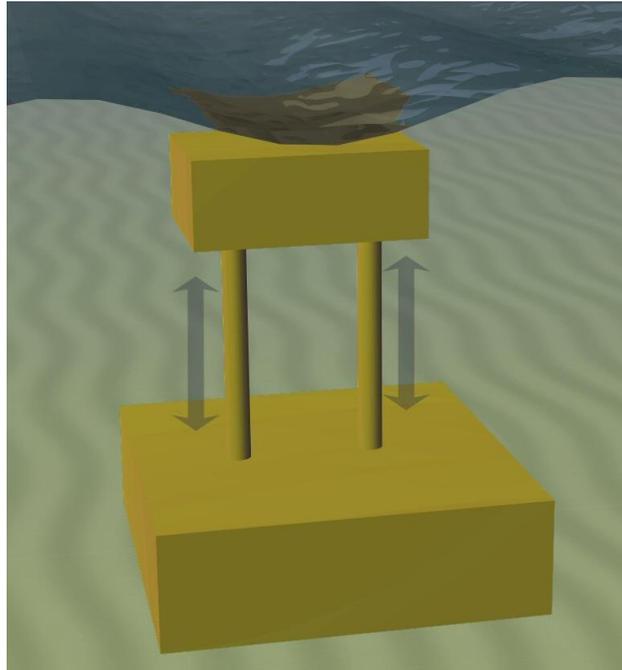
FIGURA 13 - DISPOSITIVO DO TIPO OVERTOPPING



FONTE: Aqua-RET (2020).

- **Diferencial de pressão submerso** – Este é um dispositivo submerso normalmente localizado próximo à costa (*nearshore*) e conectado ao fundo do mar. O movimento das ondas faz com que o nível do mar suba e desça acima do dispositivo, induzindo um diferencial de pressão que faz com que o dispositivo suba e desça com as ondas. Quando projetada adequadamente para o local de instalação, essa categoria também possui características significativas de absorção de pontos. Um exemplo bem reconhecido para a realização desse conceito até o momento é o AWS, que também possui boas características de absorção de pontos. Outro dispositivo que pode ser considerado nessa categoria é o Waverotor. A FIGURA 14 ilustra este tipo de dispositivo.

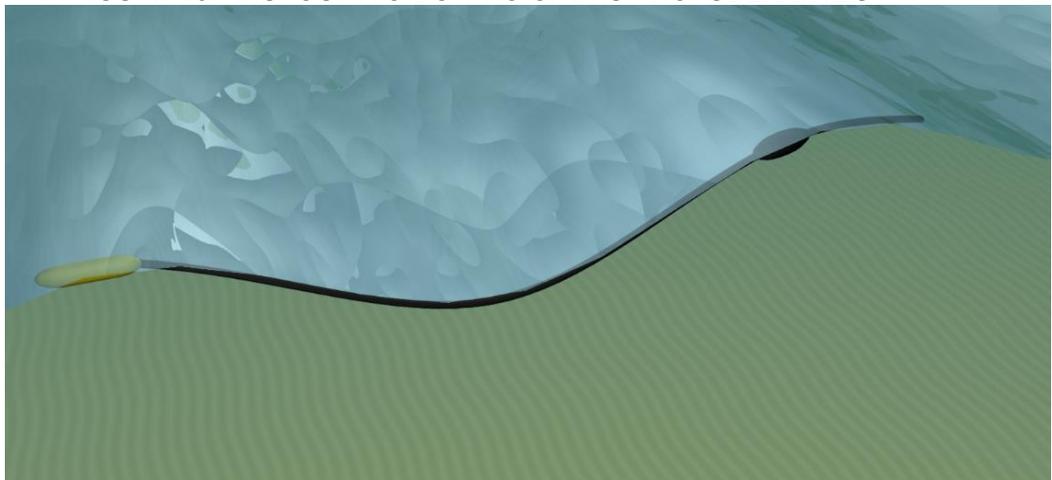
FIGURA 14 - DISPOSITIVO DO TIPO DIFERENCIAL DE PRESSÃO SUBMERSO



FONTE: Aqua-RET (2020).

- **Ondas protuberantes** – A tecnologia de ondas protuberantes (ou salientes) consiste em um tubo de borracha cheio de água, ancorado no fundo do mar e se dirigindo para as ondas. A água entra pela popa e a onda que passa causa variações de pressão ao longo do comprimento do tubo, criando uma "protuberância". À medida que a protuberância viaja através do tubo, ela cresce, reunindo energia que pode ser usada para acionar uma turbina padrão localizada na proa, onde a água retorna ao mar. A FIGURA 15 ilustra este tipo de dispositivo.

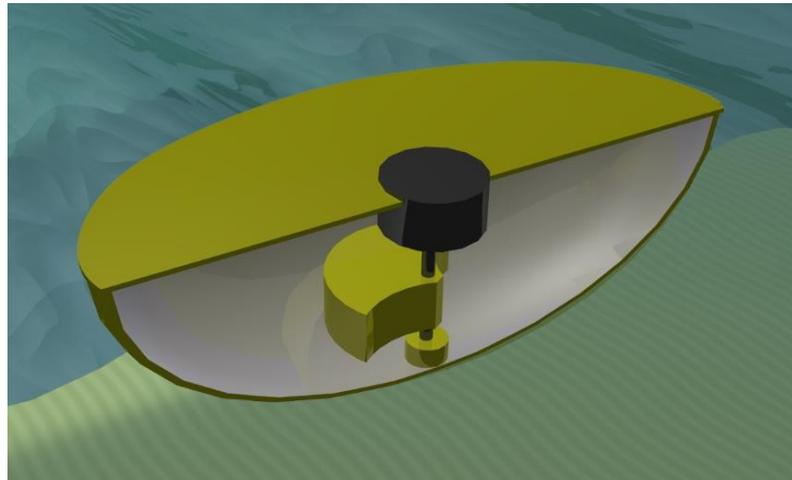
FIGURA 15 - DISPOSITIVO DO TIPO ONDAS PROTUBERANTES



FONTE: Aqua-RET (2020).

- **Massa rotativa** – Duas formas de rotação são usadas para capturar energia pelo movimento do dispositivo que balança e oscila nas ondas. Esse movimento gera um peso excêntrico ou um giroscópio causa precessão, que é um fenômeno físico que consiste na mudança do eixo de rotação de um objeto. Nos dois casos, o movimento é conectado a um gerador elétrico dentro do dispositivo. A FIGURA 16 ilustra este tipo de dispositivo.

FIGURA 16 - DISPOSITIVO DO TIPO MASSA ROTATIVA



FONTE: Aqua-RET (2020).

Segundo Rusu; Onea (2018), para ter sucesso, os projetos de pesquisa e desenvolvimento em energia das ondas precisam identificar maneiras de reduzir o custo da eletricidade e encontrar um mecanismo de proteção adequado para os GEOs, a fim de sobreviver ao clima e ao ambiente marinho agressivo e corrosivo. A maioria dos estudos investiga esses problemas apenas em nível teórico. Os atuais sistemas pré-comerciais (por exemplo, *Wave Dragon*, *PowerBuoy*, *Pelamis*, *Wave Roller*, *Archimedes Wave Swing*) são o resultado da colaboração entre a indústria e o setor acadêmico. No entanto, isso não garante o sucesso de um projeto específico, como a maioria dos GEOs relatando aspectos negativos e positivos.

A atratividade de um site (local ou ponto de instalação) específico depende de fatores como a altura e a direção da onda e também é restrita ao local em uma área protegida ou perto de rotas de transporte. Como os GEOs ainda estão em sua infância, uma solução prática é utilizar outros projetos marítimos (por exemplo, parques eólicos) para acelerar o desenvolvimento da indústria. No caso de um projeto de onda de

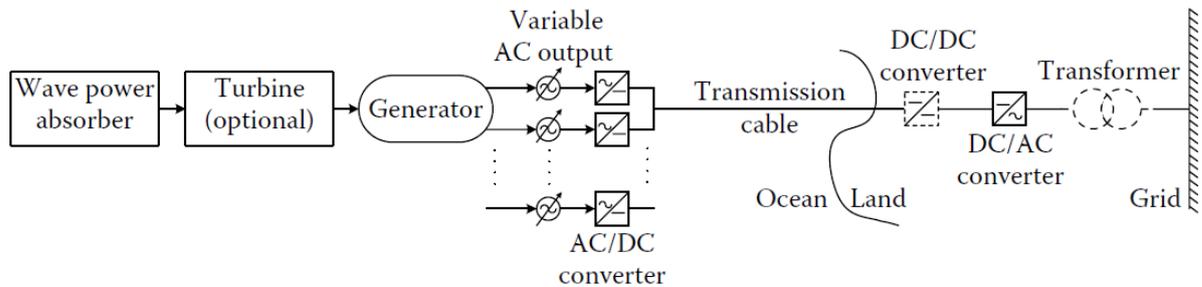
vento, isso pode compensar a variabilidade do vento, que é consideravelmente maior do que no caso das ondas e mais difícil de prever.

Para Khaligh; Onar (2010), um sistema típico de captação de energia das ondas oceânicas consiste em um absorvedor de energia das ondas, uma turbina, um gerador e interfaces eletrônicas de potência. O absorvedor captura a energia cinética das ondas do oceano. A energia cinética mecânica absorvida das ondas é transportada para turbinas ou o absorvedor aciona diretamente o gerador. A turbina é usada para acionar o eixo do gerador elétrico. As turbinas são geralmente usadas com sistemas que apresentam geradores rotacionais. Em outros métodos, é usado um gerador de movimento linear, que pode ser acionado diretamente pelo absorvedor de energia ou movimento do dispositivo. Os geradores linear e rotacional produzem tensão CA de frequência variável e amplitude variável. Essa tensão CA é retificada para a tensão CC, a fim de aproveitar as capacidades de transmissão de energia CC da água salgada do oceano. A transmissão CC em água salgada não requer um cabo adicional para a polaridade negativa. Assim, será mais econômico do que transmitir a energia em forma de CA, o que requer cabos trifásicos. O comprimento do cabo de transmissão varia de acordo com a localização da aplicação, que, em geral, é *nearshore* ou *offshore*. No entanto, os princípios são os mesmos para os dois tipos de aplicação. Depois que a energia CC é transmitida do oceano para a terra, um conversor CC/CC ou um transformador de nível de tensão é usado para a regulação da tensão. Dependendo do sistema de regulação de tensão utilizado, um inversor CC/CA é usado antes ou depois do regulador de tensão. A sincronização de tensão é fornecida pelo conversor e os terminais de saída do dele podem ser conectados à rede.

A FIGURA 17 mostra um diagrama no nível do sistema da coleta de energia das ondas oceânicas. Os dispositivos de GEO (incluindo o absorvedor, a turbina e o gerador) são interconectados em uma subestação *offshore*. A subestação consiste nos equipamentos de conexão e controladores para dispositivos individuais. As saídas dos geradores são conectadas à um barramento CC comum, usando conversores CC/CA para transformar a energia antes da transmissão para a costa. Uma linha de transmissão conecta esta subestação a uma unidade *onshore*. Um conversor *onshore* converte a tensão CC em uma tensão CA de 50 ou 60 Hz para conexão à rede. Um transformador opcional com comutador de derivação ou um conversor CC/CC

compensa as variações de tensão. Um grupo de GEO pode ser usado em uma estrutura do tipo “fazenda”, para aumentar a quantidade de energia capturada.

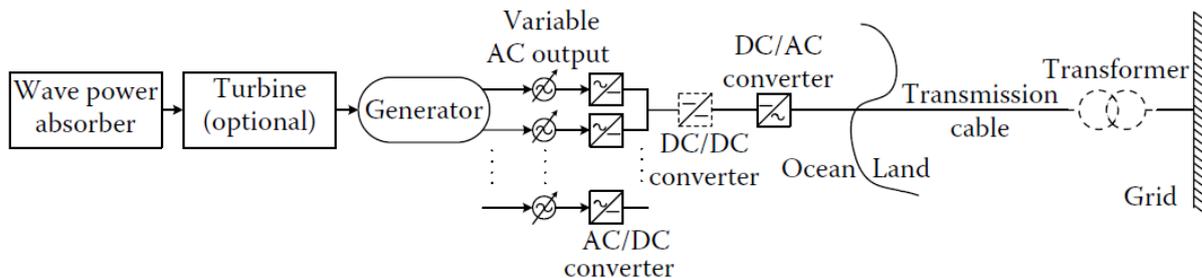
FIGURA 17 - DIAGRAMA ELÉTRICO DE UM SISTEMA DE CAPTURA DE ENERGIA DAS ONDAS OCEÂNICAS: CONVERSOR CC/CC ONSHORE



FONTE: Khaligh; Onar (2010).

Como alternativa, os conversores em terra podem ser movidos para a unidade *offshore*, de forma a superar as limitações de espaço disponível em terra. Os conversores podem ser colocados em uma plataforma ou enclausurados em um sistema flutuante ancorado ao fundo do mar. No entanto, isso adiciona um nível de complexidade ao sistema e pode exigir mais manutenção do que os conversores locais. A FIGURA 18 mostra um conversor CC/CC *onshore* movido para o mar.

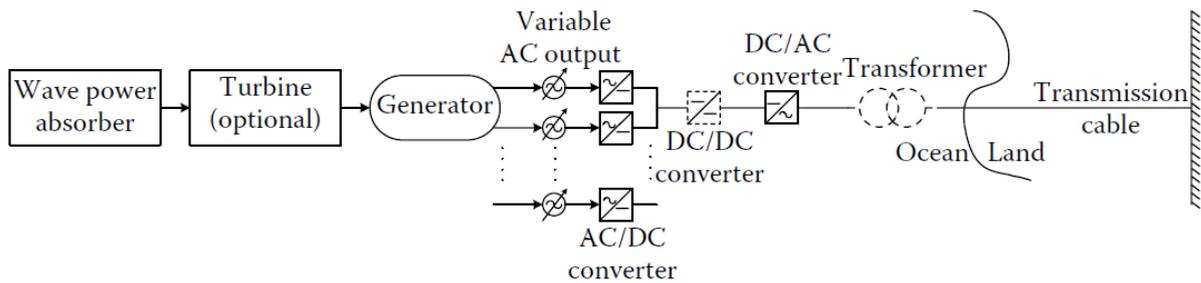
FIGURA 18 - DIAGRAMA ELÉTRICO DE UM SISTEMA DE CAPTURA DE ENERGIA DAS ONDAS OCEÂNICAS: CONVERSOR CC/CC OFFSHORE



FONTE: Khaligh; Onar (2010).

Outra opção é instalar um transformador *offshore*, como visto na FIGURA 19. Isso aumentaria a capacidade de transmissão de energia, uma vez que a transmissão de tensão mais alta resultaria em menos perdas de transmissão, pois para a mesmo nível de potência, a corrente será menor com um nível de tensão de transmissão mais alto. No entanto, esta alternativa não permite a transmissão CC.

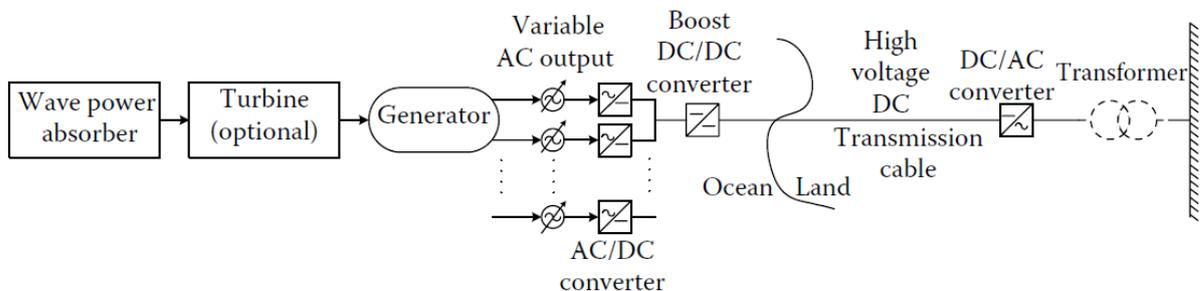
FIGURA 19 - DIAGRAMA ELÉTRICO DE UM SISTEMA DE CAPTURA DE ENERGIA DAS ONDAS OCEÂNICAS: TRANSFORMADOR OFFSHORE



FONTE: Khaligh; Onar (2010).

Como alternativa, um conversor CC/CC do tipo *boost* (eleva a tensão e diminui a corrente) podem ser instalados após o conversor CA/CC do gerador. Isso permite uma linha de transmissão CC de alta tensão, como ilustrado na FIGURA 20. Nesse caso, ambas as perdas de transmissão serão mantidas no mínimo e somente uma linha de transmissão CC sobre o oceano será necessária. A desvantagem dessa configuração é que mais componentes de energia serão usados com algumas perdas adicionais e custos adicionais serão necessários para instalar o conversor do tipo *boost*.

FIGURA 20 - DIAGRAMA ELÉTRICO DE UM SISTEMA DE CAPTURA DE ENERGIA DAS ONDAS OCEÂNICAS: LINHA DE TRANSMISSÃO CC EM ALTA TENSÃO



FONTE: Khaligh; Onar (2010).

2.5 TOPOLOGIAS DE SISTEMAS DE CONTROLE APLICÁVEIS À GERAÇÃO ONDOMOTRIZ

Conforme descrito por Aderinto; Li (2018), para a captura de energia de um GEO, análises numéricas e teóricas podem ser aplicadas para determinar a magnitude da energia capturada. A análise teórica básica tem limitações, pois as ondas reais são não-lineares e variam muito tanto temporal quanto espacialmente. Além disso, as perdas por viscosidade e vórtices não podem ser adequadamente

capturadas usando análise teórica. Apesar dessas limitações, a análise teórica básica constitui o primeiro passo a ser considerado ao projetar um GEO.

A maioria dos projetistas de GEO realizam o projeto e fabricação de modelos de laboratório em tanques de ondas após a determinação do conceito de captura da energia. Esses modelos em escala reduzida são testados em laboratórios para analisar seu desempenho. Após alguns testes bem-sucedidos, progredisse para testes de protótipos em grandes tanques de ondas. Na maioria dos casos de GEO, embora os testes em modelos reduzidos de laboratório apresentem uma boa visão do desempenho de um GEO, é improvável prever completamente o desempenho do GEO no ambiente oceânico.

A conversão da energia das ondas em energia útil é o principal objetivo do processo de conversão de energia das ondas. Grande parte do foco no projeto de um GEO é disponibilizar energia como energia elétrica para ser transferida para a rede elétrica. Existem alguns estudos em sistemas de pequena e média escala como sistemas independentes, em que a energia capturada é consumida no local ou muito perto do local de captura, com pouca ou nenhuma necessidade de extensos sistemas de armazenamento e transmissão. Existem muitas tecnologias diferentes para conversão de energia das ondas, a escolha da tomada de força também é diversa. No entanto, alguns sistemas de tomada de força são padrão e os outros geralmente são modificações e atualizações dos sistemas padrão.

O OWC é uma das mais antigas tecnologias de captura de ondas, e o primeiro conjunto de GEOs foi projetado com base nessa tecnologia. O principal desafio da OWC foi que o fluxo de ar devido à coluna de água oscilante causada pela ação das ondas era de natureza recíproca. Este problema foi resolvido com a invenção da turbina Wells. A turbina Wells é uma turbina de fluxo axial que pode se auto-retificar. Portanto, o torque da turbina não é afetado pela direção do fluxo de ar. Desde a primeira invenção e implantação da turbina Wells, diferentes atualizações e modificações foram realizadas para melhorar sua eficiência. A maioria dos OWC utilizam a turbina Wells porque a relação entre o fluxo de ar e a velocidade nas pás é alta, enquanto o pico de eficiência é, consideravelmente, alto e o custo de fabricação baixo. Algumas das desvantagens da turbina Wells incluem:

- O torque pode ser muito baixo quando o fluxo de ar é baixo;
- Seus tamanhos são relativamente grandes quando comparados a outras turbinas com potências semelhantes;

- São suscetíveis ao ruído aerodinâmico.

Outras turbinas com funcionamento semelhante à da turbina Wells são a turbina de impulso auto retificadora e a turbina Dennis-Auld.

As turbinas hidráulicas usadas nos dispositivos do tipo *overtopping* são semelhantes às usadas na hidrelétrica de baixa queda, pois seus modos de operação são muito semelhantes. A turbina de impulso Pelton é adequada para uso em dispositivos por corpos oscilantes e dispositivos *overtopping*, porque eles podem usar a água como uma alternativa aos motores hidráulicos.

A maioria dos sistemas de conversão de corpos oscilantes utiliza o óleo hidráulico. Eles também têm acumuladores de gás que podem armazenar energia por algum tempo. Este tipo de sistema foi utilizado no Pelamis. Para Liu et al. (2016), outro método para converter a energia das ondas transmitida por dispositivos flutuantes é empregar um sistema de pressão hidráulica (HPS). Um HPS pode se adaptar melhor ao movimento lento dos GEOs e suavizar as flutuações irregulares na energia de ondas aleatórias usando um acumulador de óleo ou gás. Portanto, os HPS foram aplicados em diferentes tipos de GEOs, como Pelamis, Pendulum, Wavestar. A viabilidade e confiabilidade dos HPSs e acumuladores foram comprovadas por meio de experimentos internos e testes reais no mar. Os movimentos dos corpos oscilantes de um GEO são fortemente afetados pela variação na pressão do HPS. As interações entre os corpos acionados por ondas e os módulos de tomada de força (PTO) do HPS têm efeitos significativos na eficiência de conversão de energia do GEO.

Outro tipo de tomada de força é o gerador elétrico linear. Este método converte a energia das ondas mecânicas diretamente em energia elétrica, de modo que a perda de energia devido ao atrito das peças móveis é bastante reduzida. Este método foi usado principalmente em sistemas de corpos oscilantes. A desvantagem deste método é que o requisito do uso de ímãs pesados causa aumento na massa de todo o sistema e redução na eficiência devido à baixa velocidade das oscilações das ondas. Com o aumento da popularidade dos sistemas de corpos oscilantes, o uso de gerador linear foi proposto para a tomada de força de novos projetos GEO.

Conforme apresentado por Aderinto; Li (2018), existem estudos em andamento para projetar novos sistemas de GEO, melhorar os sistemas existentes de tomada de força e, também, para desenvolver sistemas híbridos aos métodos já existentes.

A forma de energia desejada, principalmente, pelo processo de conversão de energia das ondas é a eletricidade. Ao conectar à rede elétrica, os requisitos e regulamentos podem variar de país para país e até mesmo em casos sub-regionais. Os sistemas GEO precisam ser modificados para atender a esses requisitos. Como a energia de outras fontes de geração distribuída, os sistemas de conversão de energia das ondas produzem energia de maneira irregular e intermitente e precisam passar por algum condicionamento antes de serem alimentados na rede elétrica. De acordo com Liu et al. (2016), existem três requisitos principais para um sistema GEO confiável:

- Um bom sistema de tomada de força para converter energia mecânica em eletricidade;
- Regularização da eletricidade instável para atender aos requisitos da rede ou à carga elétrica, caso seja fornecida a um sistema autônomo;
- A eletrônica de potência para garantir a qualidade da energia no final do usuário.

Neste trabalho, serão avaliados sistemas com geração de energia através de sistemas flutuantes conectados à uma rede de pressão hidráulica. Um exemplo deste tipo de dispositivo é o Wave Star.

Wave Star é um dispositivo desenvolvido pela Wave Star Energy Company. O Wave Star é fundamentalmente diferente de muitos outros dispositivos GEO. Em vez de formar uma barreira contra as ondas, as ondas são capturadas com um ângulo de movimentação ideal de um dispositivo flutuante. Dessa forma, a energia das ondas pode ser capturada continuamente pelas ondas que passam pelo comprimento da máquina. A Wave Star Energy está atualmente desenvolvendo a primeira produção em série de um conversor de energia das ondas de 500 kW. Desde julho de 2006, um sistema de pequena escala conectado à rede está em operação contínua. Durante as temporadas de inverno de 2006 a 2008, ocorreram 12 grandes tempestades sem causar nenhum dano ao sistema.

Existem 20 flutuadores em forma de semiesfera que estão parcialmente submersos na água ao longo de cada lado do dispositivo mostrado na FIGURA 21. O Wave Star é chamado de absorvedor multiponto, o que significa que vários absorvedores flutuantes se movem para cima e para baixo por uma onda iminente. Em uma breve descrição, esses movimentos ativam as bombas, que pressionam o fluido hidráulico no sistema de transmissão comum e acionam um motor hidráulico.

FIGURA 21 - WAVE STAR, UM SISTEMA ABSORVEDOR DE MÚLTIPLOS PONTOS



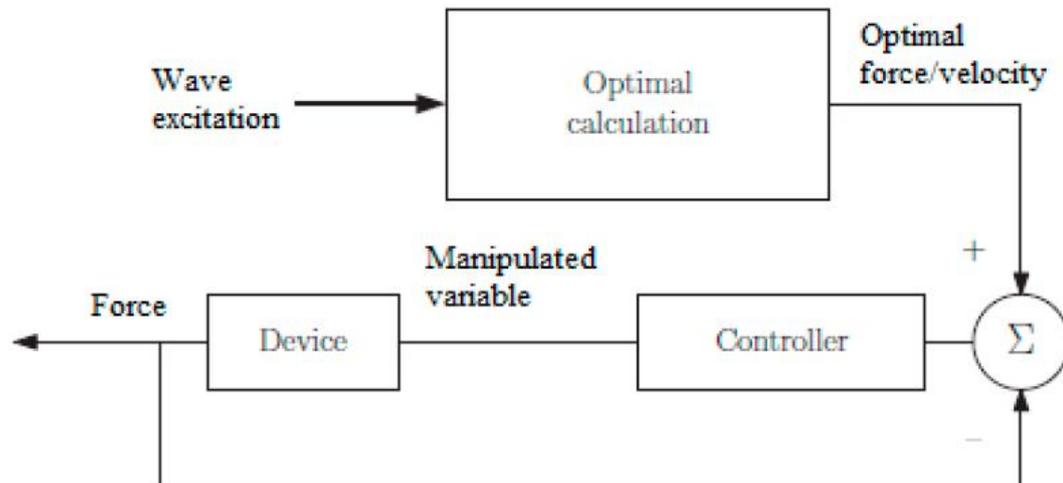
FONTE: Khaligh; Onar (2010).

Quando uma onda entra, os absorvedores flutuantes em um lado da Wave Star são levantados. Conseqüentemente, os absorvedores flutuantes do outro lado serão levantados, até a onda diminuir. Existem cilindros hidráulicos individuais para cada absorvedor flutuante. O pistão aplica pressão no fluido hidráulico, dentro do sistema de transmissão comum do dispositivo, quando um absorvedor é levantado. Essa pressão aciona um motor hidráulico. Este motor hidráulico aciona um gerador que produz energia elétrica. Como o dispositivo possui vários comprimentos de onda, o sistema operará continuamente para coletar energia.

2.5.1 Estratégias de controle

Para Maria-Arenas et al. (2019), o problema de controle para o setor de energia das ondas não se encaixa na descrição clássica de um controlador que envolvem o uso de realimentação (*open loop*, *closed loop* e *set-point tracking*) e uma maneira de forçar as variáveis do sistema para um valor constante. Em vez disso, o controle do GEO visa à maximização da energia capturada enquanto se baseia no controle de avanço para gerar velocidade ideal do dispositivo ou pontos de ajuste de força de um PTO. Como pode ser observado na FIGURA 22, a variável manipulada depende do PTO e suas variáveis: válvulas de desvio, sensor de inclinação, corrente de excitação ou ângulo de condução. Para tanto, a determinação da força e velocidade ideais são essenciais como ponto de ajuste do controle de avanço do PTO.

FIGURA 22 - ESTRUTURA GERAL DE UM SISTEMA DE CONTROLE



FONTE: Maria-Arenas et al. (2019).

O cálculo ótimo envolve a função de desempenho na forma:

$$P = \int_0^T v(t) f_{PTO}(t) dt \quad \text{Equação 2}$$

onde $v(t)$ é a velocidade do dispositivo e $f_{PTO}(t)$ é a força exercida pela PTO e P representa a potência incidente ou, mais precisamente, a potência transportada por unidade de tempo, dada em $[W = J/s]$.

Uma primeira abordagem qualitativa para entender como maximizar a potência absorvida é o conceito de ressonância. Um sistema que está sendo excitado em sua frequência natural é descrito como ressonante. Ao operar em ressonância, a resposta em amplitude é maior. A ressonância geralmente não ocorre naturalmente para conversores de energia das ondas que têm uma frequência natural mais alta do que os componentes de frequência ricos em energia de um espectro de ondas típico; portanto, deve-se induzir o sistema a ressonância, ajustando o amortecimento e a rigidez da PTO, conforme necessário, resolvendo o problema de correspondência de impedâncias.

2.5.1.1 Modelamento numérico

Para qualquer GEO, a força inercial é equilibrada por todas as forças que atuam no GEO. Essas forças são geralmente divididas em cargas externas, interação

GEO-onda (força hidrostática, carga de excitação e força de radiação) e forças de reação (causadas por PTO, amarração ou mecanismo de parada final). A interação entre GEOs (isto é, flutuador) e as ondas do oceano é um processo não linear de alta ordem que pode ser simplificado para equações lineares para ondas e movimentos de oscilação do dispositivo de pequena amplitude, o que é aceitável em todo o regime operacional do dispositivo. Isso significa que o princípio de superposição se aplica.

O sistema de tomada de força resulta em um comportamento dinâmico não linear complexo. Para manter o princípio de superposição válido, as forças do PTO devem ser linearizadas. Nesta forma linear, a força do PTO é composta por duas contribuições: uma força proporcional à velocidade (amortecedor) e uma força proporcional ao deslocamento (mola). Os sistemas de amarração são frequentemente representados por uma função linear do deslocamento do captador e da rigidez da mola de amarração. O mecanismo de parada final e outras restrições (limites operacionais de velocidade ou força da PTO) são forças não lineares abruptas que geralmente não são consideradas, dada a complexidade de uma abordagem não linear para a conversão de energia das ondas. Em vez disso, o método ideal para obter uma amplitude de deslocamento aceitável é aumentar o amortecimento do PTO até que o corpo tenha o deslocamento máximo permitido.

Folley et al. (2016), obtém a potência absorvida média assumindo linearidade e ondas senoidais para um conversor de energia de onda de movimento de elevação como:

$$P_a = \frac{1}{2} \frac{B_{PTO} \omega^2 |\hat{F}_e|^2}{[-\omega^2(m + A) + G + K_{pto} + K_m]^2 - \omega^2(R + B_{pto})^2}$$

$$= \frac{1}{2} \frac{B_{PTO} \omega^2 |\hat{F}_e|^2}{|Z_i + Z_{pto}|^2}$$

Equação
3

onde ω é a frequência da onda, \hat{F}_e é a força de excitação, m é a inércia total do captador, A é massa adicionada, G é a rigidez hidrostática da mola, K_{pto} é o coeficiente elástico do PTO, K_m é a rigidez do sistema de amarração, R é o amortecimento da radiação, B_{pto} é o amortecimento do PTO, Z_i é a impedância intrínseca e Z_{pto} é a impedância do PTO.

Proposta por Falnes (2004), uma formulação alternativa, porém, equivalente, considera o modelo de força para velocidade de um GEO no domínio da frequência como,

$$\frac{V(\omega)}{F_{ex}(\omega) + F_u(\omega)} = \frac{1}{Z_i(\omega)} \quad \text{Equação 4}$$

onde $V(\omega)$, $F_{ex}(\omega)$ e $F_u(\omega)$ representam a transformada de Fourier da velocidade $v(t)$, força de excitação $f_{ex}(t)$ e força de controle $f_{pto}(t)$, respectivamente. $Z_i(\omega)$ é a impedância intrínseca no domínio da frequência do sistema, conforme

$$Z_i(\omega) = B_r(\omega) + \omega \left[M + M_a(\omega) - \frac{K_b}{\omega^2} \right] \quad \text{Equação 5}$$

onde $B_r(\omega)$ é o amortecimento da radiação (real e par) e $M_a(\omega)$ é a massa adicionada dependente da frequência, frequentemente substituída por sua assíntota de alta frequência m_∞ .

O modelo da Equação 5 permite a derivação de condições para ótima absorção de energia, assumindo uma abordagem linear, e o design intuitivo do controlador de maximização de energia no domínio da frequência, como

$$Z_{PTO}(\omega) = Z_i^*(\omega) \quad \text{Equação 6}$$

A escolha do Z_{PTO} como apresentado na Equação 6 é denominada controle conjugado ótimo, reativo ou complexo, que é a solução para o chamado problema de correspondência de impedância. Tecnicamente, o controle reativo refere-se apenas ao fato de que a reatância do PTO deve cancelar a reatância inerente. No entanto, a resistência do PTO e a resistência hidrodinâmica também devem ser iguais. Assim, o controle complexo-conjugado é uma descrição mais precisa, pois se refere ao fato de que a impedância ótima da PTO é igual ao conjugado complexo da impedância intrínseca.

O resultado alcançado na Equação 6 tem várias implicações relevantes:

- O resultado depende da frequência, implicando uma grande dificuldade de otimização para mares irregulares contendo uma mistura de frequências;

- Pode ser necessário conhecimento futuro da força de excitação. Embora esse conhecimento seja direto para ondas regulares, é mais complexo para mares irregulares;
- Como força e velocidade podem ter sinais opostos, o PTO pode precisar fornecer energia para algumas partes do ciclo sinusoidal;
- O controle ótimo não leva em consideração restrições; é mais do que provável que um sistema real tenha restrições de velocidade e deslocamento.

No entanto, fornecer um controle ótimo pode ser inviável devido aos movimentos e cargas excessivos associados em ondas extremas. Portanto, foram implementados esquemas alternativos de controle subótimo, que incluem restrições físicas nos movimentos, forças e classificação de potência do dispositivo. Embora muitas discussões e abordagens diferentes possam ser encontradas nos últimos anos para soluções de controle subótimas, classificamos a maioria delas de acordo com a nomenclatura mais comumente exibida - controle de amortecimento, reativo, travamento e modelo de previsão.

2.5.1.2 Controle de amortecimento

Uma abordagem amplamente estudada para evitar dificuldades na implementação do controle de realimentação dos GEOs é conhecida na literatura como amortecimento linear do PTO, também chamada de carga passiva ou resistiva, uma abordagem subótima em que o valor instantâneo da força do PTO é linearmente proporcional à velocidade do corpo oscilante, ou seja:

$$f_{pto}(t) = -B_{pto}v(t) \quad \text{Equação 7}$$

onde B_{pto} é o amortecimento do PTO, ($B_{pto} > 0$). Essa metodologia não requer uma previsão da força de excitação, tornando-a uma estratégia simples de implementar. De fato, é o que geralmente é encontrado nos modelos de demonstração ou dispositivos pré-comerciais atualmente implantados em todo o mundo. Convencionalmente, requer apenas conhecer o valor instantâneo da velocidade do

PTO, para a qual os instrumentos de medição geralmente estão disponíveis no mercado.

O controle de amortecimento, no entanto, fornece uma quantidade muito menor de energia absorvida quando comparado a outras estratégias, como o controle reativo (*reactive control*), e a relação linear entre a velocidade e a força do PTO, quando é uma relação direta, pode não ser fácil de implementar sem usar nenhum controle de realimentação. Além disso, o valor ideal do amortecimento do PTO, que é o valor de B_{pto} que maximiza a potência instantânea absorvida, pode ser facilmente calculado para ondas regulares. No entanto, na prática, onde a onda incidente é irregular (definida pelo espectro da onda), o B_{pto} é mais difícil de calcular devido às alterações nos componentes espectrais da onda incidente que não são constantes ao longo do tempo, portanto, um controle com realimentação em tempo real é necessário para um valor de amortecimento variável no tempo.

Portanto, podemos distinguir entre um controle de amortecimento variável em tempo real e um controle de amortecimento constante (ou passivo). O controle GEO de primeira geração é baseado em estratégias de amortecimento com valores constantes para o B_{pto} . Essa estratégia, em particular, ainda é muito comum nos protótipos recentes do GEO pelos desenvolvedores de tecnologia (dada a simplicidade da implementação).

2.5.1.3 Controle reativo

O controle reativo é frequentemente enganoso na literatura e pode ser confundido com o controle complexo conjugado. Essas estratégias de controle geralmente envolvem o ajuste da resistência e reatância do PTO (B_{pto} e K_{pto}), levando em consideração restrições como a classificação de potência do PTO ou os limites de deslocamento, ajustando a resistência do PTO para evitar abordagens não lineares. Portanto, é necessário considerar uma abordagem genérica para uma caracterização do PTO:

$$f_{pto}(t) = -B_{pto}v(t) - K_{pto}x(t)$$

Equação
8

onde K_{pto} é o coeficiente de rigidez e $x(t)$ é o deslocamento sobre o PTO. Esse tipo de controle, quando implementado em protótipos de demonstração, geralmente emprega uma abordagem tabular para aliviar as restrições computacionais necessárias para calcular valores ótimos em tempo real. Portanto, valores abaixo do ideal para coeficientes de amortecimento e rigidez são pré-calculados com um algoritmo de otimização a ser armazenado em tabelas. Por esse motivo, essa técnica específica é propensa a erros de modelagem que exigem uma nova análise dos valores constantes após um determinado período de teste.

Os requisitos de armazenamento de energia para a potência reativa são analisados por Korde (2015), com base em uma abordagem no domínio do tempo. Esses sistemas de armazenamento facilitam a troca de energia reativa e podem ajudar a diminuir as perdas associadas, sendo um elemento crítico do sistema para maximizar a absorção de energia.

O desempenho de um absorvedor de ponto de sustentação flutuante foi analisado por Jin et al. (2019). O objetivo é maximizar a absorção de energia das ondas, controlando ativamente os parâmetros de amortecimento e rigidez com base em um modelo linear no domínio da frequência. O estudo termina com uma comparação dos resultados com estudos validados de maneira semelhante.

Metodologias de aprendizado por reforço foram apresentadas por Anderlini et al. (2017). Calculando as variáveis de controle reativas ideais por meio de um algoritmo de aprendizado Q (*Q-learning*), o modelo é capaz de maximizar a energia absorvida para cada estado do mar.

2.5.1.4 Controle do tipo travamento/destravamento

Segundo Maria-Arenas et al. (2019), este tipo de controle foi sugerido pela primeira vez em 1977. O controle de travamento é baseado na obtenção da ressonância do GEO através de um sistema de fixação, fixando o dispositivo durante uma certa parte do ciclo de oscilação das ondas, conforme descrito por Babarit et al. (2004). Quando o dispositivo é liberado, o controle do dispositivo geralmente é governado por um amortecimento linear, como descrito no capítulo 2.5.1.2. Dessa forma, o dispositivo apresenta operação de ressonância sem necessidade de controle de potência reativa. No entanto, é necessário extrair energia de uma fonte externa para ativar o sistema de fixação quando a velocidade do dispositivo for nula. O ponto

crítico para essa estratégia de controle é o cálculo dos períodos de travamento e destravamento. O controle de travamento evita a transferência de energia bidirecional e a dissipação de energia associada que caracterizam o controle reativo; portanto, um espectro mais amplo de sistemas do PTO que operam apenas no modo gerador pode ser usado sob essa estratégia de controle.

Conforme apresentado por Wu et al. (2018), a estratégia de controle de amortecimento passivo foi tomada como cenário base de estudo, desta forma, foi quantificada a melhoria de desempenho ao aplicar a estratégia de controle de travamento. Os resultados mostram que a largura de captura aumenta em 70 % e o coeficiente de amortecimento ideal diminui em 60 %.

Uma abordagem econômica foi feita com diferentes estratégias de controle de travamento avaliadas para o GEO em Temiz et al. (2018), incluindo uma comparação interessante com o controle de amortecimento passivo. Os resultados são baseados no desempenho simulado do GEO usando ondas monocromáticas regulares, revelando produção anual de energia semelhante para amortecimento constante quando comparada com travamento subótimo, 201 e 197 MWh/ano, respectivamente. O travamento ideal mostra os melhores resultados com um aumento de 45 % sobre a produção anual de energia, 286 MWh/ano.

2.5.1.5 Controle de modelo preditivo

Conforme apresentado por Faedo et al. (2017), devido à sua capacidade de lidar com modelos lineares e não lineares, juntamente com as restrições do sistema e a avaliação em tempo real do comportamento futuro, o modelo de controle preditivo (MPC) é uma estratégia amplamente utilizada e analisada na indústria, e não será diferente para os GEOs. As soluções MPC podem lidar com as restrições físicas presentes em qualquer tecnologia GEO e na solução de controle ideal não causal.

No entanto, o problema de maximizar a energia do GEO requer uma modificação importante em relação à abordagem regular na função objetivo do MPC, resultando em um problema de otimização potencialmente não convexo. Dados os benefícios e a crescente compreensão desses algoritmos, essa estratégia se tornou o tópico de pesquisa de controle mais comum nos últimos anos. O MPC maximiza a absorção de energia, aplicando a cada passo a força ideal para obter ressonância em um horizonte de tempo futuro, como definido inicialmente por Hals et al. (2011).

O'Sullivan; Lightbody (2017) apresenta resultados de uma comparação entre o controle MPC e os métodos clássicos (controle complexo conjugado) para um PTO linear de ímãs permanentes (LPMG) controlado por um atuador lado a lado da máquina. Conclui-se que o controle complexo conjugado, quando aplicado a soluções do mundo real, mostra-se ineficiente para maximizar a absorção de energia das ondas do oceano.

Apresentada como uma melhoria no controle reativo, uma estratégia preditiva é analisada por Anderlini et al. (2017), onde uma rede neural treinada com aprendizado de máquina é usada para prever ondas futuras (altura e período), afetando o GEO e otimizando em tempo real os parâmetros relevantes para a absorção de energia das ondas (coeficiente de rigidez do PTO e coeficiente de amortecimento do PTO). O algoritmo não apresenta melhorias em relação às soluções de controle reativo semelhantes de última geração em relação à potência absorvida, mas soluciona imprecisões de controle associadas da calibração em laboratório e permite que o controlador seja adaptável às variações na resposta da máquina causadas por envelhecimento.

De maneira semelhante Li et al. (2018), para um absorvedor de pontos, uma rede neural foi empregada para prever a altura e o período das ondas de curto prazo para implementar o controle de travamento adaptativo em tempo real. Este trabalho apresenta alguns resultados comparando as diferenças de potência absorvida para um cenário de onda específico com e sem controle.

Uma solução inovadora de MPC é proposta por Jama et al. (2018). Nomeado como modelo de controle preditivo robusto (R-MPC), ele combina um controlador preditivo considerando as restrições do PTO, garantindo a máxima absorção de energia enquanto é realista e um modelo inovador para resolver algumas incertezas paramétricas e incompatibilidades de modelo.

Uma abordagem interessante para estratégias de controle para GEOs de 3 graus de liberdade é apresentada por Zou et al. (2017), comparada com os GEOs clássicos de somente elevação. Apresentando um MPC paramétrico, ele otimiza independentemente inclinação e o movimento de elevação. Algoritmos numéricos são empregados para encontrar as melhores condições e resultados. Neste trabalho, vários testes numéricos são realizados para ondas regulares e irregulares. Os resultados apresentados revelam uma grande melhoria na energia absorvida em relação aos GEOs somente de elevação. Contrariamente a esses resultados, Korde

et al. (2017) afirma que o controle quase ótimo para movimentos de inclinação não é significativo para a absorção de energia das ondas quando comparado ao movimento de elevação, que é apresentado como o principal contribuinte para a absorção de energia.

Uma estratégia de MPC híbrida é apresentada por Xiong et al. (2018), restrições são aplicadas ao amortecimento do PTO e força de amortecimento para um GEO de dois corpos. Um problema de programação quadrática de número inteiro (MIQP) é proposto para obter a máxima absorção de energia. Os resultados desse problema são comparados com outras soluções de MPC e modelos clássicos para um cenário de ondas irregulares.

A previsão de frequência de ondas futuras é apresentada por Burgaç; Yavuz (2019) através da utilização de um controlador com lógica Fuzzy para determinar os coeficientes ideais de amortecimento e rigidez do PTO em tempo real. A solução proposta combina algumas técnicas regulares de ajuste com uma metodologia inovadora de ajuste lento.

Fadiga, confiabilidade e capacidade de sobrevivência controladas pelo MPC são analisadas por Nielsen et al. (2017). Os resultados mostram uma troca entre energia elétrica maximizada e as dimensões necessárias para o GEO resistir a grandes cargas e períodos de fadiga. Esses resultados também são comparados com o controle reativo convencional, onde o MPC melhora a produção média anual de energia em 29%.

2.5.1.6 Outros tipos de controle

Neste capítulo são apresentadas estratégias de controle mistas ou inovadoras que não se encaixam claramente em nenhuma das categorias apresentadas anteriormente.

Abdelkhalik; Darani (2018) utiliza um algoritmo genético para otimizar séries de potência truncadas juntamente com a geometria para GEOs não lineares. Isto permite uma maior captação de energia sem grandes movimentos e menor dependência da energia reativa como resultado.

A denominada estimativa de parâmetros adaptativos (APE) é proposta por Zhan et al. (2018). O algoritmo atualiza em tempo real vários parâmetros do modelo GEO, como os coeficientes da força de radiação e excitação, combinando os

benefícios associados ao controle ideal (saída máxima de energia) e ao APE que lida com qualquer variação de parâmetro do modelo.

Senol; Raessi (2019) apresenta uma nova técnica de tomada de força para GEOs de oscilação de onda. A principal inovação é evitar qualquer tipo de sistema de freio, mantendo a amplitude dentro da faixa especificada. Em seguida, os resultados são comparados com o controle constante de amortecimento, mostrando os benefícios do novo sistema de controle proposto.

Um novo controlador, que é uma variação do conjugado complexo, através da correspondência de impedâncias no domínio do tempo é proposto por Song et al. (2016) e por Lekube et al. (2017). O principal benefício para o controle proposto reside no fato de não precisar de previsão ou medição de onda. A novidade apresentada é uma estratégia de realimentação com uma estratégia de gerador de ressonância múltipla, decompondo o problema de controle em vários subproblemas com controladores independentes de frequência única. A solução é baseada na decomposição espectral do sinal de medição que é empregado para construir a solução ideal.

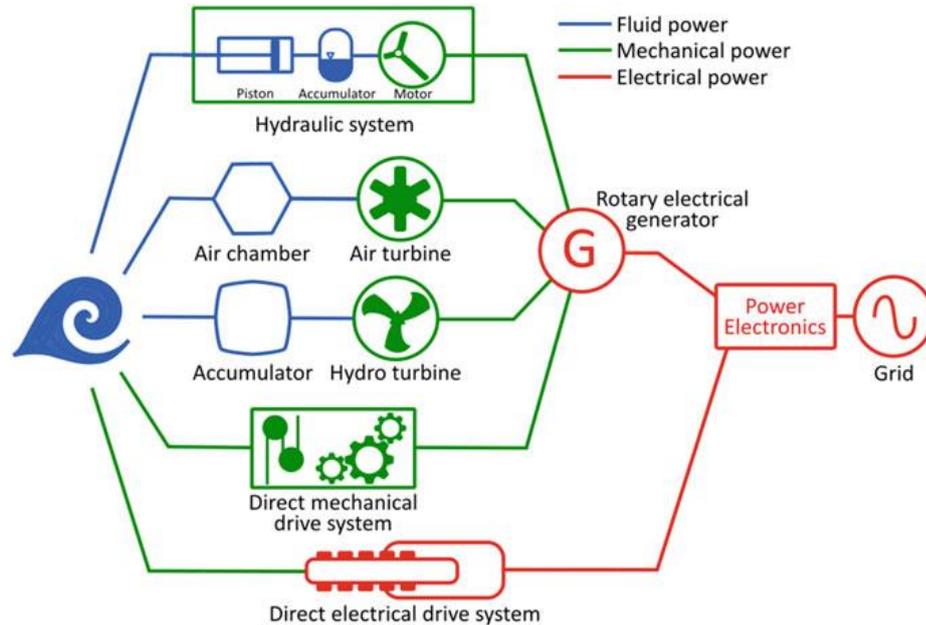
O controle estocástico derivado do controle ideal para absorvedores de pontos somente de elevação, considerando restrições de força, é analisado por Sun; Nielsen (2019). Os resultados indicam desempenho próximo do ótimo em termos de potência absorvida média.

Han et al. (2019) apresenta uma solução de corte transversal para um catamarã de cabine suspensa com um sistema de controle de movimento. O principal objetivo foi minimizar a velocidade de elevação na cabine, mas um resultado secundário medido de interesse para esta revisão é a absorção de energia das ondas que podem ser usadas como vetor de energia para diferentes aplicações, como alimentação de sistemas auxiliares ou direção dos principais motores.

2.6 PTO BASEADO EM SISTEMA HIDRÁULICO MULTICORPOS

Conforme apresentado por Pecher et al. (2017), existem diversos tipos de PTO aplicáveis à GEO. Uma comparação sistemática dos diferentes tipos de PTO é uma tarefa difícil de se realizar, pois possuem características diferentes de operação e aplicação. A FIGURA 23 apresenta um diagrama destes diferentes caminhos para a GEO.

FIGURA 23 – DIAGRAMA COM DIFERENTES CAMINHOS CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS EM ELETRICIDADE

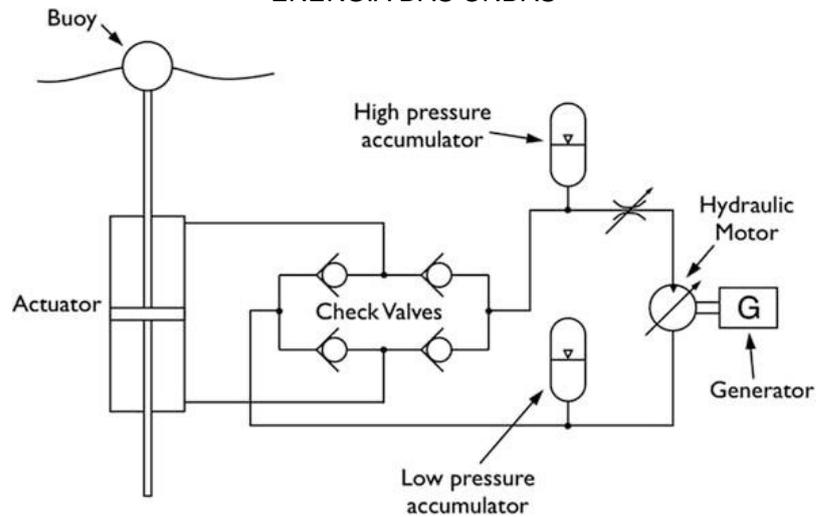


FONTE: Pecher et al. (2017).

Quando o mecanismo de captura de energia é baseado no movimento de um corpo em resposta à interação com as ondas, como é o caso de alguns absorvedores de pontos e atenuadores, as máquinas elétricas rotativas convencionais não são diretamente compatíveis. O conversor hidráulico é frequentemente a solução escolhida para fazer a interface do conversor de energia das ondas com o gerador elétrico, uma vez que eles são adequados para absorver energia ao lidar com grandes forças em baixas frequências. Nesse caso em particular, o caminho da energia geralmente é revertido em relação ao sistema hidráulico tradicional. O movimento do corpo está alimentando energia em um motor hidráulico, que por sua vez traduz a energia em um gerador elétrico.

Um esquema de um PTO hidráulico para conversão de energia das ondas é apresentado na FIGURA 24. Um absorvedor de pontos (boia) conectado a um cilindro hidráulico se move para cima e para baixo em relação a um atuador, forçando o fluido através de válvulas hidráulicas direcionando esta energia à um motor hidráulico, que por sua vez aciona o gerador elétrico. Os acumuladores também são adicionados ao sistema para facilitar o fornecimento de fluido de alta pressão no sistema, fornecendo ou acumulando energia hidráulica quando necessário. Para a conversão de energia das ondas, o motor de pistão radial é frequentemente preferido, pois é adequado para cargas elevadas e aplicações de baixa velocidade.

FIGURA 24 – EXEMPLO DE UM SISTEMA DE UM PTO HIDRÁULICO PARA CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS

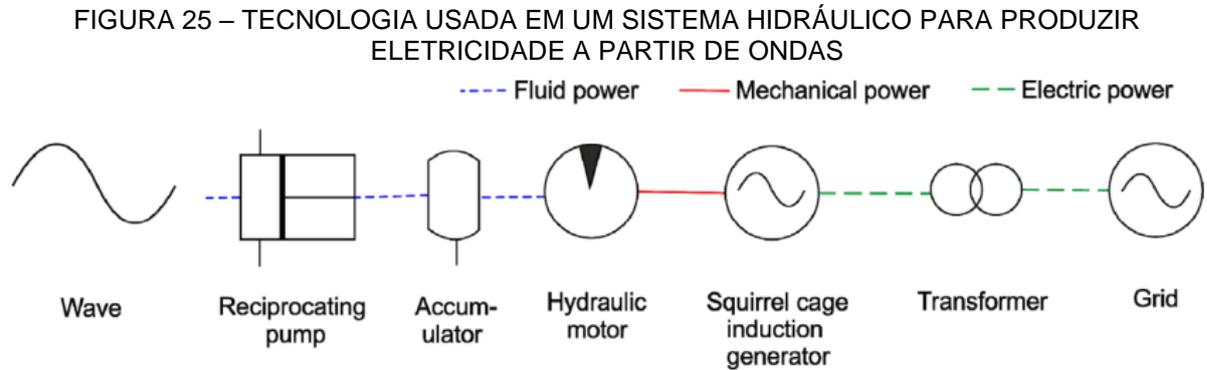


FONTE: Pecher et al. (2017).

Muitos problemas surgem ao escolher um sistema de PTO hidráulico para conversão de energia das ondas. A contenção de fluidos do sistema hidráulico deve ser tratada com relação ao desempenho e aos impactos ambientais. O uso de óleo de transformador biodegradável tem sido utilizado para abordar a questão ambiental. A eficiência de todo o sistema também é importante. Devido à variabilidade do recurso energético, os sistemas hidráulicos geralmente incluem vários acumuladores de gás hidráulico que podem armazenar as cargas de pico absorvidas e suavizar a conversão de energia das ondas do motor. Motores de deslocamento digital, baseados em motor de pistão radial, foram desenvolvidos para aumentar a eficiência de carga parcial do motor hidráulico e facilitar sua controlabilidade. Os sistemas hidráulicos são compostos por várias partes móveis e as vedações do pistão se desgastam com o tempo, o que pode aumentar drasticamente o custo de manutenção. Isso deve ser lembrado ao projetar um PTO hidráulico. Outra questão a ser abordada é a proteção do PTO em caso de condições extremas, nas quais o atuador hidráulico excede o curso de projeto e danifica o sistema. Uma solução é incluir o limite mecânico ao curso ou usar o pistão hidráulico radial.

Para Hong et al. (2014), os sistemas hidráulicos são sistemas eficientes de conversão de energia que consistem em duas etapas de conversão de energia. A primeira etapa é que a energia mecânica das ondas é absorvida por um corpo flutuante e convertida em energia hidráulica através de uma unidade de compressão, que funciona de forma síncrona com o movimento do corpo flutuante. Na segunda etapa, o gerador ou motor produz energia elétrica em relação à diferença de pressão

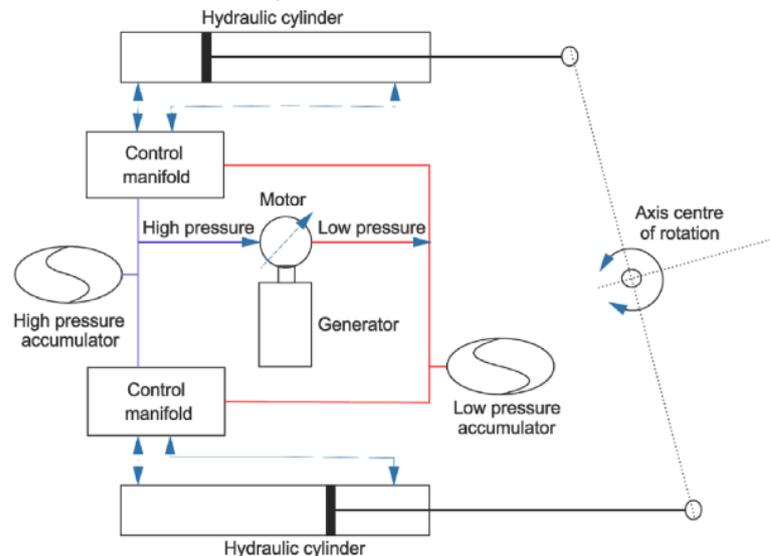
resultante da unidade de compressão. Um sistema hidráulico básico é apresentado na FIGURA 25.



FONTE: Hong et al. (2014).

Os componentes de uma unidade de compressão básica incluem um cilindro hidráulico, dois acumuladores de pressão e um sistema de controle de válvula, conforme apresentado na FIGURA 26. O cilindro hidráulico é usado para transferir o movimento do corpo flutuante para o pistão de ação dupla de ligação direta no cilindro. Duas câmaras são conectadas, respectivamente, a um acumulador de alta pressão e a um acumulador de baixa pressão, e o movimento do cilindro leva a uma diferença de pressão variada que resulta em um torque no gerador/motor. Como a saída de energia é instável e a perda de energia são devidas à existência de ondas irregulares, a técnica de controle de válvula é usada para suavizar significativamente a energia e para se obter armazenamento de energia, de forma a melhorar sua eficiência.

FIGURA 26 – SISTEMA ESQUEMÁTICO SIMPLIFICADO DO GEO PELAMIS



FONTE: Hong et al. (2014).

Neste contexto, Faedo et al. (2017) e Falcão (2010) apresentam sistemas articulados multicorpos, ou seja, que se utilizam de diversos PTOs hidráulicos para a GEO. Modelos destes tipos de dispositivos são apresentados na FIGURA 27 e na FIGURA 28.

FIGURA 27 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UM DISPOSITIVO DE ARTICULAÇÃO MULTICORPOS

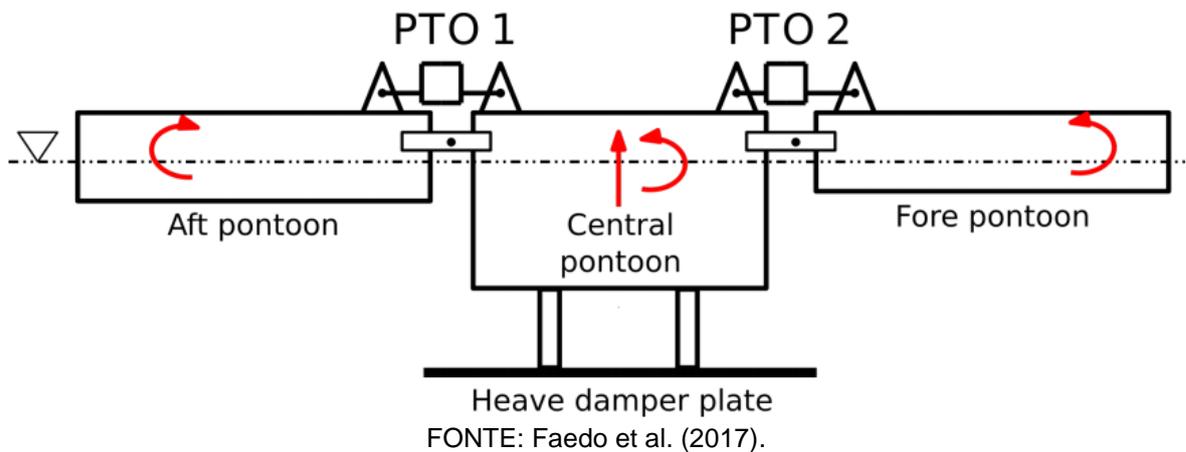
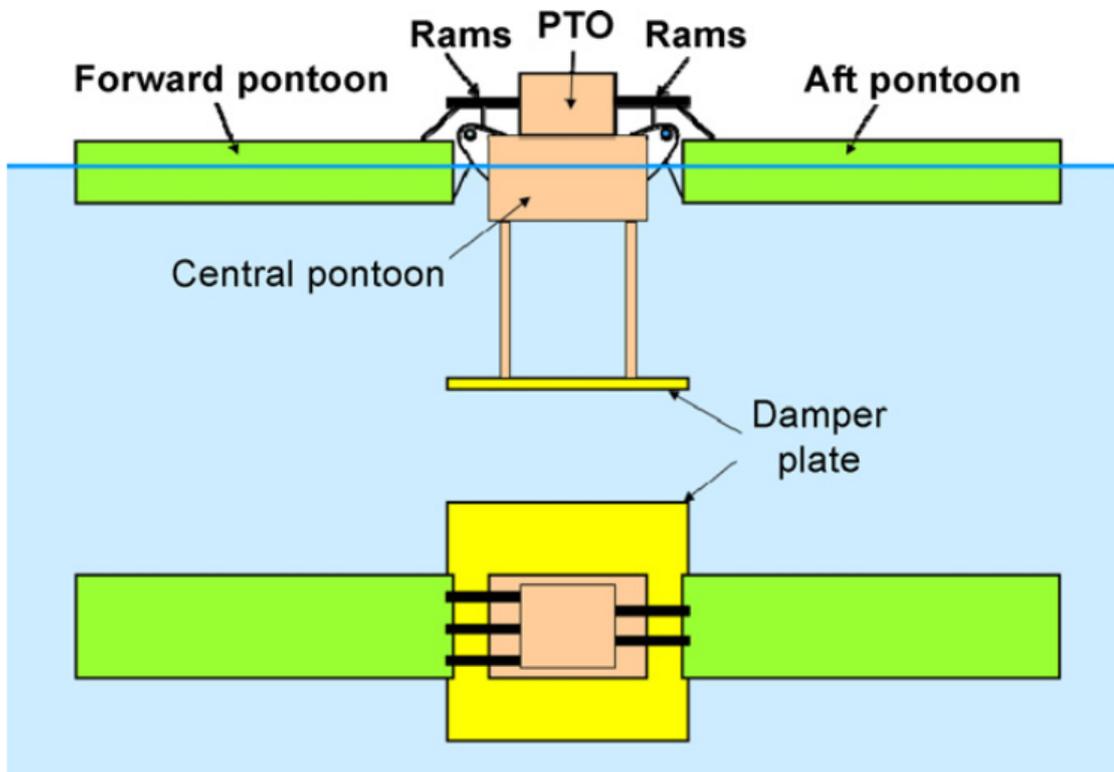


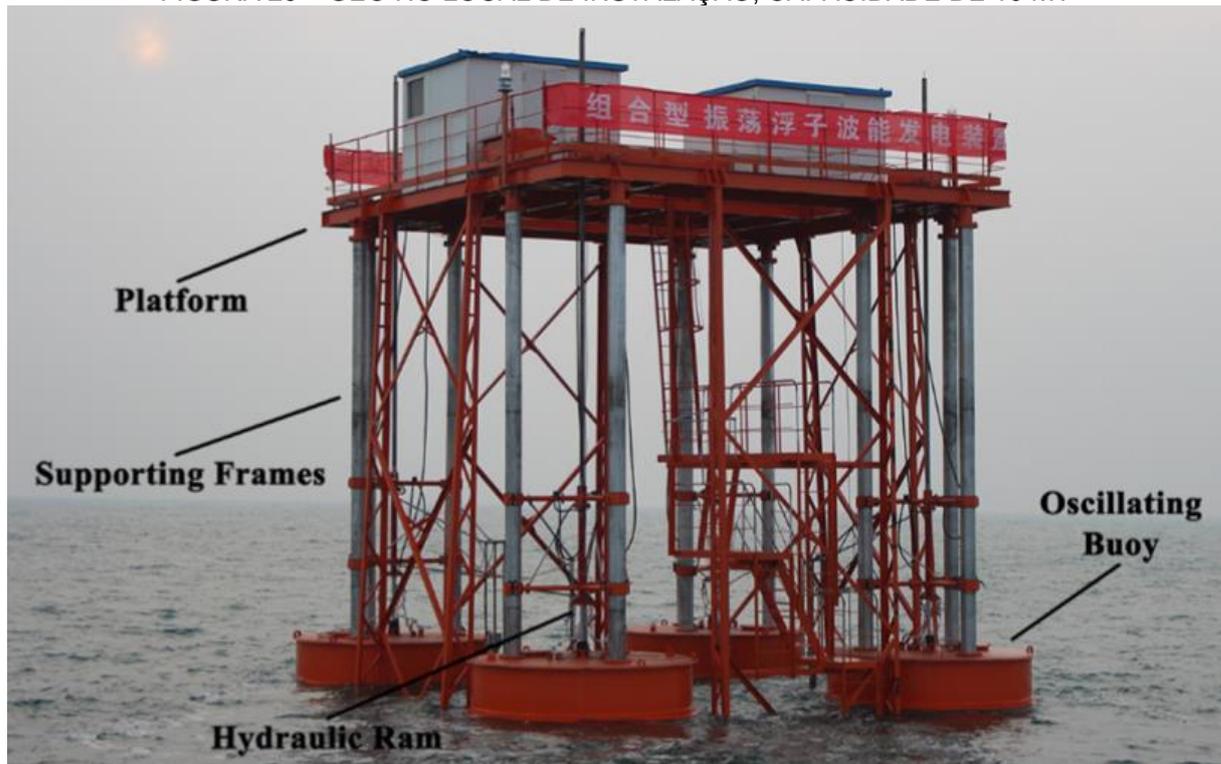
FIGURA 28 – VISTA LATERAL E EM PLANTA DA MCCABE WAVE PUMP



A diferença entre os mecanismos da FIGURA 27 e FIGURA 28 é a forma construtiva do PTO. Na FIGURA 27 o cilindro hidráulico de cada boia é de dupla ação, enquanto que no mecanismo apresentado na FIGURA 28, há mais de um cilindro por boia, sendo cada um deles de simples ação.

Um modelo de GEO com capacidade de 10 kW com PTO hidráulico multicorpos foi desenvolvido e apresentado por Liu et al. (2016), conforme é apresentado na FIGURA 29. Nela, uma estrutura cúbica foi utilizada para apoiar quatro boias oscilantes. Um corpo flutuante submerso foi fixado ao fundo da estrutura para proporcionar flutuabilidade e manter a estrutura imóvel. A estrutura também foi conectada em uma estrutura base de concreto com armadura de aço e cordas de polietileno de peso molecular ultra alto. Um barco guindaste de 500 t, em conjunto com uma barcaça semi-submersa, implantou o dispositivo e a base juntos.

FIGURA 29 – GEO NO LOCAL DE INSTALAÇÃO, CAPACIDADE DE 10 kW

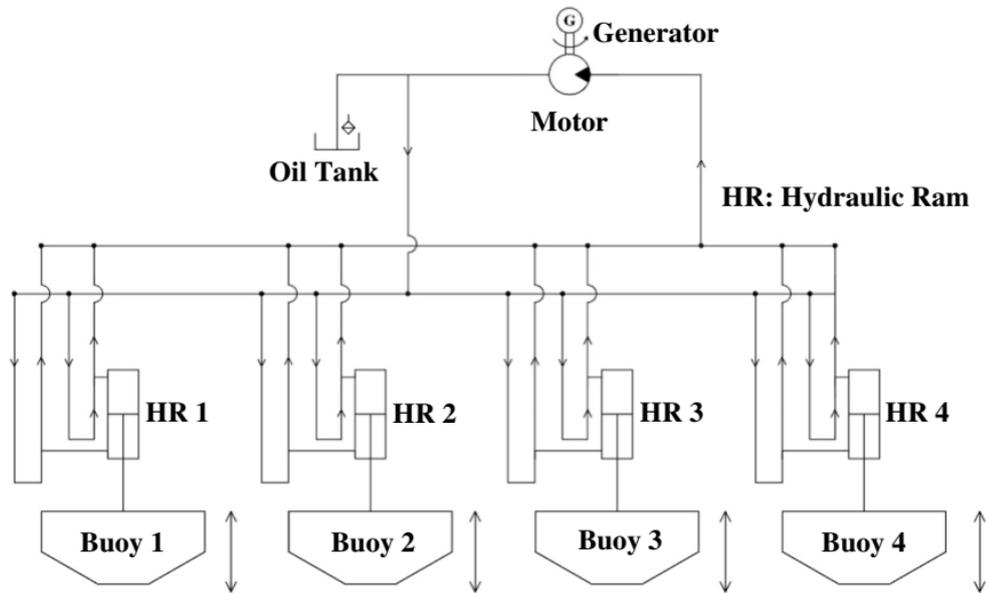


FONTE: Liu et al. (2016).

Nesta instalação, um cilindro hidráulico foi instalado no topo de cada boia. Durante a oscilação das boias, os aríetes hidráulicos podem operar de modo que executem movimentos para cima e para baixo. O óleo de alta pressão de quatro boias é coletado diretamente para acionar o motor hidráulico na plataforma sem usar

nenhum acumulador. A FIGURA 30 apresenta o circuito esquemático hidráulico aqui descrito.

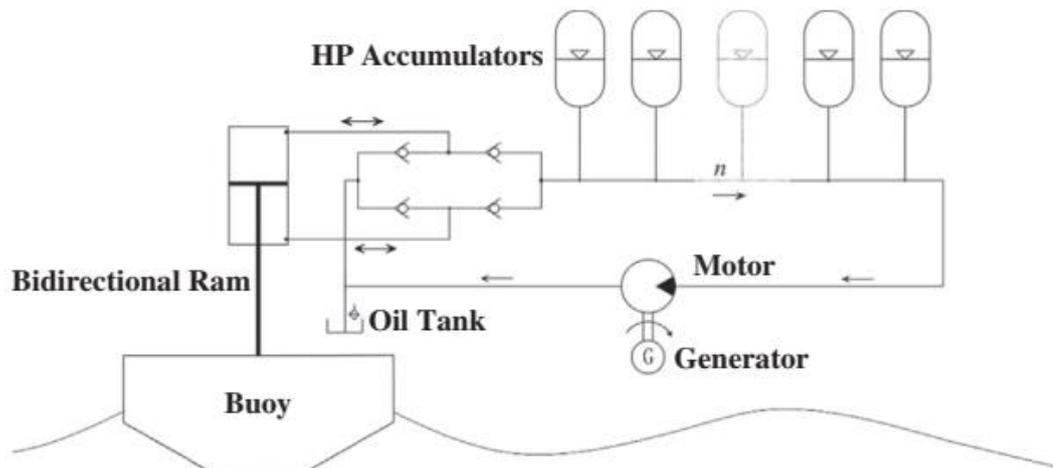
FIGURA 30 – ESQUEMÁTICO DO SISTEMA DE PRESSÃO HIDRÁULICO



FONTE: Liu et al. (2016).

Acumuladores foram utilizados para armazenar a energia das ondas incidentes e na forma de energia hidráulica, conforme apresentado na FIGURA 31. Os acumuladores foram conectados ao motor hidráulico em vez dos aríetes hidráulicos, a fim de reduzir as flutuações de pressão e vazão e garantir uma melhor saída de energia elétrica. O número de acumuladores foi escolhido para equilibrar o conflito entre os períodos de carga e descarga de energia.

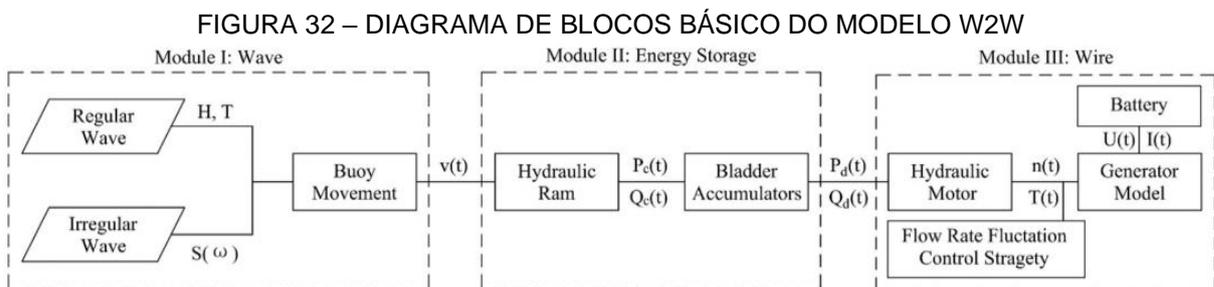
FIGURA 31 – ACUMULADORES NO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA HIDRÁULICA



FONTE: Liu et al. (2016).

O diagrama de blocos de um modelo W2W que descreve o processo de conversão de energia das ondas em eletricidade é mostrado na FIGURA 32. No módulo de ondas, foram empregadas ondas regulares e irregulares; seus vários parâmetros incluem a altura da onda, período e espectro. O movimento da boia é simplesmente considerado como correspondendo a um grau de liberdade. A função de transferência $v(t)$ descreve as velocidades dos aríetes hidráulicos (as velocidades oscilantes das boias sob efeitos de PTO), determinados com base em resultados experimentais. Como simplificação, uma equação de ajuste linear foi empregada para descrever a relação entre as velocidades de elevação das ondas e as velocidades oscilantes das boias. Um trem de ondas irregulares incidente foi discretizado para uma combinação das ondas regulares, assim, as velocidades dos aríetes podem ser derivadas. Para os módulos de armazenamento de energia e fios, as funções e equações de controle para a vazão $Q(t)$, variação de pressão $P(t)$, velocidade de rotação $n(t)$, torque $T(t)$, tensão de carga $U(t)$ e a corrente $I(t)$ foram definidas com base nos trabalhos de Garcia-Rosa et al. (2014) e Ghodrati, A. Rashid (2014).

O modelo W2W foi implementado em Simulink. As perdas do sistema, como as devidas ao atrito nos tubos e dispositivos, também foram levadas em consideração, a fim de atender às condições reais.



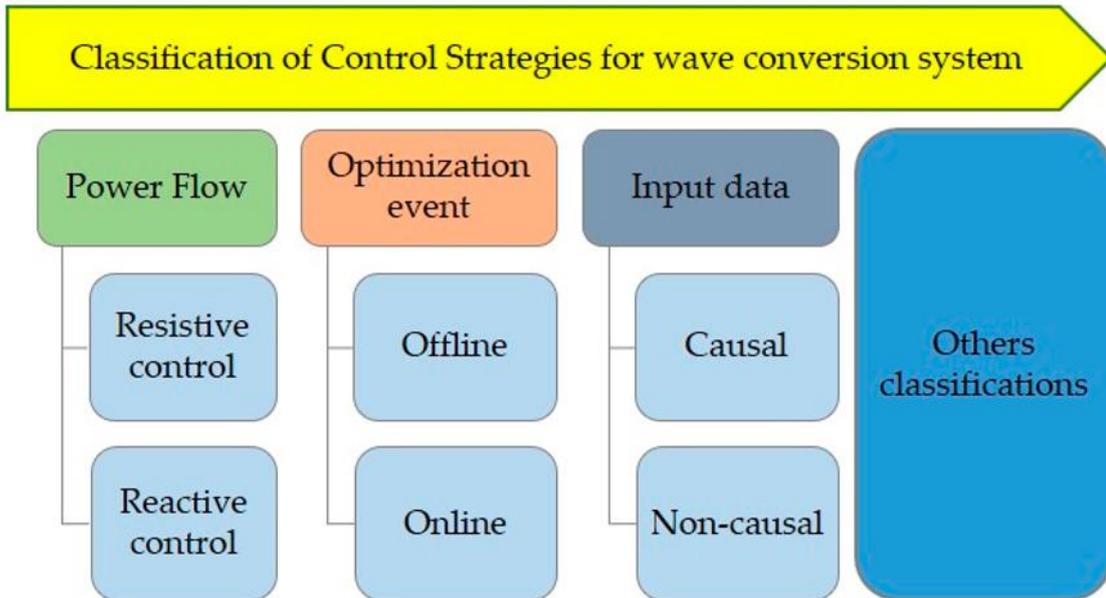
FONTE: Liu et al. (2016).

3. TRABALHOS CORRELATOS

O desenvolvimento de um GEO confiável com um PTO hidráulico eficiente é o principal desafio para o sistema de conversão de energia das ondas devido à natureza imprevisível do ambiente natural e às limitações do dispositivo. A potência gerada pelo GEO com um PTO hidráulico é influenciada por vários parâmetros, e sua otimização pode ser realizada durante a fase de projeto ou operação real no mar usando estratégias de controle dinâmico Wang et al. (2018). As estratégias de controle avançado podem ser realizadas na operação real de um sistema de conversão de energia das ondas usando mecanismo de controle mecânico ou elétrico em um PTO hidráulica. A estratégia de controle de projeto ideal pode aumentar o rendimento de energia e prolongar a vida útil do sistema PTO. Recentemente, uma variedade de estratégias de controle dinâmico foram propostas e investigadas para otimizar o sistema GEO de extração de energia. Identificar as características específicas das diferentes estratégias de controle é necessário para compreender as vantagens, limitações e complexidade associadas à implementação. Geralmente, categorizar as estratégias de controle é difícil, pois há uma variedade de maneiras de desenvolver e implementar uma estratégia individual Wilson et al. (2016).

A FIGURA 33 mostra a classificação das estratégias de controle para a conversão da energia das ondas de acordo com os diferentes critérios. A classificação mais popular é baseada no fluxo de potência, ou seja, o controle resistivo e o controle reativo. O controle resistivo também é conhecido como controle passivo, que envolve apenas a força resistiva (amortecimento) e não controla o fluxo de potência reativa. Diversas estratégias, ou seja, controle de travamento, controle de embreagem e desengate, podem ser classificadas como estratégias de controle resistivo. Por outro lado, o controle reativo conhecido como controle ativo, que envolve amortecimento e ajuste de força de rigidez.

FIGURA 33 – CLASSIFICAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE EM UM SISTEMA DE CONVERSÃO DE ONDAS DE ACORDO COM DIFERENTES CRITÉRIOS



FONTE: Jusoh et al. (2019).

Além disso, as estratégias de controle também podem ser categorizadas com base no evento de otimização de parâmetros, como otimização *offline* e *online* Anderlini et al. (2017) e Anderlini et al. (2018). As estratégias de controle de otimização *offline* são definidas como as estratégias de controle que otimizam seus parâmetros de controle de acordo com os dados das ondas oceânicas anteriores ou futuras (previstas). Frequentemente, os valores ótimos dos parâmetros podem ser encontrados por meio de simulações preliminares. As estratégias de controle *offline* são prescritas e não serão adaptadas devido às mudanças no ambiente. Enquanto isso, as estratégias de controle *online* são definidas como as estratégias de controle que podem realizar uma ação de controle ótima em cada instante de tempo, de modo que se espera maximizar a geração de energia em um curto período de tempo Anderlini et al. (2017). As estratégias de controle *online* são adaptáveis ao ambiente em alteração, mudanças. Por fim, as estratégias de controle também podem ser classificadas como propriedades de causalidade, ou seja, causais e não causais. As estratégias de controle com base causal requerem dados de entrada anteriores, enquanto a estratégia de controle com base não causal requer dados de entrada futuros (do modelo de previsão) Folley et al. (2016).

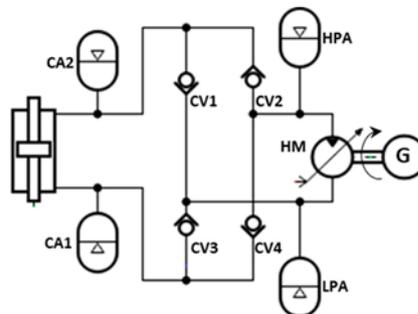
Para um GEO com um PTO hidráulico, o sinal de referência ideal gerado por estratégias de controle avançadas pode ser alcançado controlando vários

componentes principais PTO hidráulico, ou seja, cilindro hidráulico, válvula, acumulador, motor hidráulico e gerador elétrico. A seguir é apresentada uma revisão dos mecanismos de controle implementados no PTO hidráulico do sistema de conversão de energia das ondas.

3.1 ACUMULADOR HIDRÁULICO COM VÁLVULA DE CONTROLE ATIVO

Uma estratégia de controle que envolve um acumulador hidráulico com um mecanismo de válvula de controle ativo é a abordagem mais simples e mais usada para controlar a força do PTO hidráulica. Conforme Ricci et al. (2011), uma estratégia de controle de fase foi proposta adicionando acumuladores de controle extras com a válvula de controle ativa no PTO hidráulico típico, conforme apresentado na FIGURA 34.

FIGURA 34 – PTO HIDRÁULICO DE PRESSÃO CONSTANTE COM BASE NA UTILIZAÇÃO DE QUATRO VÁLVULAS DE RETENÇÃO E ADIÇÃO DE ACUMULADORES EXTRAS ANEXADOS AO ATUADOR DO CILINDRO POR MEIO DE VÁLVULAS DE GAVETA



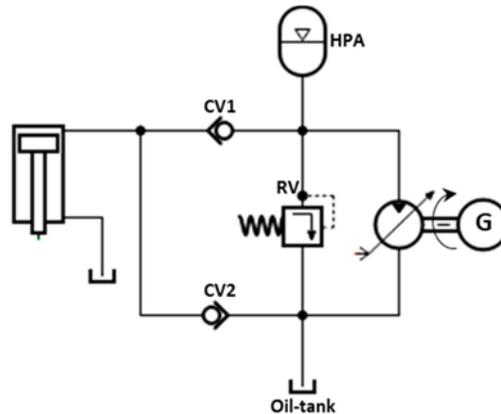
FONTE: ADAPTADO DE Jusoh et al. (2019).

Um algoritmo de controle especial para controlar o funcionamento das válvulas de controle ativo foi proposto a fim de controlar o fluxo de fluido de alta pressão do acumulador e do motor hidráulico. O resultado da simulação mostra que essa abordagem melhora drasticamente o desempenho de um sistema de conversão de energia das ondas. A eficácia desta abordagem também foi avaliada em relação a diferentes instantes de abertura de ativação das válvulas de controle, e os resultados da simulação demonstram que a aplicação desta abordagem é mais benéfica com o tempo.

Para Ding et al. (2016), uma estratégia de controle baseada em um algoritmo de controle de rastreamento do ponto de potência máxima do estado do mar (MPPT)

foi inventada para utilizar em um típico sistema de PTO hidráulico acoplado ao GEO submerso, conforme apresentado na FIGURA 35.

FIGURA 35 – PTO HIDRÁULICO DE PRESSÃO CONSTANTE COM BASE NA UTILIZAÇÃO DE DUAS VÁLVULAS DE RETENÇÃO



FONTE: ADAPTADO DE Jusoh et al. (2019).

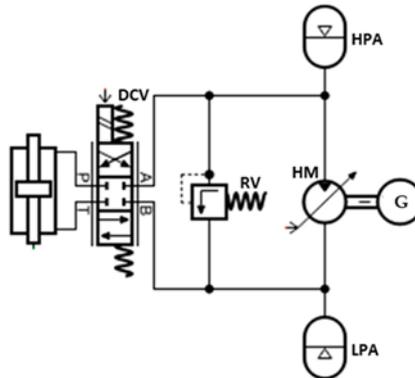
Nesta abordagem, o controle MPPT baseado em um algoritmo de gradiente-ascensão simples foi criado para controlar a força hidráulica do PTO. O acumulador com uma válvula de controle ativa perto do atuador do cilindro hidráulico é usado para controlar a força de amortecimento da boia. O modelo de simulação GEO baseado no sistema CETO da Carnegie foi desenvolvido para avaliar a robustez da estratégia de controle. O resultado da simulação demonstra que a estratégia de controle de amortecimento MPPT proposta é eficaz em melhorar a eficiência do sistema de conversão de energia das ondas testado de 1 a 6 %.

Segundo Song et al. (2018), uma abordagem de controle de acumulador baseada no banco de dados de queda de pressão como o controle de feedback (PDDFC) para estabilizar a saída de energia elétrica de um nível especificado é proposta. O método PDDFC elimina o impulso de pressão de pico periódico inconveniente, regulando a válvula de controle ativo do acumulador hidráulico. Em comparação com as estratégias de controle sofisticadas anteriores, esta abordagem pode manter a saída de energia do gerador elétrico de forma mais estável para várias condições de operação. Além disso, o teste experimental também foi conduzido para avaliar a eficácia da abordagem de controle proposta, e os resultados demonstraram que a potência de saída do PTO hidráulico com esta abordagem de controle é significativamente estável. Além disso, a qualidade da energia e a eficiência de geração do PTO hidráulico são aprimoradas.

3.2 CILINDRO HIDRÁULICO COM VÁLVULA DE CONTROLE ATIVO

Outra abordagem para controlar a força de um PTO é usar um atuador de cilindro hidráulico com uma válvula de controle ativa. Por exemplo, uma abordagem simples para controlar a força do PTO hidráulica é usar o método de desengate, que foi aplicado por Babarit et al. (2009). Nesta abordagem, uma força PTO de um sistema PTO hidráulico simples, conforme apresentado na FIGURA 36, é controlada desligando e ligando alternativamente o atuador hidráulico do sistema PTO hidráulico usando válvula direcional de 3 vias.

FIGURA 36 – PTO HIDRÁULICO DE PRESSÃO CONSTANTE COM BASE NA UTILIZAÇÃO DE UMA VÁLVULA DE CONTROLE DIRECIONAL

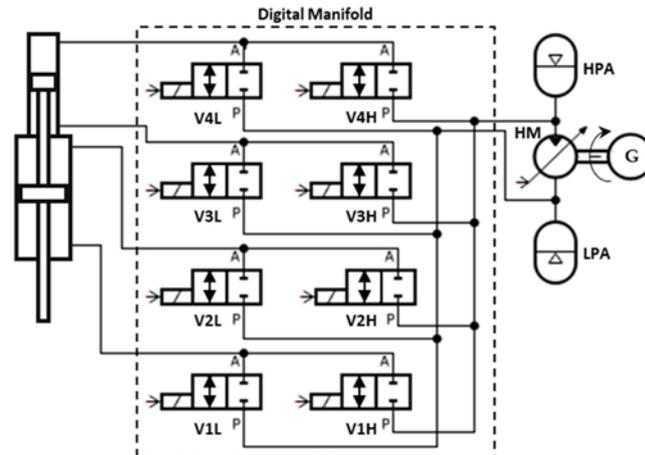


FONTE: ADAPTADO DE Jusoh et al. (2019).

O comando baseado no princípio de Pontryagin tem sido usado para calcular a lei de controle para maximizar a energia extraída das ondas do mar e gerar as referências para a válvula de controle direcional. Esta abordagem de controle tem a vantagem de requerer apenas um único mecanismo de controle de válvula ativa em comparação com o outro método de controle, que envolve um mecanismo de controle mais sofisticado. A abordagem de controle proposta foi avaliada, e o resultado da simulação numérica indica que a abordagem de controle pode levar a uma maior absorção de energia, tanto em ondas regulares quanto irregulares, em comparação com o método de controle pseudocontínuo.

Além disso, a combinação de operação das válvulas ativas, como em um conceito típico de PTO hidráulico apresentado na FIGURA 37, também pode ser usada para controlar a força de PTO hidráulica.

FIGURA 37 – PTO HIDRÁULICO DE PRESSÃO CONSTANTE COM BASE NA UTILIZAÇÃO MÚLTIPLAS VÁLVULAS DE CONTROLE DIRECIONAL



FONTE: ADAPTADO DE Jusoh et al. (2019).

Por exemplo, conforme apresentado por Hansen et al. (2011), as estratégias de controle de vários níveis foram avaliadas para um GEO típico com o conceito de PTO hidráulica apresentado na FIGURA 37. Nas estratégias de controle propostas, a referência de força do PTO hidráulica é otimizada em vários estágios, uma vez que o desempenho do sistema de conversão de ondas depende da eficiência do dispositivo GEO no PTO hidráulico. Na otimização do primeiro estágio, o algoritmo de extração de energia das ondas (WPEA) é criado para calcular a energia máxima esperada a ser gerada pelo dispositivo GEO de acordo com a condição do estado do mar. Enquanto isso, no segundo estágio de otimização, o algoritmo de comutação de força (FSA) é inventado como um controlador de supervisão para fornecer um sinal de referência ideal para controladores secundários (combinação de válvulas de desvio) para serem ligados ou desligados de acordo com as referências de força gerado por WPEA. Os resultados dos estudos de simulação indicaram que, usando as estratégias de controle propostas, a eficiência geral de um PTO hidráulico típico pode ser de até 80 %.

Além disso, um conceito semelhante de estratégias de controle em Hansen et al. (2011) também foi implementado em um sistema PTO baseado em atuador hidráulico de múltiplas câmaras Hansen et al. (2018). Neste estudo, o WPEA baseado no princípio do modelo de controle preditivo (MPC) foi utilizado para maximizar a produção de energia das ondas manipulando habilmente a força do PTO. A estratégia de controle do MPC permite a otimização online, que é capaz de controlar o sistema hidráulico do PTO diretamente durante o processo de maximização de energia. No entanto, o desempenho da estratégia de controle MPC depende da precisão do

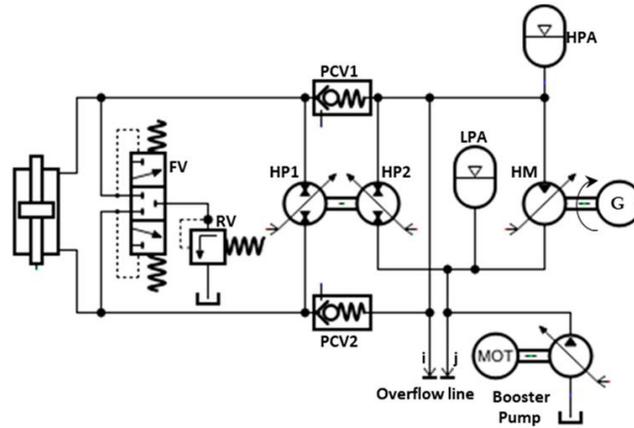
algoritmo de previsão de onda. Com base nos resultados do estudo de investigação, o autor concluiu que o WPEA baseado nos princípios do MPC é possível e favorável para utilização em um fluido discreto de PTO hidráulico para o sistema de conversão de energia das ondas. No trabalho de Zou; Abdelkhalik (2018), foi realizado um estudo comparativo dos diferentes tipos de WPEA. Nele, seis tipos diferentes de WPEA, tais como controle de arco singular (SA), controle proporcional derivativo (PD), MPC, controle pseudo-espectral (PS), controle conjugado de complexo derivado proporcional (PDC3) e o controle baseado na forma (SB) foram comparados. A partir dos resultados da simulação sob consideração do teste teórico, onde o sistema PTO ideal é usado, a estratégia de controle SA mostrou o melhor desempenho durante a extração de energia. No entanto, a situação é contrastante quando o sistema de PTO hidráulico é usado em vez do sistema de PTO ideal. Pelos resultados apresentados, a execução da estratégia de controle SA com o PTO hidráulico é a pior, enquanto a estratégia de controle MPC apresenta o maior desempenho entre as seis estratégias de controle.

3.3 TRANSFORMADOR HIDRÁULICO COM MECANISMO DE CONTROLE DIGITAL

O deslocamento de um transformador (motor) hidráulico também pode ser ajustado para controlar a força do PTO. O modelo apresentado por Gaspar et al. (2016), possui um motor hidráulico em um sistema de PTO hidráulico típico, apresentado na FIGURA 38, que é utilizado para controlar a pressão e controlar diretamente a força do sistema de PTO hidráulico dentro de um valor nominal aceitável.

Nesta abordagem, um controlador proporcional-integral-derivativo (PID) é utilizado para realizar o controle ativo ou reativo do dispositivo GEO. Um controlador PID é usado para fornecer um sinal de controle de referência apropriado para o controlador secundário do transformador hidráulico, que é um controlador de deslocamento digital. Um controlador PID compara a pressão da linha de alta pressão ao nível de pressão desejado para determinar o valor de referência ideal para o controlador de deslocamento digital.

FIGURA 38 – PTO HIDRÁULICO DE PRESSÃO CONSTANTE COM BASE NA UTILIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR HIDRÁULICO



FONTE: ADAPTADO DE Jusoh et al. (2019).

O resultado da simulação deste estudo indica que esta abordagem é adequada e eficaz durante a maioria dos estados energéticos encontrados no mar, onde o PTO hidráulico opera com uma eficiência estimada de 71 %.

3.4 MECANISMO DE CONTROLE NO MÓDULO DE CONDICIONAMENTO

Segundo Jusoh et al. (2019), atualmente, a maioria dos pesquisadores está se concentrando no controle do PTO hidráulico usando componentes mecânicos, conforme descrito na subseção anterior. No entanto, esta abordagem baseada na mecânica tem uma desvantagem, como problemas de tempo de resposta, que podem causar complexidade no sistema de controle. Além disso, estes sistemas de controle são baseados em componentes mecânicos alta tecnologia, como um motor hidráulico de deslocamento digital, sensor mecânico digital e etc., são razoavelmente caros. Portanto, a abordagem de controle do PTO hidráulico com base no mecanismo elétrico pode ser uma alternativa razoável para abordagens de controle com base mecânica.

Conforme descrito por Wang et al. (2019), uma estratégia de controle de um retificador de modulação por largura de pulso (PWM) para maximizar a eficiência do PTO hidráulico típico é proposta. Esta estratégia de controle consiste em controle de feedback de velocidade na malha externa e controle de desacoplamento de corrente na malha interna adotada para o componente retificador no módulo de condicionamento. Um loop de controle externo, o algoritmo de conversão de eficiência máxima (MEC), é desenvolvido para calcular a referência de velocidade ideal com base na pressão do acumulador. A velocidade de referência fornecida e o sinal de

velocidade real do MEC e do gerador elétrico são calculados pelo controlador PID e usados como entrada para o controle do circuito interno. Em um loop de controle interno, o controlador PI é utilizado para determinar o controle de desacoplamento de corrente e o algoritmo do vetor espacial é usado para gerar o sinal de controle de referência PWM para o retificador. Esta abordagem foi avaliada experimentalmente, e os resultados do experimento demonstraram que a velocidade do gerador foi controlada com sucesso durante a intermitência da onda do mar.

4. MATERIAIS E MÉTODO

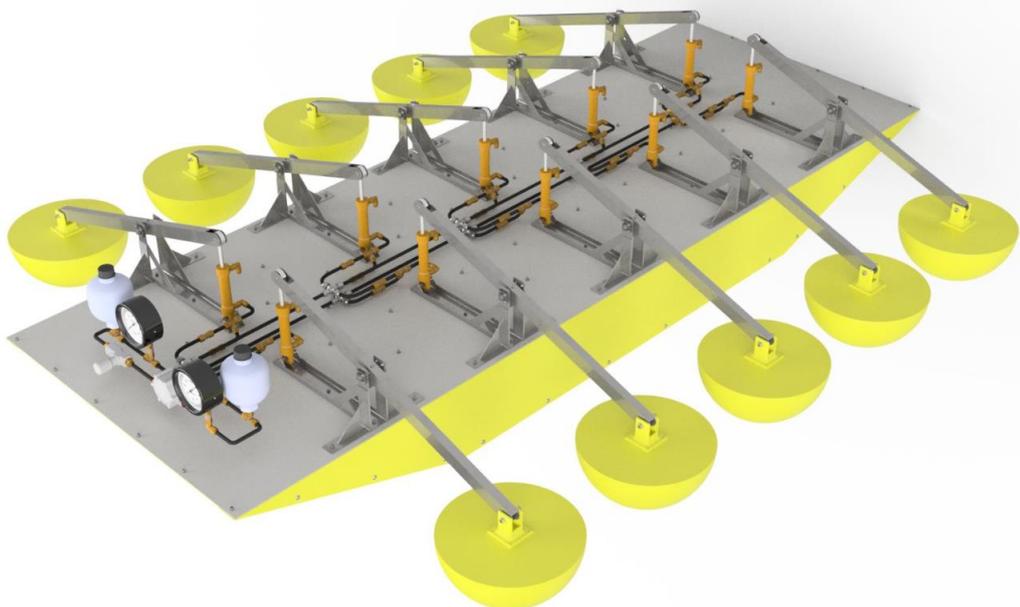
Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos utilizados para a avaliação do comportamento hidráulico para geração de energia ondomotriz em dispositivos flutuantes.

Inicialmente são apresentados o modelo mecânico utilizado para avaliação, os modelos computacionais para sua simulação e validação de um modelo reduzido. Em seguida são abordados os métodos matemáticos para otimização do PTO hidráulico considerado.

4.1 MATERIAIS

O modelo do sistema de geração de energia ondomotriz aqui considerado é baseado num modelo reduzido de uma embarcação para aplicações do tipo *nearshore*, cujo sistema de ancoragem é do tipo amarração ao fundo do mar. O modelo elaborado é composto por dez conjuntos flutuantes dispostos fisicamente de forma a manter equilibrada toda embarcação, como é apresentado na FIGURA 39.

FIGURA 39 – MODELO REDUZIDO DO SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ONDOMOTRIZ

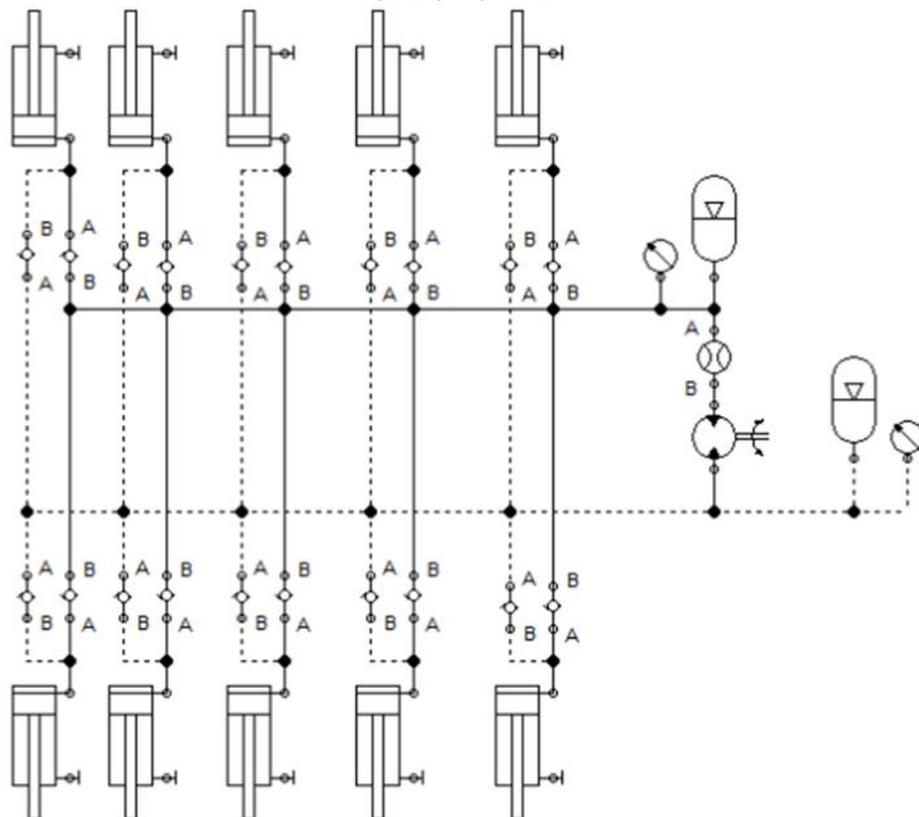


FONTE: Paludo (2021a).

Os dispositivos flutuantes são conectados através de cilindros hidráulicos à um circuito hidráulico, e sua movimentação provoca a elevação de pressão deste

circuito. Para manter a pressão, armazenar e recuperar energia, bem como reduzir picos de pressão, são utilizados acumuladores hidráulicos. A saída do acumulador hidráulico é conectada num motor hidráulico que, por fim, tem seu eixo acoplado à um gerador de energia elétrica. Para controle de vazão e pressão sobre o circuito hidráulico, uma válvula de controle de fluxo é utilizada. Para adequar o sentido de fluxo durante a movimentação dos cilindros hidráulicos, além da manutenção de fluido nas tubulações e câmaras destes cilindros, válvulas de retenção são utilizadas. A conversão de energia de cada conjunto flutuante se dá durante o movimento de subida que, no cilindro hidráulico, provoca o movimento de recuo de sua haste mecânica. A FIGURA 40 apresenta o circuito hidráulico elaborado para avaliação da conversão de energia por este sistema PTO.

FIGURA 40 – CIRCUITO HIDRÁULICO PARA O PTO DO SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ONDOMOTRIZ

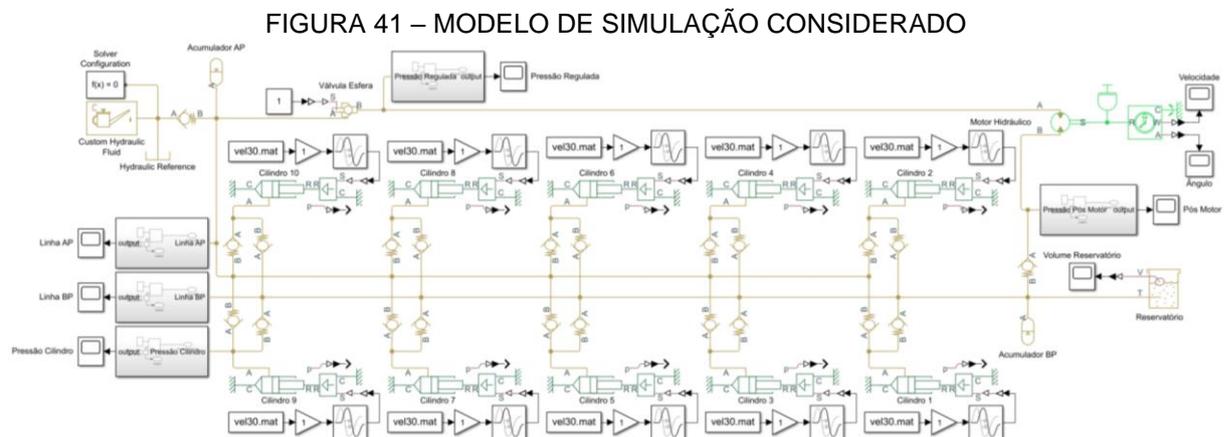


FONTE: O autor (2021).

Este circuito hidráulico foi elaborado no software Automation Studio Professional 6.2. Contudo, a versão disponível deste software não permite a simulação da movimentação de cada cilindro através da inclusão de modelos físicos e matemáticos externos a ele, ou seja, não é possível simular a conexão do dispositivo

flutuante e sua movimentação através de um modelo de onda. Portanto, para validação das simulações e posterior comparação ao tanque de ondas, optou-se por utilizar o software MATLAB e sua ferramenta de simulação Simulink, com suas bibliotecas Simscape e Simscape Fluids, que permitem a utilização de modelos de cilindros, válvulas, tubulações e demais componentes de um circuito hidráulico.

A vantagem de se utilizar o software MATLAB é a possibilidade da utilização dos modelos matemáticos de simulação de ondas, que são utilizados no tanque de ondas. Desta forma, é possível realizar toda a otimização do sistema através desta ferramenta. A FIGURA 41 apresenta o modelo de simulação elaborado no ambiente Simulink do MATLAB, análogo ao desenvolvido no software Automation Studio.



FONTE: O autor (2021).

O modelo apresentado na FIGURA 41 permite variações de parâmetros para a maioria dos componentes hidráulicos do sistema considerado, tais como: formato de onda, atraso de tempo para cada cilindro, variações de ganho de amplitude de onda, variação da abertura da válvula de fluxo para acionamento do motor hidráulico, variação do tipo de fluido hidráulico utilizado no circuito, variação do dimensionamento da tubulação e parâmetros de perda de carga em uniões do tipo T e demais componentes, tamanho e pré-carga do acumulador hidráulico, dimensões e capacidade dos cilindros, entre outros.

Para o desenvolvimento dos testes de validação do modelo de simulação considerado, fez-se a utilização de um tanque de ondas. Um tanque de ondas é comumente utilizado para que se possa avaliar o comportamento de corpos flutuantes quando submetidos à ação das ondas. Desta forma é possível reproduzir e

compreender este fenômeno gerado pela natureza. Existem dois tipos principais de tanque de ondas, os oceânicos e os costeiros.

Os tanques oceânicos permitem reproduzir o movimento de ondas e, por vezes, marés e correntes marítimas, para águas profundas, geralmente aplicados para o estudo de estruturas e dispositivos *offshore*. Para geração deste comportamento de ondas, geralmente são aplicados batedores em múltiplas direções, com sistema de absorção ativa, de forma que as reflexões não interfiram nas ondas geradas pelos batedores. Os tanques costeiros permitem reproduzir o movimento de ondas em regiões próximas da costa, geralmente aplicados para o estudo de estruturas e dispositivos *onshore* e *nearshore*. Neste caso, são utilizados batedores que permitam criar o comportamento das ondas até sua rebentação na praia ou na estrutura costeira avaliada, portanto, o movimento dos batedores é numa única direção e a absorção é do tipo passiva, proporcionada pela própria região da praia.

O tanque de ondas disponível nas instalações atuais do Lactec, possui um servomecanismo capaz de movimentar uma pá telescopicamente, ou seja, com um batedor do tipo pistão, que proporciona as características de tanques costeiros. A FIGURA 42 apresenta o batedor tipo pistão projetado para o tanque de ondas. Para a realização do controle do tipo de onda desejada (período e amplitude da onda), é utilizado um CLP (Controlador Lógico Programável), que monitora e comanda um servo controlador. Toda a interface de comando é realizada através de um display, uma IHM (Interface Homem Máquina).

FIGURA 42 – BATEDOR TIPO PISTÃO PROJETADO PARA O TANQUE DE ONDAS COSTEIRAS DO LACTEC



FONTE: Paludo (2021b).

A FIGURA 43 apresenta o tanque de ondas costeiras, com um batedor do tipo pistão numa extremidade, para a geração de ondas, e praia na outra extremidade, para absorção passiva da reflexão de ondas. O comprimento deste tanque de ondas é de 10 m e largura de 0,7 m. Este tanque é considerado pequeno para estudos de estruturas e dispositivos flutuantes complexos, porém, permite a avaliação de partes de estruturas, como é o caso deste trabalho de dissertação. Um tanque de ondas costeiras de maior tamanho e complexidade está em desenvolvimento e faz parte dos resultados do projeto de P&D vinculado a este trabalho e tem previsão de conclusão para março de 2022.

FIGURA 43 – PROJETO DO TANQUE DE ONDAS COSTEIRAS DO LACTEC



FONTE: Paludo (2021b).

A FIGURA 44 apresenta o tanque de ondas construído para realização dos testes parciais para o sistema de conversão de energia ondomotriz considerado. Este tanque de ondas permite a avaliação do sistema de geração de ondas (controle e mecanismo), comportamento da reflexão e absorção de ondas na região da praia, avaliação dos dispositivos flutuantes (formas e dimensões), avaliação do sistema de ancoragem e amarração da modelo considerado (FIGURA 39).

FIGURA 44 – TANQUE DE ONDAS COSTEIRAS DO LACTEC: (A) VISÃO GERAL, (B) REGIÃO DO BATEDOR, (C) REGIÃO DA PRAIA



(A)



(B)



(C)

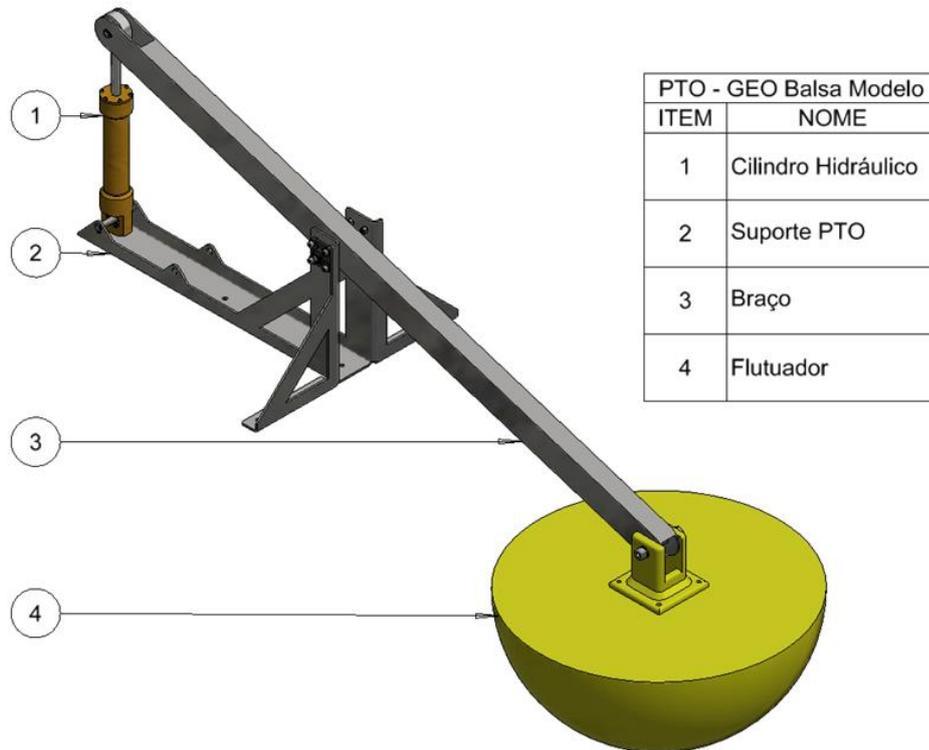
FONTE: O autor (2021).

4.2 MÉTODO

O primeiro passo para avaliação do comportamento hidráulico para geração de energia ondomotriz em dispositivos flutuantes multicorpos é a validação do modelo computacional elaborado no software MATLAB com os testes realizados no tanque de ondas. Em função de suas dimensões, o tanque de ondas permite a realização de testes de apenas um dispositivo flutuante, contudo, o comportamento apresentado pode ser replicado para o restante do circuito hidráulico. Em função das variações de tipos de ondas, avaliam-se as pressões do fluido hidráulico produzidas durante a oscilação do corpo flutuante.

Para o procedimento de validação, foi considerado a montagem de um dos braços do sistema multicorpos do modelo reduzido da embarcação apresentada na FIGURA 39. A FIGURA 45 apresenta este conjunto do PTO e seus principais componentes.

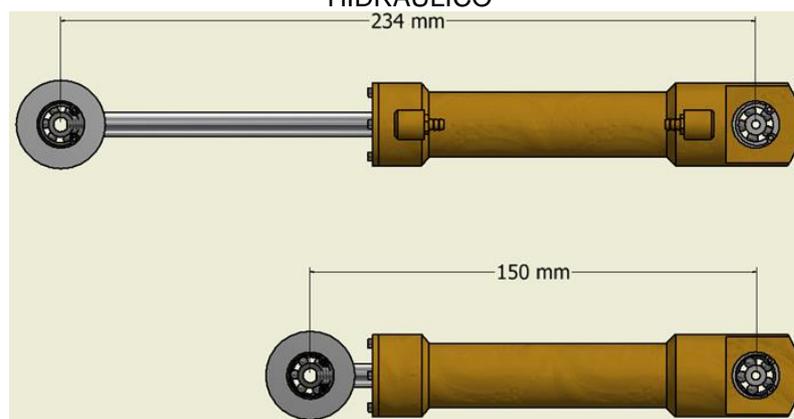
FIGURA 45 – ELEMENTOS DO PTO PARA TESTE



FONTE: Paludo (2021a).

A FIGURA 46 apresenta um detalhe do cilindro projetado nas condições de recuo e avanço total. Portanto, nestas condições, o cilindro possui um curso máximo de 84 mm.

FIGURA 46 – CILINDRO HIDRÁULICO UTILIZADO NOS TESTES DE VALIDAÇÃO DO MODELO HIDRÁULICO



FONTE: Paludo (2021a).

Vale lembrar que o projeto de cada componente do modelo reduzido apresentado na FIGURA 39 faz parte do desenvolvimento do projeto de P&D que este trabalho de dissertação está vinculado. Contudo, neste trabalho de dissertação são avaliados apenas o comportamento hidráulico para geração de energia ondomotriz

em dispositivos flutuantes multicorpos mediante simulação, portanto, apenas o conjunto de PTO é validado no tanque de ondas.

Com relação ao sistema de geração de onda, foram considerados os seguintes parâmetros:

- 141 mm de *stroke* (deslocamento do batedor);
- 2 s de período;
- 240 mm de altura de onda;
- 3,4 m de comprimento de onda;
- 0,7 m de frente de onda (largura do tanque de ondas);
- 1,0 m de profundidade (nível d'água, apenas como referência).

Com estas características de formato de onda e utilizando a Equação 1, o tanque de ondas proporciona uma potência média de onda de $P = 40,32 \text{ W/m}$, visto que a largura da onda (que é a largura útil do tanque) é de 0,7 m.

A FIGURA 47 apresenta um trem ondas formadas no tanque através desta configuração.

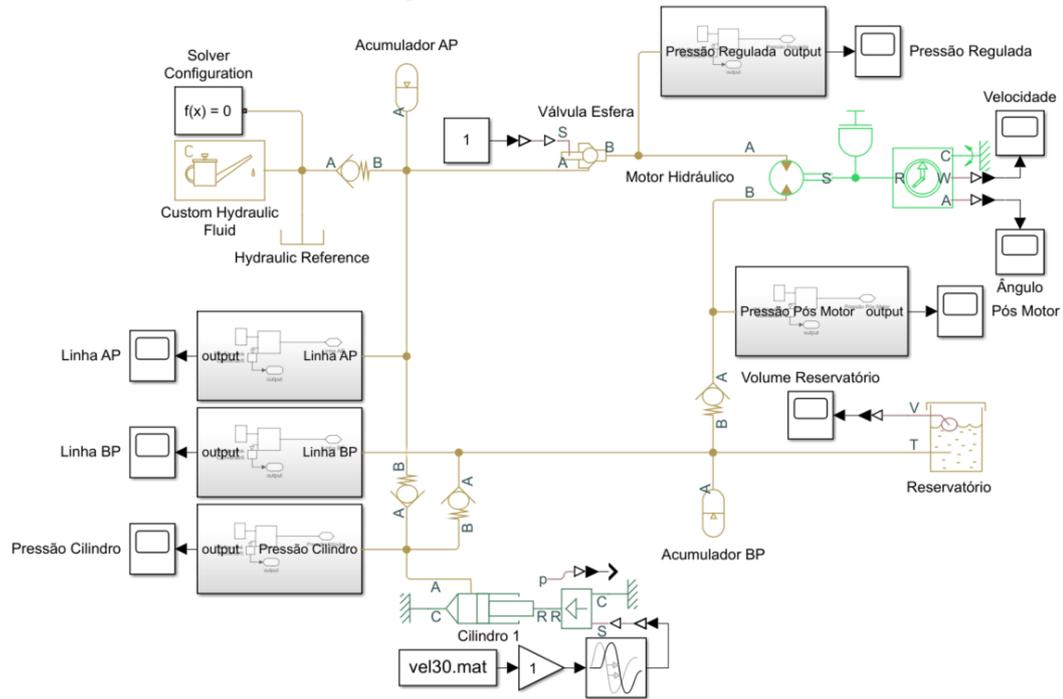
FIGURA 47 – ONDA GERADA PARA TESTES DE VALIDAÇÃO DO MODELO HIDRÁULICO



FONTE: O autor (2021).

A montagem do circuito hidráulico para teste foi baseada na simulação de um dispositivo flutuador, como apresentado na FIGURA 48.

FIGURA 48 – CIRCUITO HIDRÁULICO CONSIDERADO PARA SIMULAÇÃO E TESTES DE VALIDAÇÃO NO TANQUE DE ONDAS



FONTE: O autor (2021).

Em comparação ao circuito hidráulico completo, apresentado na FIGURA 41, a única diferença é a utilização de apenas um cilindro hidráulico. Para validação desta simulação, considerou-se apenas a pressão gerada na linha de alta pressão, ou seja, a linha onde há a conexão da saída de cada cilindro quando ocorre sua compressão (reco) em função da oscilação (elevação) do dispositivo flutuador provocado pela passagem de uma onda.

Nos testes de validação no tanque de ondas, o circuito hidráulico montado é regulado através da válvula de esfera indicada no circuito da FIGURA 48, porém, em função do modelo ser reduzido, não há acoplamento do motor hidráulico ao sistema. Assim, o resultado principal destes testes é o valor de pressão máxima que pode ser obtido por cada conjunto de cilindro hidráulico, bem como a manutenção da pressão na saída do acumulador de alta pressão.

O circuito hidráulico montado no tanque de ondas, para validação dos resultados obtidos por simulação, é apresentado na FIGURA 49. Pode-se observar na imagem que o transdutor de pressão é conectado na linha de alta pressão a ser gerada pelo cilindro hidráulico. Além disso, a linha de baixa pressão é conectada

diretamente ao reservatório do tanque de ondas, de forma a manter a pressão sempre constante.

FIGURA 49 – CIRCUITO HIDRÁULICO MONTADO PARA OS TESTES DE VALIDAÇÃO NO TANQUE DE ONDAS



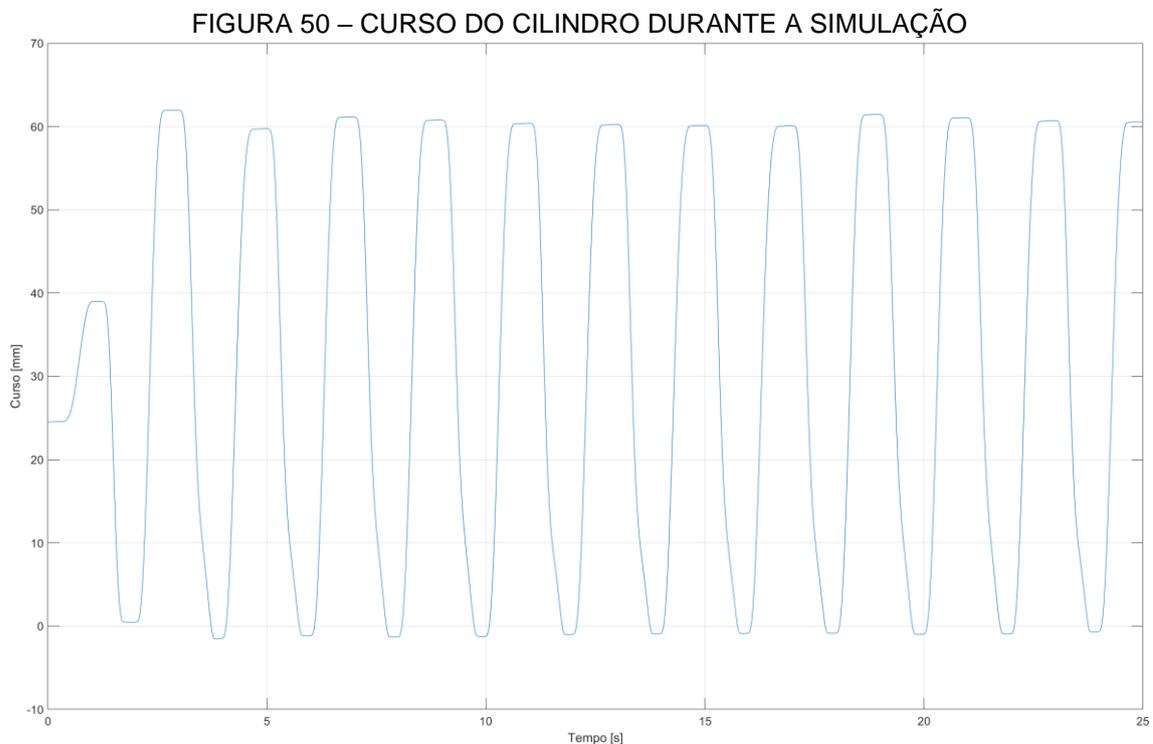
FONTE: O autor (2021).

Os resultados obtidos pelo modelo de simulação e os testes no tanque de ondas são apresentados no capítulo a seguir.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos testes de validação do modelo computacional no tanque de ondas são apresentados a seguir, conforme método apresentado no capítulo anterior.

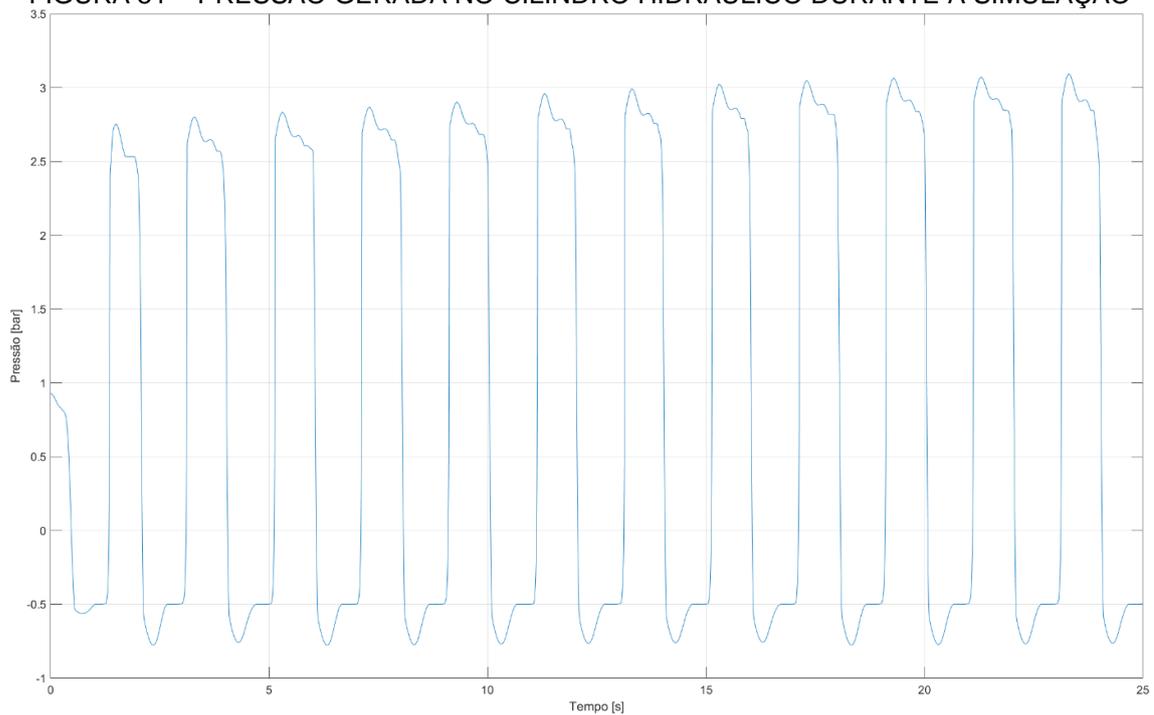
A FIGURA 50 apresenta a variação de curso do cilindro na simulação. Os valores considerados para simulação foram os estipulados no sistema de geração de ondas. Observa-se na FIGURA 50 que o curso máximo não ultrapassa o limite físico de 84 mm. Esta diferença se dá por segurança do conjunto projetado, de forma que o dispositivo flutuador não seja afundado completamente em nenhum momento da onda gerada.



FONTE: O autor (2021).

A FIGURA 51 apresenta a pressão gerada no cilindro hidráulico durante o período de simulação. Para o formato de onda considerado, perceptível pela variação de curso do cilindro apresentado na FIGURA 50, o valor máximo alcançado é de 3,095 bar. Além disso, comparando o resultado da FIGURA 51 e da FIGURA 50, é possível observar a elevação da pressão exatamente durante o ciclo de recuo da haste.

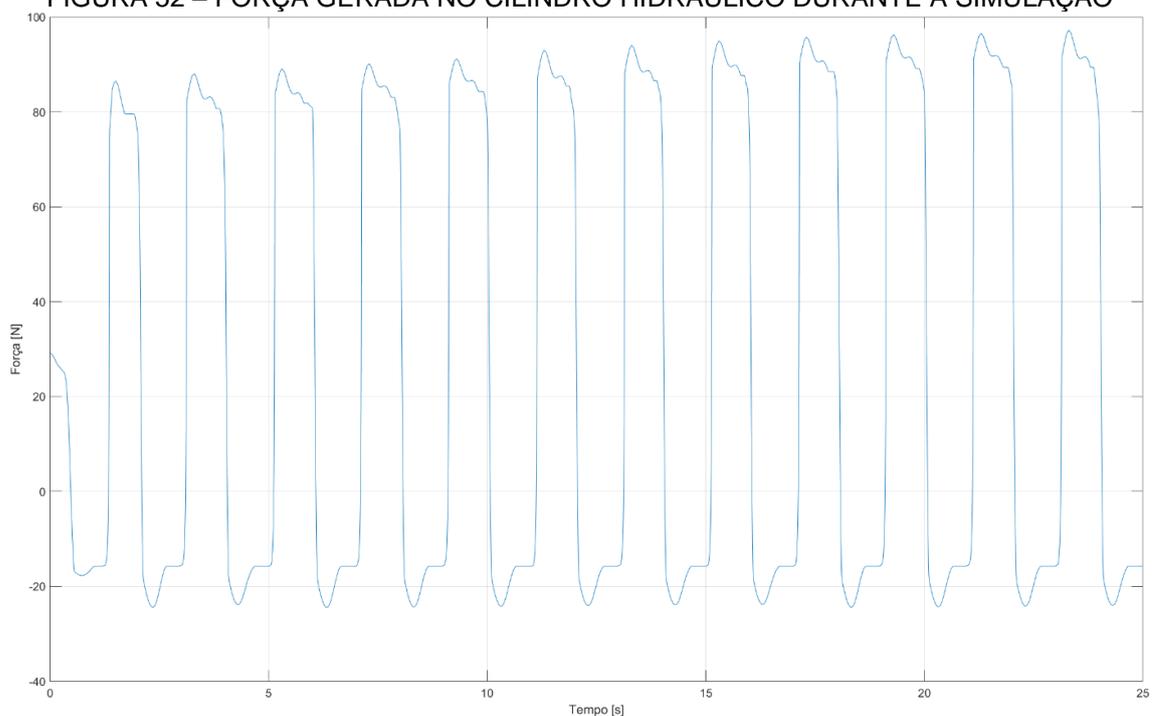
FIGURA 51 – PRESSÃO GERADA NO CILINDRO HIDRÁULICO DURANTE A SIMULAÇÃO



FONTE: O autor (2021).

A FIGURA 52 apresenta a força no cilindro hidráulico durante o período de simulação. Observa-se que, após estabilização da movimentação depois de 20 s iniciais, a força máxima (medida no pico da curva de força) é de 97,1 N.

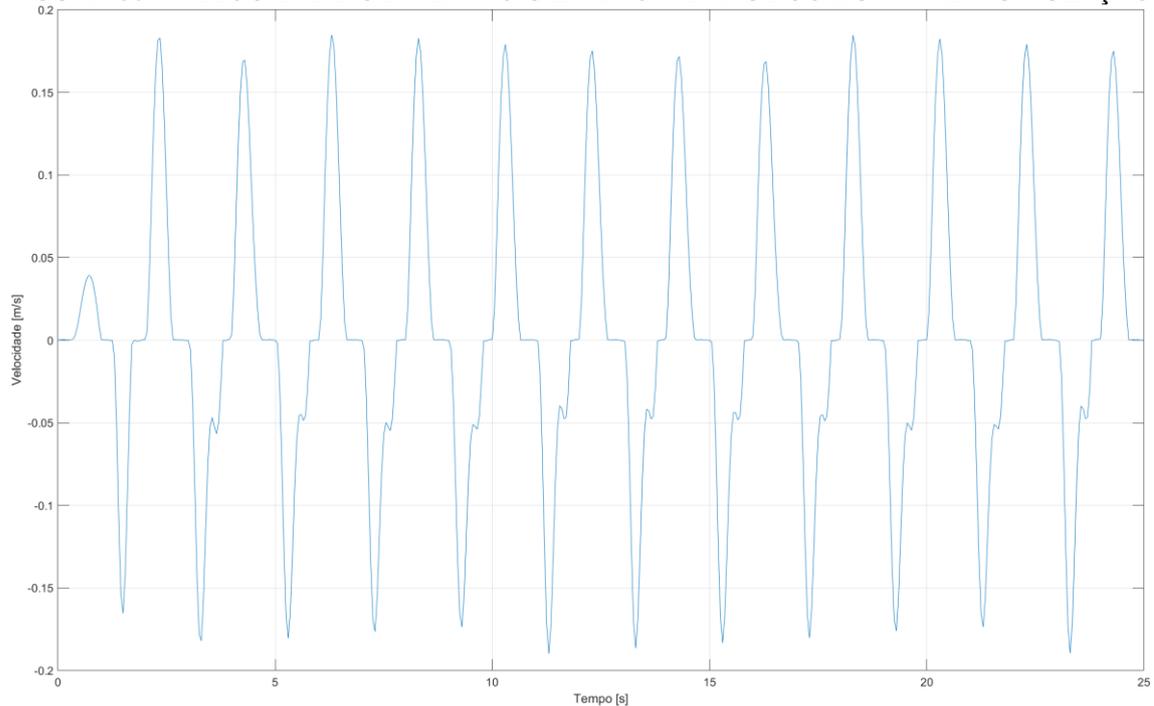
FIGURA 52 – FORÇA GERADA NO CILINDRO HIDRÁULICO DURANTE A SIMULAÇÃO



FONTE: O autor (2021).

A FIGURA 53 apresenta a velocidade de movimentação do cilindro hidráulico durante o período de simulação, nos cursos de avanço e recuo. Observa-se que, após estabilização da movimentação depois de 20 s iniciais, a velocidade máxima (medida no pico da curva de velocidade, durante o movimento de recuo, que é o movimento do cilindro que será convertido em potência hidráulica) é de 0,186 m/s (valor absoluto).

FIGURA 53 – VELOCIDADE GERADA NO CILINDRO HIDRÁULICO DURANTE A SIMULAÇÃO

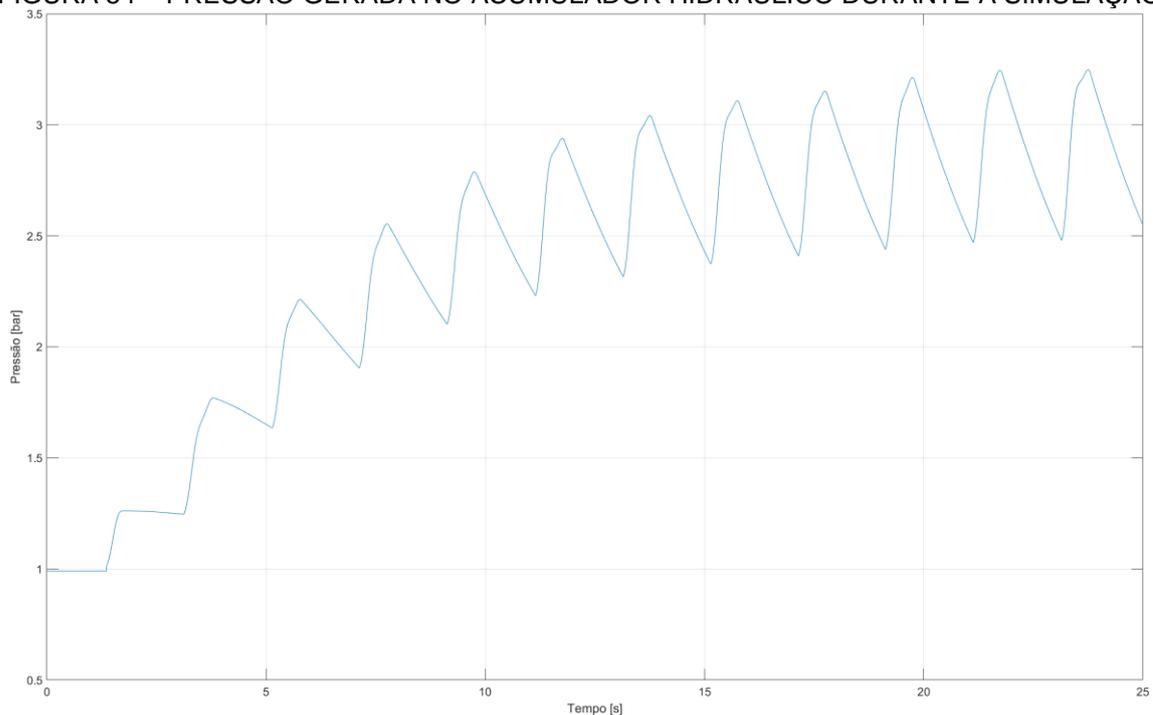


FONTE: O autor (2021).

Com base nos valores máximos de força e velocidade obtidos durante a simulação, apresentados na FIGURA 52 e FIGURA 53, e utilizando a Equação 2, é possível determinar que o cilindro hidráulico considerado (FIGURA 46), que é o PTO deste sistema, proporciona uma potência máxima média de $P = 18,06 W$.

A FIGURA 54 apresenta a pressão gerada (ou acumulada) no acumulador hidráulico durante o período de simulação. É interessante observar o comportamento deste componente, atuando como um equalizador de pressão para a linha de alta pressão que, posteriormente, deverá ser conectada à um motor hidráulico e, então, acoplado à um gerador elétrico, de forma a converter a energia mecânica obtida por este sistema para a energia elétrica desejada.

FIGURA 54 – PRESSÃO GERADA NO ACUMULADOR HIDRÁULICO DURANTE A SIMULAÇÃO

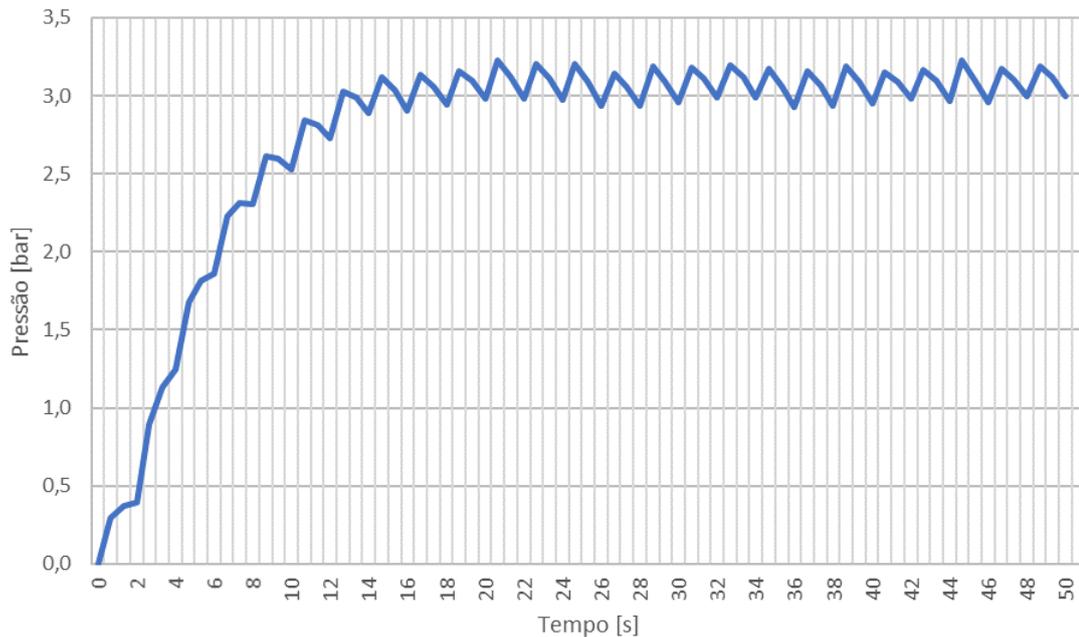


FONTE: O autor (2021).

Para o formato de onda considerado, o valor máximo alcançado é de 3,248 bar. O comportamento cíclico de elevação e decaimento se dá pelo fato de existir um circuito hidráulico fechado, ou seja, durante o período em que o cilindro avança, não é gerado pressão, porém, as partes internas do mesmo são preenchidas pelo fluido hidráulico utilizado em todo o sistema. Neste caso, quanto maior o número de cilindros trabalhando em conjunto e em momentos diferenciados de onda, há uma tendência de estabilização de pressão nesta linha de alta pressão.

A FIGURA 55 apresenta a pressão gerada (ou acumulada) no acumulador hidráulico durante os testes de validação no tanque de ondas. O valor médio máximo da pressão no acumulador é de 3,225 bar. O comportamento da variação de pressão se dá pelo fato da utilização de uma válvula de esferas manual na saída do acumulador, portanto, os patamares apresentados permitem concluir sobre a possibilidade do controle de pressão na linha de alta pressão do circuito hidráulico, bastando a utilização de uma válvula de controle proporcional.

FIGURA 55 – PRESSÃO GERADA NO ACUMULADOR HIDRÁULICO DURANTE OS TESTES NO TANQUE DE ONDAS



FONTE: O autor (2021).

Estes resultados de pressão máxima alcançados durante a simulação (3,248 bar) e o teste de validação (3,225 bar) indicam uma variação de 0,7 %. Essa diferença pode ser motivada por perda de cargas dos componentes hidráulicos utilizados na montagem física, bem como desgastes prematuros dos componentes de vedação do próprio cilindro hidráulico.

Os resultados são bastante atrativos, considerando que circuitos hidráulicos construídos com a utilização de componentes em escala reduzida são pouco aplicados comercialmente, então, possuem características construtivas complexas para uma aplicação deste tipo. Portanto, sistemas maiores, que se utilizem de componentes de mercado (válvulas de fluxo, direcionais, motor hidráulico e o próprio cilindro hidráulico), possuem características construtivas mais adequadas para este tipo de aplicação.

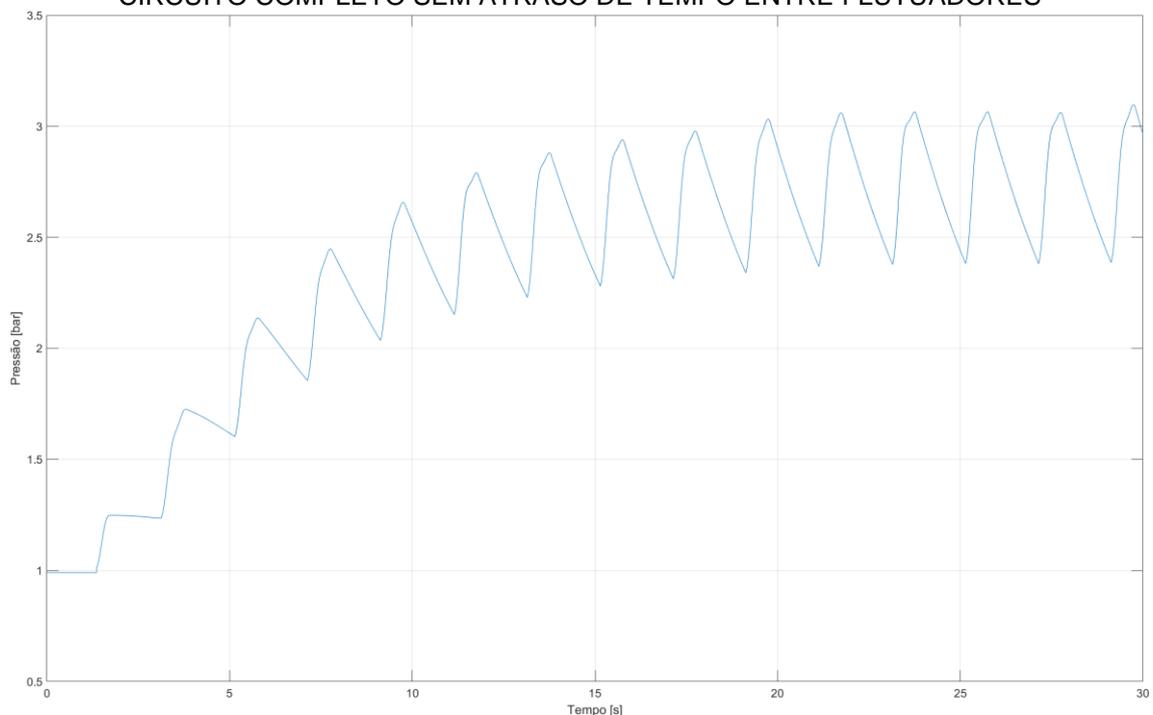
A pressão no acumulador é um ponto bastante importante neste tipo de sistema de tomada de força, pois será responsável por armazenar e reduzir às oscilações de pressão no circuito hidráulico de alta pressão, que permitirá que o motor hidráulico opere em condições próximas às nominais, principalmente, por manter a pressão constante sobre o mesmo. Desta forma, quando conectado à um gerador de energia elétrica, tais flutuações não provocarão oscilações de rotação e torque, de

maneira que a energia elétrica final esteja dentro de níveis adequados à rede elétrica em que será conectada.

Com o modelo do circuito hidráulico validado através da comparação de pressão máxima alcançada no acumulador de alta pressão, é possível utilizar o modelo completo, com 10 conjuntos de PTO para simulações funcionais.

A FIGURA 56 apresenta a pressão alcançada no acumulador hidráulico durante o período de simulação para o conjunto completo, considerando que não há nenhum atraso de tempo entre o movimento dos 10 flutuadores, ou seja, todos os cilindros fornecem pressão ao mesmo tempo para o circuito hidráulico de alta pressão.

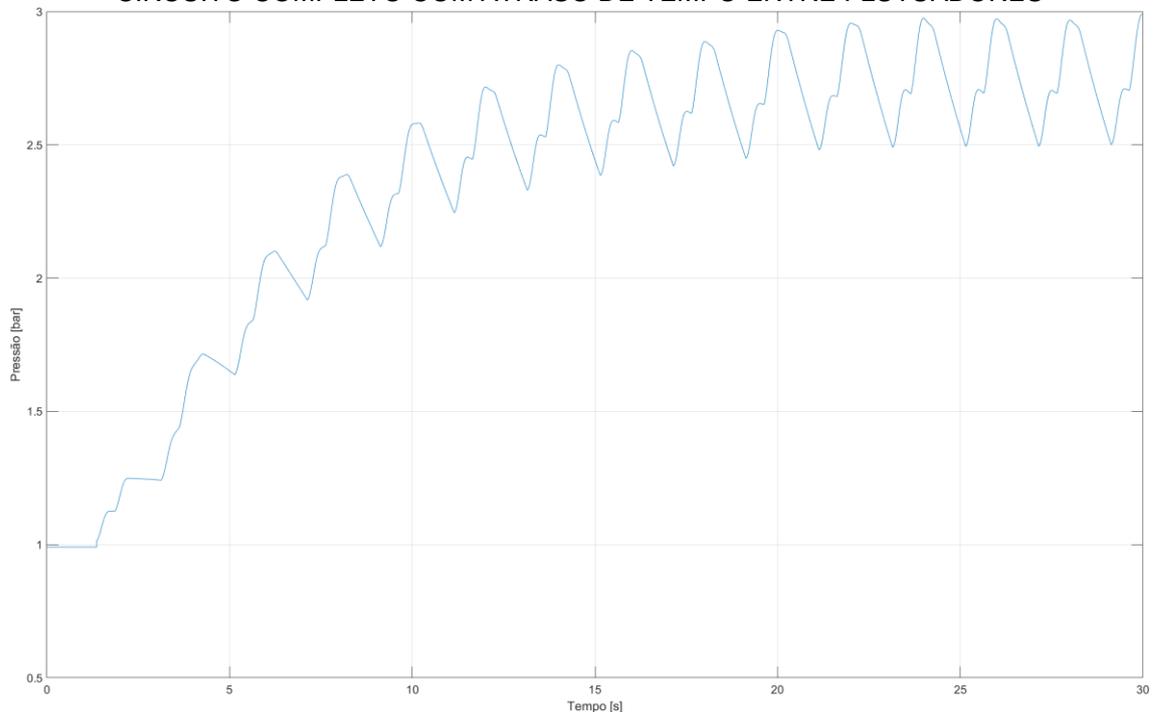
FIGURA 56 – PRESSÃO GERADA NO ACUMULADOR HIDRÁULICO DURANTE A SIMULAÇÃO: CIRCUITO COMPLETO SEM ATRASO DE TEMPO ENTRE FLUTUADORES



FONTE: O autor (2021).

Na prática, em função de como a embarcação estará posicionada em relação ao movimento das ondas, esta característica de operação em que os flutuadores se movimentam igualmente ao mesmo tempo é muito pouco provável. Desta forma, o modelo do circuito hidráulico permite criar situações de operação variáveis. Por exemplo, a FIGURA 57 apresenta a pressão alcançada no acumulador hidráulico durante o período de simulação para o conjunto completo, considerando que há um atraso de 0,5 s entre um lado da embarcação (5 PTOs atuando ao mesmo tempo) e o outro (5 PTOs atuando ao mesmo tempo).

FIGURA 57 – PRESSÃO GERADA NO ACUMULADOR HIDRÁULICO DURANTE A SIMULAÇÃO: CIRCUITO COMPLETO COM ATRASO DE TEMPO ENTRE FLUTUADORES



FONTE: O autor (2021).

Comparando a FIGURA 56 (primeiro caso) com a FIGURA 57 (segundo caso), observa-se que após a estabilização (depois de 20 s iniciais da simulação) a pressão média no acumulador é de aproximadamente 2,75 bar, em ambos os casos. Contudo, é possível observar que a flutuação em torno deste valor é reduzida no segundo caso. Isto se deve pelo fato de que a movimentação dos cilindros durante a elevação de pressão no circuito de alta pressão está defasada, fazendo com que o sistema tenha um melhor aproveitamento de acúmulo de energia.

Por fim, o resultado principal do trabalho é a observação da possibilidade de conversão de até 18,06 W de potência pelo PTO hidráulico proposto para uma onda com potência média disponível de 40,32 W/m. O valor de 18,06 W de potência convertida não é constante, devido ao próprio princípio de funcionamento do sistema com PTO hidráulico. Contudo, sua utilização em conjunto, no formato de um sistema multicorpo, permite que flutuações na conversão de energia sejam minimizadas, melhorando a eficiência de todo o conjunto.

6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A fundamentação teórica realizada neste trabalho permitiu a compreensão dos diversos tipos de sistemas de geração de energia ondomotriz, bem como as características funcionais, de aplicação e dificuldades de cada um deles. Em especial, para os sistemas que possuem o PTO do tipo hidráulico, os trabalhos correlatos abordados trouxeram significativos aspectos para a construção de um modelo de sistema que possa ser concebido, prototipado, testado num ambiente de simulação e validado em campo ou laboratório.

Neste contexto e aliado aos objetivos da aplicação deste trabalho, o desenvolvimento de um projeto de P&D para geração de energia ondomotriz para ambientes *nearshore*, buscou-se elaborar um circuito hidráulico que permita a captação de energia das ondas através de dispositivos flutuantes multicorpos.

O objetivo principal deste trabalho foi o desenvolvimento de um modelo computacional multiparâmetros visando a avaliação do comportamento hidráulico para geração de energia ondomotriz em dispositivos flutuantes multicorpos.

Neste sentido, baseando-se no modelo reduzido de balsa para geração de energia ondomotriz do projeto de P&D vinculado, elaborou-se um modelo computacional onde o usuário pode configurar diversos tipos de parâmetros associados à otimização de componentes e desenvolvimento de novos dispositivos. Assim, no modelo criado, pode-se alterar, por exemplo, o diâmetro da tubulação do circuito hidráulico, perda de carga de válvulas, parâmetros do fluido hidráulico, proposição de variações construtivas de alguns componentes como o motor hidráulico, entre outros.

Para validação deste modelo computacional, testes da parte principal do circuito hidráulico, o PTO hidráulico, foram conduzidos de forma prática, num tanque de ondas costeiras. Os resultados obtidos nestes testes foram significativos e demonstram que o modelo computacional elaborado permite desenvolver simulações do comportamento real de todo o conjunto, reduzindo perdas financeiras associadas ao tempo de execução de projeto, fabricação e testes, bem como a elaboração e aquisição de novos componentes.

Além disso, de forma que os dados de entrada para a simulação sejam os mais próximos dos tipos de ondas possíveis de serem gerados num tanque de ondas, o modelo permite a integração com sistemas de simulação fluido mecânicas.

A utilização do software MATLAB e sua ferramenta de simulação Simulink, com suas bibliotecas Simscape e Simscape Fluids, permitem estudos extremamente complexos, colaborando com a inovação científica e contribuição acadêmica em diversas áreas, neste caso, em especial, a de energia renovável. Além disso, permitem o desenvolvimento de um sistema comercial para parametrização de um PTO hidráulico, na forma de um aplicativo.

As limitações no desenvolvimento deste trabalho são:

- A utilização de sistemas flutuantes multicorpos associados à cilindros hidráulicos para pressurização de uma linha de alta pressão em circuito fechado;
- Validação do modelo computacional até o ponto de aplicação de carga, pelo fato de utilizar um tanque de ondas costeiras de dimensões reduzidas e da utilização de um protótipo em modelo reduzido.

Como temas para trabalhos futuros, destacam-se:

- Validar o modelo completo da balsa num tanque de ondas costeiras de maior capacidade;
- Utilizar bibliotecas adicionais para simulação da integração do sistema com visualização de movimentação tridimensional (através da utilização das bibliotecas Simscape Multibody e Simscape 3D Animation) e conversão de energia elétrica (através da utilização da biblioteca Simscape Electrical);
- Elaborar um sistema de controle baseado na realimentação de dados como pressão no acumulador, vazão do sistema e características operacionais do motor hidráulico.

REFERÊNCIAS

ABDELKHALIK, O.; DARANI, S. Optimization of nonlinear wave energy converters. **Ocean Engineering**, v. 162, n. January, p. 187–195, 2018. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.05.023>>. .

ADERINTO, T.; LI, H. Ocean Wave energy converters: Status and challenges. **Energies**, v. 11, n. 5, p. 1–26, 2018.

ANDERLINI, E.; FOREHAND, D. I. M.; BANNON, E.; ABUSARA, M. Reactive control of a wave energy converter using artificial neural networks. **International Journal of Marine Energy**, v. 19, p. 207–220, 2017. The Authors. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijome.2017.08.001>>. .

ANDERLINI, E.; FOREHAND, D. I. M.; BANNON, E.; XIAO, Q.; ABUSARA, M. Reactive control of a two-body point absorber using reinforcement learning. **Ocean Engineering**, v. 148, n. June 2017, p. 650–658, 2018. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.08.017>>. .

AQUA-RET. Wave Technologies. Disponível em: <<https://aquaret.com/>>. Acesso em: 25/4/2020.

ASSIS, L. E. DE. **Avaliação e aproveitamento da energia de ondas oceânicas no litoral do Rio Grande do Sul**, 2010. UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BABARIT, A.; DUCLOS, G.; CLÉMENT, A. H. Comparison of latching control strategies for a heaving wave energy device in random sea. **Applied Ocean Research**, v. 26, n. 5, p. 227–238, 2004.

BABARIT, A.; GUGLIELMI, M.; CLÉMENT, A. H. Declutching control of a wave energy converter. **Ocean Engineering**, v. 36, n. 12–13, p. 1015–1024, 2009. Pergamon.

BURGAÇ, A.; YAVUZ, H. Fuzzy Logic based hybrid type control implementation of a heaving wave energy converter. **Energy**, v. 170, p. 1202–1214, 2019. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.090>>. .

CALEJO, P. J. P. **Sistema conversor de energia das ondas do mar**, 2012. Universidade de Aveiro.

DING, B.; CAZZOLATO, B. S.; ARJOMANDI, M.; HARDY, P.; MILLS, B. Sea-state based maximum power point tracking damping control of a fully submerged oscillating buoy. **Ocean Engineering**, v. 126, p. 299–312, 2016. Pergamon.

ESPINDOLA, R. L. **Mapeamento de sites com potencial para geração de energia ondomotriz por meio de análise de decisão multicritério**, 2017. Universidade Federal de Pernambuco.

FAEDO, N.; OLAYA, S.; RINGWOOD, J. V. Optimal control, MPC and MPC-like algorithms for wave energy systems: An overview. **IFAC Journal of Systems and Control**, v. 1, p. 37–56, 2017.

FALCÃO, A. F. D. O. Wave energy utilization: A review of the technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 3, p. 899–918, 2010.

FALNES, J. **Ocean Waves and Oscillating Systems: Linear Interactions Including Wave-Energy Extraction**. 1ª ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.

FELIX, A.; HERNÁNDEZ-FONTES, J. V.; LITHGOW, D.; et al. Wave energy in tropical regions: Deployment challenges, environmental and social perspectives. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 7, n. 7, 2019.

FLEMING, F. P. **Avaliação Do Potencial De Energias Oceânicas No Brasil**, 2012. UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.ppe.ufrj.br/images/publicações/mestrado/Fernanda_Pereira_Fleming.pdf> . .

FOLLEY, M.; ALVES, M.; CAUSON, D.; et al. **Numerical Modelling of Wave Energy Converters: State-of-the-Art Techniques for Single Devices and Arrays**. 1ª ed. London: Elsevier, 2016.

GARCIA-ROSA, P. B.; CUNHA, J. P. V. S.; LIZARRALDE, F.; et al. Wave-to-wire model and energy storage analysis of an ocean wave energy hyperbaric converter. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, v. 39, n. 2, p. 386–397, 2014.

GASPAR, J. F.; CALVÁRIO, M.; KAMARLOUEI, M.; GUEDES SOARES, C. Power take-off concept for wave energy converters based on oil-hydraulic transformer units. **Renewable Energy**, v. 86, p. 1232–1246, 2016. Pergamon.

GHODRATI, A. RASHID, A. Modelling and simulation of a power take-off in connection with multiple wave energy converters. , , n. June, 2014.

GUNN, K.; STOCK-WILLIAMS, C. Quantifying the global wave power resource. **Renewable Energy**, v. 44, p. 296–304, 2012.

HALS, J.; FALNES, J.; MOAN, T. Constrained optimal control of a heaving buoy wave-energy converter. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, v. 133, n. 1, p. 1–15, 2011.

HAN, J.; KITAZAWA, D.; KINOSHITA, T.; MAEDA, T.; ITAKURA, H. Experimental investigation on a cabin-suspended catamaran in terms of motion reduction and wave energy harvesting by means of a semi-active motion control system. **Applied Ocean Research**, v. 83, n. December 2018, p. 88–102, 2019. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.12.003>>. .

HANSEN, A. H.; ASMUSSEN, M. F.; BECH, M. M. Model predictive control of wave energy converter with discrete fluid power take-off system. **Energies**, v. 11, n. 3, 2018.

HANSEN, R. H.; ANDERSEN, T. O.; PEDERSEN, H. C. Model based design of efficient power take-off systems for wave energy converters. **Proc. 12th Scandinavian International Conference on Fluid Power**, v. 1, n. 1, p. 15, 2011.

HONG, Y.; WATERS, R.; BOSTRÖM, C.; et al. Review on electrical control strategies for wave energy converting systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, p. 329–342, 2014. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.053>>. .

IEA, I. E. A. Data and statistics. Disponível em: <<https://www.iea.org/>>. Acesso em: 31/5/2020.

JAMA, M.; WAHYUDIE, A.; NOURA, H. Robust predictive control for heaving wave energy converters. **Control Engineering Practice**, v. 77, n. May 2017, p. 138–149, 2018. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2018.05.010>>. .

JIN, P.; ZHOU, B.; GÖTEMAN, M.; CHEN, Z.; ZHANG, L. Performance optimization of a coaxial-cylinder wave energy converter. **Energy**, v. 174, p. 450–459, 2019.

JUSOH, M. A.; IBRAHIM, M. Z.; DAUD, M. Z.; ALBANI, A.; YUSOP, Z. M. Hydraulic power take-off concepts for wave energy conversion system: a review. **Energies**, v. 12, n. 23, p. 1–23, 2019.

KÅBERGER, T. Progress of renewable electricity replacing fossil fuels. **Global Energy Interconnection**, v. 1, n. 1, p. 48–52, 2018. Elsevier Masson SAS. Disponível em: <<https://doi.org/10.14171/j.2096-5117.gei.2018.01.006>>. .

KHALIGH, A.; ONAR, O. C. **Energy Harvesting: Solar, Wind, and Ocean Energy Conversion Systems**. 1ª ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.

KORDE, U. A. Preliminary consideration of energy storage requirements for sub-optimal reactive control of axisymmetric wave energy devices. **Annual Reviews**

in **Control**, v. 40, p. 93–101, 2015. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.arcontrol.2015.08.004>>. .

KORDE, U. A.; LYU, J.; ROBINETT, R. D.; et al. Constrained near-optimal control of a wave energy converter in three oscillation modes. **Applied Ocean Research**, v. 69, p. 126–137, 2017. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apor.2017.10.004>>. .

LEKUBE, J.; GARRIDO, A. J.; GARRIDO, I. Rotational Speed Optimization in Oscillating Water Column Wave Power Plants Based on Maximum Power Point Tracking. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, v. 14, n. 2, p. 681–691, 2017. IEEE.

LI, L.; YUAN, Z.; GAO, Y. Maximization of energy absorption for a wave energy converter using the deep machine learning. **Energy**, v. 165, p. 340–349, 2018. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.093>>. .

LIU, Z.; QU, N.; HAN, Z.; et al. Study on energy conversion and storage system for a prototype buoys-array wave energy converter. **Energy for Sustainable Development**, v. 34, p. 100–110, 2016.

MARIA-ARENAS, A.; GARRIDO, A. J.; RUSU, E.; GARRIDO, I. Control strategies applied to wave energy converters: State of the art. **Energies**, v. 12, n. 16, 2019.

NIELSEN, K. M.; PEDERSEN, T. S.; ANDERSEN, P.; AMBÜHL, S. Optimizing Control of Wave Energy Converter with Losses and Fatigue in Power Take off. **IFAC-PapersOnLine**, v. 50, n. 1, p. 14680–14685, 2017.

O’SULLIVAN, A. C. M.; LIGHTBODY, G. Co-design of a wave energy converter using constrained predictive control. **Renewable Energy**, v. 102, p. 142–156, 2017. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.034>>. .

OMAR, C. **Estudo de métodos para a conversão da energia das ondas oceânicas**, 2018. Universidade de Lisboa.

PALUDO, R. **Relatório 09 - Projeto executivo de ondogerador para teste em modelo reduzido**. Curitiba, 2021a.

PALUDO, R. **Relatório 06 - Projeto básico do tanque de ondas**. Curitiba, 2021b.

PECHER, A.; KOFOED, J. P.; FOLLEY, M.; et al. **Ocean Engineering & Oceanography - Handbook of Ocean Wave Energy**. 1º ed. Boca Raton, USA:

SpringerOpen, 2017.

RICCI, P.; MENDIA, J. L.; SANTOS-MUGICA, M.; MINGUELA, P. R. Control strategies for a wave energy converter connected to a hydraulic power take-off. **IET Renewable Power Generation**, v. 5, n. 3, p. 234–244, 2011.

RUSU, E.; ONEA, F. A review of the technologies for wave energy extraction. **Clean Energy**, v. 2, n. 1, p. 10–19, 2018.

SENOL, K.; RAESSI, M. Enhancing power extraction in bottom-hinged flap-type wave energy converters through advanced power take-off techniques. **Ocean Engineering**, v. 182, n. April, p. 248–258, 2019. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.04.067>>. .

SONG, J.; ABDELKHALIK, O.; ROBINETT, R.; et al. Multi-resonant feedback control of heave wave energy converters. **Ocean Engineering**, v. 127, n. March, p. 269–278, 2016. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.09.046>>. .

SONG, R.; DAI, Y. M.; QIAN, X. Intermittent wave energy generation system with hydraulic energy storage and pressure control for stable power output. **Journal of Marine Science and Technology (Japan)**, v. 23, n. 4, p. 802–813, 2018. Springer Japan. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s00773-017-0512-4>>. .

SUN, T.; NIELSEN, S. R. K. Stochastic control of wave energy converters for optimal power absorption with constrained control force. **Applied Ocean Research**, v. 87, n. February, p. 130–141, 2019. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.03.002>>. .

TEMIZ, I.; LEIJON, J.; EKERGÅRD, B.; BOSTRÖM, C. Economic aspects of latching control for a wave energy converter with a direct drive linear generator power take-off. **Renewable Energy**, v. 128, p. 57–67, 2018.

TIRON, R.; MALLON, F.; DIAS, F.; REYNAUD, E. G. The challenging life of wave energy devices at sea: A few points to consider. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 1263–1272, 2015. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.105>>. .

WANG, K.; SHENG, S.; ZHANG, Y.; et al. Principle and control strategy of pulse width modulation rectifier for hydraulic power generation system. **Renewable Energy**, v. 135, p. 1200–1206, 2019. Pergamon.

WANG, L.; ISBERG, J.; TEDESCHI, E. Review of control strategies for wave energy conversion systems and their validation: the wave-to-wire approach.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 81, p. 366–379, 2018. Pergamon.

WILSON, D. G.; BACELLI, G.; COE, R. G.; et al. **A comparison of WEC control strategies**. 2016.

WU, J.; YAO, Y.; ZHOU, L.; GÖTEMAN, M. Real-time latching control strategies for the solo Duck wave energy converter in irregular waves. **Applied Energy**, v. 222, n. November 2017, p. 717–728, 2018. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.033>>. .

XIONG, Q.; LI, X.; MARTIN, D.; GUO, S.; ZUO, L. Semi-active control for two-body ocean wave energy converter by using hybrid model predictive control. **ASME 2018 Dynamic Systems and Control Conference, DSCC 2018**, v. 2, p. 1–9, 2018.

ZANDOMENEGO, R.; SCHMIDT, N. L.; D'AQUINO, C. A. Estimativa do potencial para geração de energia elétrica em uma plataforma de pesca no sul de Santa Catarina. **4º Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense**, p. 14, 2015.

ZHAN, S.; WANG, B.; NA, J.; LI, G. Adaptive Optimal Control of Wave Energy Converters. **IFAC-PapersOnLine**, v. 51, n. 29, p. 38–43, 2018. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.466>>. .

ZOU, S.; ABDELKHALIK, O. Control of wave energy converters with discrete displacement hydraulic power take-off units. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 6, n. 2, p. 1–24, 2018.

ZOU, S.; ABDELKHALIK, O.; ROBINETT, R.; et al. Model Predictive Control of parametric excited pitch-surge modes in wave energy converters. **International Journal of Marine Energy**, v. 19, p. 32–46, 2017. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijome.2017.05.002>>. .