

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

RODRIGO SANTOS DA SILVA

**ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DA INSTALAÇÃO DE UMA USINA DE
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA FORMADA POR DISPOSITIVOS COLUNA
DE ÁGUA OSCILANTE (CAO) PARA CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS
MARÍTIMAS NO PORTO DE RECIFE/PE**

Recife
2023

RODRIGO SANTOS DA SILVA

**ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DA INSTALAÇÃO DE UMA USINA DE
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA FORMADA POR DISPOSITIVOS COLUNA
DE ÁGUA OSCILANTE (CAO) PARA CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS
MARÍTIMAS NO PORTO DE RECIFE/PE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica na Universidade Federal de Pernambuco como requisito básico para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. César Augusto Salhua Moreno,
D.Sc

Recife
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Silva, Rodrigo Santos da.

Análise de viabilidade econômica da instalação de uma usina de geração de energia elétrica formada por dispositivos Coluna de Água Oscilante (CAO) para conversão de energia das ondas marítimas no Porto de Recife/PE / Rodrigo Santos da Silva. - Recife, 2023.

94 : il., tab.

Orientador(a): César Augusto Salhua Moreno

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica - Bacharelado, 2023.

1. Energia das Ondas. 2. Dispositivo coluna de água oscilante.. 3. Viabilidade Econômica. 4. Usina de Geração de Energia. I. Moreno, César Augusto Salhua. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)



Universidade Federal de Pernambuco
Departamento de Engenharia Mecânica Centro de
Tecnologia e Geociências- CTG/EEP



ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC2

Ao 30.º dia do mês de dezembro do ano de dois mil e vinte e dois, às 10:00 horas, de forma virtual através da plataforma google meet, reuniu-se a banca examinadora para a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, intitulado **Análise de viabilidade econômica da instalação de uma usina de geração de energia elétrica formada por dispositivos coluna de água oscilante (CAO) para conversão de energia das ondas marítimas no porto de Recife/PE**, elaborado pelo aluno **Rodrigo Santos da Silva**, matrícula 104.598.164/89, composta pelos avaliadores Prof. **Cesar Augusto Salhua Moreno** (orientador), Prof. **Miguel Angels Celis Carbajal** (avaliador) e Profa. **Paula Suemy Michima Arruda** (avaliadora). Após a exposição oral do trabalho, o candidato foi arguido pelos componentes da banca que em seguida reuniram-se e deliberaram pela sua Aprovação, atribuindo-lhe a média 9,6, julgando-o apto() / inapto() à conclusão do curso de Engenharia Mecânica. Para constar, redigi a presente ata aprovada por todos os presentes, que vai assinada pelos membros da banca.

Orientador: Prof. Cesar Augusto Salhua Moreno Nota: 9,70

Assinatura

Avaliador Prof. Miguel Angels Celis Carbajal Nota: 9,50

Interno:

Assinatura

Avaliadora Profa. Paula Suemy Michima Arruda Nota: 9,70

Interna:

Assinatura

Recife, 30 de dezembro de 2022.

Prof. Marcus Costa de Araújo
Coordenador de Trabalho de Conclusão de curso - TCC
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica – CTG/EEP-UFPE

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que é Pai e Filho e Espírito Santo, minha razão de viver sem o qual eu nada seria, e pela intercessão de Nossa Senhora do Bom Conselho em minha caminhada.

Aos meus pais, José Roberto e Markezia, por toda dedicação e apoio para que aqui eu pudesse chegar. Ao meu irmão Vinícius pelo companheirismo e à Ana Cristina por todo carinho e cumplicidade que me ajudam a seguir em frente com mais alegria e leveza em minha vida.

Ao Professor Cesar Salhua pela sua solicitude ímpar nos direcionamentos e contribuições para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Antonio Carlos Fernandes da UFRJ por disponibilizar a utilização do *software WAMIT* para realizar as simulações numéricas do presente trabalho.

Ao corpo docente do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco por todo conhecimento disseminado para a formação de grandes profissionais de engenharia mecânica, que contribuem fortemente com o desenvolvimento do País.

RESUMO

O presente trabalho consiste na avaliação preliminar da viabilidade econômica da instalação de uma usina de geração de energia elétrica, formada por dispositivos de conversão de energia das ondas marítimas do tipo coluna d'água oscilante (CAO), no quebra-mar do Porto do Recife, em Pernambuco. A metodologia adotada caracteriza as ondas do mar na região do quebra-mar, utilizando o banco de dados SMC-Brasil, disponível para fins de estudos, com valores mais prováveis distribuídos em torno de um período de pico (T_p) de 7,4 segundos e altura significativa (H_s) de 1,3 metros. Estas informações são organizadas para formar uma matriz de ondas, na qual as alturas significativas destas são representadas em função do seu período de pico. Posteriormente, a capacidade de conversão de energia dos dispositivos CAO é determinada utilizando simulação no software comercial *WAMIT*, resultando em uma matriz de potência de um dispositivo, a qual totaliza a potência gerada de 28,24 kW que, para suprir a demanda do porto, devem ser consideradas oito estruturas, totalizando uma potência instalada de 225,9 kW, para uma produção anual de energia (PAE) de 1682,1 MWh/ano com uma disponibilidade operacional de 85%. Por outra parte, os custos envolvidos no empreendimento, como Capital de Investimento (CAPEX), operacionais e de manutenção ao longo da vida útil (OPEX) são levantados a partir de projetos similares, formulações e metodologias de projeto disponíveis em literatura especializada. A viabilidade econômica do projeto foi analisada através de indicadores econômicos obtidos a partir do fluxo de caixa entre o preço da energia produzida e os custos necessários para manter esta produção ao longo de uma vida útil de 20 anos. Uma taxa interna de retorno (TIR) de 13% é usada como referência, baseada em opções de títulos públicos brasileiros, para uma taxa minimamente atrativa (TMA) de 14% ser estimada para investidores. O valor do custo nivelado de energia (LCOE) foi de R\$ 6,76 por KWh, custando em torno de dez vezes mais do que outras opções de geração ascendentes no país. Para o projeto ser custeado necessitaria de um preço de energia (receita) pouco acima de 7,50 R\$/kWh que levaria a um Valor Presente Líquido (VPL) de R\$ 8.188.705 reais, porém oito a nove vezes maior do que a taxa de energia elétrica cobrada anualmente ao consumidor cativo – o que é impraticável economicamente no estado atual deste tipo de tecnologia.

Palavras-chave: Energia das ondas; Dispositivo coluna de água oscilante; Viabilidade econômica; Usina de geração de energia.

ABSTRACT

The present work consists of the preliminary assessment of the economic viability of the installation of an electric power generation plant, formed by devices for the conversion of energy from sea waves of the oscillating water column type (CAO), on the breakwater of the Port of Recife, in Pernambuco. The adopted methodology characterizes the sea waves in the breakwater region, using the SMC-Brazil database, validated and available for study purposes, with most likely values distributed around a peak period (T_p) of 7.4 seconds and significant height (H_s) of 1.3 meters. This information is organized to form a wave matrix, in which the significant heights of these waves are represented as a function of their peak period. Subsequently, the energy conversion capacity of the CAO devices is determined using the WAMIT commercial software, resulting in a power matrix of a device, which totals the generated power of 28,24 kW that, to supply the port demand, must be considered eight structures, totaling an installed capacity of 225,9 kW, for an annual energy production (AEP) of 1682,1 MWh/year with an operational availability of 85%. On the other hand, the costs involved in the development, such as Capital Expenditure (CAPEX), operational and maintenance costs throughout the useful life (OPEX) are raised from similar projects, formulations and project methodologies available in specialized literature. The economic assessment of the project was analyzed through economic indicators obtained from the cash flow between the price of the energy produced and the costs necessary to maintain this production over a useful life of 20 years. An internal rate of return (IRR) of 13% is used as a reference, based on Brazilian government bonds, to estimate a minimum acceptable rate of return (MARR) of 14% for investors. The value of the leveled cost of energy (LCOE) was R\$ 6.76 per kWh, costing around ten times more than other upstream generation options in the country. For the project to be funded, it would need an energy price (revenue) just above 7,50 R\$/kWh, which would lead to a Net Present Value (NPV) of R\$ 8,188,705, but eight to nine times higher than the electricity tariff billed annually to captive consumers – which is impracticable from the economic actual technological state.

Keywords: Wave Power; Oscillating Water Column converter; Economic viability; Power plant.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tipos de dispositivos de conversão de energia das ondas. À esquerda o Coluna D'água Oscilante, no centro o de Corpo Oscilante e à direita o tipo Overtopping	16
Figura 2 - Princípio de funcionamento de um dispositivo Coluna D'água Oscilante fixo	17
Figura 3 - Primeira versão de conversor de energia via coluna d'água oscilante; o <i>Whistling Buoy</i> , patenteado por Courtney em 1876	17
Figura 4 – Usina CAO em Toftestallen (500 kW) na Noruega	19
Figura 5 – Usina Belfast (capacidade 75 kW) para estudo na Ilha de Islay, Escócia	20
Figura 6 - Montagem da Usina de Ondas <i>LIMPET</i> (500 kW) na Ilha de Islay, na Escócia	21
Figura 7 – Usina de Pico (400 kW), Portugal	22
Figura 8 – Usina de Pico em colapso em abril de 2018.....	22
Figura 9 - Usina de ondas do tipo CAO, em operação no quebra-mar do Porto da baía de Mutriku, Espanha	23
Figura 10 - Usina de CAO <i>REWEC3</i> sendo construída no porto de Civitavecchia, na Itália.....	24
Figura 11 – Ilustração em corte longitudinal da estrutura experimental de um CAO em escala reduzida com topo aberto.....	25
Figura 12 - CAO em laboratório	26
Figura 13 - Modelo de CAO utilizado para simulação numérica de Freeman	27
Figura 14 – Fluxograma de cálculos econômicos para o modelo GIS de obtenção do LCOE ..	29
Figura 15 - Espectros de onda de Pierson-Moskowitz para várias velocidades de vento	32
Figura 16 - Esquemático das dimensões da onda do mar	35
Figura 17 - Esquemático do funcionamento de um dispositivo CAO.....	36
Figura 18 - Ilustração do conceito de uma turbina de fluxo axial tipo <i>Wells</i>	37
Figura 19 - Diagrama de Corpo Livre na seção transversal das pás de uma turbina tipo <i>Wells</i>	38
Figura 20 - Fluxograma da Metodologia	42
Figura 21 - Estrutura do SMC Brasil	43
Figura 22 – Interface da escolha de região de pontos de onda no programa SMC-Brasil	44
Figura 23 - Fotografia da CAO instalada em Pico, Portugal	45
Figura 24 - Turbina <i>Wells</i> instalada na usina de Pico, Portugal	46
Figura 25 – Curva do coeficiente de vazão em função do coeficiente de pressão	51
Figura 26 – Curva do coeficiente de potência em função do coeficiente de pressão	51
Figura 27 - Matriz de potência exemplo para um dispositivo CAO	54
Figura 28 - Fatores de capacidade de diversas fontes de energia.....	55

Figura 29 – Modelagem do cilindro CAO para simulação pelo método dos painéis.....	60
Figura 30 – Gráfico comparativo de elevação da coluna d'água RAO simulado sem amortecimento (azul); amortecido (laranja) e experimental amortecido da literatura (verde)	61
Figura 31 – Gráfico comparativo sobre o RAO da elevação da coluna de água, experimental e numérica com amortecimento.....	61
Figura 32 – Gráfico comparativo sobre o RAO da pressão no interior da câmara da coluna de água, experimental e numérica com amortecimento	62
Figura 33 – Gráfico comparativo sobre o RAO de Potência PTO do interior da câmara da coluna de água, experimental e numérica com amortecimento	62
Figura 34 – Gráfico comparativo sobre a eficiência de conversão de energia no interior da câmara da coluna de água, experimental e numérica com amortecimento	63
Figura 35 - Curva dos coeficientes de amortecimento experimentais em função da razão entre as áreas do CAO.	65
Figura 36 - Regressão exponencial baseada em dados experimentais.....	65
Figura 37 - Gráfico comparativo entre a curva de RAO da elevação da coluna de água oscilante de Freeman (2015) e os resultados obtidos no presente trabalho utilizando o WAMIT sem amortecimento.....	66
Figura 38 - Gráfico comparativo entre a curva de RAO da elevação da coluna de água oscilante de Freeman (2015) e os resultados obtidos no presente trabalho utilizando o WAMIT com amortecimento de 400ton/s	67
Figura 39 - Gráfico comparativo entre a curva de RAO da pressão na câmara da coluna de água oscilante de Freeman (2015) e os resultados obtidos no presente trabalho utilizando o WAMIT com amortecimento de 400ton/s.....	67
Figura 40 - Prévia da modelagem de uma estrutura para simulação de um CAO	68
Figura 41 - Modelagem da parte submersa da CAO e a sua superfície livre	69
Figura 42 – Resposta para elevação da coluna d'água sem amortecimento para um CAO no Porto do Recife	70
Figura 43 – Resposta para elevação da coluna d'água sem amortecimento (azul) e com amortecimento (laranja) para um CAO no Porto do Recife	71
Figura 44 – Localização exata da coordenada escolhida próxima ao quebra-mar do Porto do Recife	72
Figura 45 - Histograma de frequência de ocorrência da altura significativa de onda.....	72
Figura 46 - Histograma de frequência de ocorrência do período de pico	73
Figura 47 – Potência de uma turbina <i>Wells</i> em função do período de onda incidente para alturas de onda diferentes	74

Figura 48 – Coeficiente de Potência da Turbina <i>Wells</i> em função do período de onda incidente para alturas de onda diferentes	75
Figura 49 - Matriz de capacidade de potência simulada para um dispositivo de conversão de energia das ondas tipo CAO em quilowatts sem sistema de controle.	76
Figura 50 - Matriz de probabilidades de onda para o quebra-mar do Porto de Recife	76
Figura 51 - Matriz de capacidade de potência simulada para um dispositivo de conversão de energia das ondas tipo CAO em quilowatts com sistema de controle.	78
Figura 52 – Gráficos de eficiência do CAO	79
Figura 53 – Fluxograma de Método para análise de viabilidade econômica de projeto	81
Figura 54 - Possível curva de aprendizado para tecnologias de conversão energética das ondas do mar baseado em projetos em andamento	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades Termodinâmicas de cálculo das curvas de desempenho da Turbina Wells	52
Tabela 2 – Resumo da base de cálculo para os Custos Iniciais do projeto	58
Tabela 3 - Resultados de amortecimentos experimentais para uma coluna d'água oscilante sob variação do diâmetro de topo.....	64
Tabela 4 – Dados para cálculo do amortecimento crítico	70
Tabela 5 - Comportamento dos coeficientes de pressão, fluxo e potência.....	77
Tabela 6 – Resumo de dados de produção para uma planta com dois dispositivos CAO no Porto de Recife	80
Tabela 7 - Resumo de custos para uma usina de um dispositivo CAO no Porto do Recife	82
Tabela 8 – Resumo dos dados para estimativa de preço de energia necessário para fornecer receita de retorno	84
Tabela 9 – Variação do VPL e PAYBACK em função do preço de energia.....	85
Tabela 10 – Fluxo de caixa simplificado para o projeto CAO no Porto do Recife	85

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	14
1.1.1	Objetivo Geral	14
1.1.2	Objetivos Específicos	14
1.1.3	Justificativa.....	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	ENERGIA MARÍTIMA.....	15
2.2	DISPOSITIVOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS	16
2.2.1	Dispositivo Coluna D'água Oscilante (CAO).....	17
2.3	SIMULAÇÃO DE UM DISPOSITIVO CAO	24
2.3.1	Simulação de CAO cilíndrico de escala reduzida.....	25
2.3.2	Simulação de um CAO fixo.....	26
2.4	O ASPECTO ECONÔMICO NA ENERGIA MARÍTIMA.....	28
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	31
3.1	ONDAS OCEÂNICAS.....	31
3.2	FORMAÇÃO DAS ONDAS.....	31
3.3	DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL	33
3.4	CARACTERIZAÇÃO ESTATÍSTICA DA ONDA	34
3.4.1	Altura significativa da onda.....	34
3.4.2	Potência teórica de ondas regulares	35
3.5	DISPOSITIVO COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE (CAO)	36
3.6	TURBINA <i>WELLS</i>	37
3.7	PARÂMETROS ECONÔMICOS.....	38
3.7.1	Valor Presente Líquido.....	39
3.7.2	Taxa Interna de Retorno.....	40
3.7.3	Custo normalizado de energia	40
4	METODOLOGIA	41
4.1	CARACTERIZAÇÃO DAS ONDAS MARÍTIMAS.....	42
4.1.1	Sobre o Projeto SMC - Brasil.....	42
4.1.2	Obtenção dos dados estatísticos de onda.....	43

4.2	ASPECTOS TÉCNICOS E CONSTRUTIVOS DO DISPOSITIVO CAO	44
4.2.1	Estrutura e sistema do CAO	44
4.2.2	Turbina Wells	46
4.2.2.1	<i>Modelo de Referência</i>	46
4.3	SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA DE UM DISPOSITIVO CAO	47
4.3.1	Sobre o programa computacional WAMIT	47
4.3.1.1	<i>Pressão Hidrodinâmica</i>	48
4.3.1.2	<i>Elevação da superfície livre da coluna d'água.....</i>	49
4.4	CÁLCULO DE POTÊNCIA DA TURBINA WELLS.....	49
4.4.1	Curvas características da Turbina Wells.....	50
4.4.2	Elaboração da Matriz de Potência.....	52
4.5	DETERMINAÇÃO DA PRODUÇÃO ANUAL DE ENERGIA	54
4.5.1	Parâmetros de entrada.....	54
4.5.2	Fator de Capacidade	55
4.6	ANÁLISE ECONÔMICA	56
4.6.1	Custos Iniciais	57
4.6.2	Custos Operacionais.....	58
4.6.3	Custos de Descomissionamento	58
5	VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA DE DISPOSITIVOS CAO	59
5.1	VALIDAÇÃO PARA UM CAO CILÍNDRICO EM ESCALA REDUZIDA.....	59
5.1.1	Determinação da elevação interna da coluna de água oscilante de um CAO	60
5.1.2	Determinação da equação de amortecimento de uma CAO	63
5.2	VALIDAÇÃO PARA UM CAO FIXO EM MAIOR ESCALA.....	66
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES DO DISPOSITIVO CAO PARA O PORTO DE RECIFE	68
6.1	MODELAGEM DA GEOMETRIA ESTRUTURAL PARA UM DISPOSITIVO CAO	68
6.1.1	Modelagem da geometria da CAO	68

6.1.2	Resultados da simulação hidrodinâmica	69
6.2	CARACTERIZAÇÃO DAS ONDAS MARÍTIMAS NO QUEBRA-MAR DO PORTO DO RECIFE	71
6.3	DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA GERADA POR UMA TURBINA <i>WELLS</i> ACOPLADA A UM CAO PARA O PORTO DO RECIFE	73
6.4	ELABORAÇÃO DA MATRIZ DE POTÊNCIA PARA O PORTO DO RECIFE	75
6.4.1	Matriz de capacidade de potência do CAO	75
6.5	DETERMINAÇÃO DA PRODUÇÃO ANUAL DE ENERGIA (PAE).....	79
6.6	ANÁLISE PRELIMINAR DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	80
6.6.1	Custo Nivelado de Energia (LCOE).....	81
6.6.2	Taxa Mínima Atrativa (TMA).....	83
6.6.3	Taxa Interna de Retorno (TIR)	84
6.6.4	Valor Presente Líquido (VPL)	84
7	CONCLUSÕES	86
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89

1 INTRODUÇÃO

Ao passo que a tecnologia avança no mundo e a necessidade de sustentabilidade do planeta se tornam mais evidentes, a diversidade de fontes energéticas limpas para eletricidade tem vindo mais e mais à tona. A energia das ondas oceânicas tem sido estudada cada vez mais, assim como recebido investimentos a fim de suscitar cada vez mais a viabilidade econômica de dispositivos que possam ser postos em operação no ramo.

Um dos tipos de dispositivo mais estudados é o Coluna de Água Oscilante (CAO), o qual já possui projetos aplicados, ainda com potência instalada muito menor em relação a soluções amplamente crescentes no mundo - como conversão de energia solar e eólica, mas demonstrando evolução e consequentemente gerando mais fontes de conhecimentos técnicos, tendendo a superar melhor e com menos custos os desafios de implantação e operação.

Utilizando-se dados característicos do mar no local, assim como de uma simulação de dados de conversão energética de um dispositivo CAO, obtém-se a Produção Anual de Energia (PAE) e posteriormente através de métricas de análise econômica como o *LCOE*, *VPL* e Taxa Interna de Retorno, pode-se verificar o impacto desses parâmetros na viabilidade econômica. Com isso, é possível ter uma perspectiva para auxiliar na tomada de decisão voltada para investimentos, e somadas a isso questões relacionadas à política energética e à expansão das fontes renováveis na matriz energética brasileira.

Neste trabalho o Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica da energia das ondas, formas de simulação de conversão desta energia e formas de análise de viabilidade econômica. O Capítulo 3 apresenta os fundamentos teóricos aplicados ao trabalho. O Capítulo 4 apresenta a metodologia de simulação e cálculo de viabilidade assim como os dados de entrada para tal. No Capítulo 5 é mostrada a validação do método para a simulação a ser realizada para a conversão de energia das ondas no Porto do Recife. O Capítulo 6 traz os resultados e as discussões levantadas, seguido do Capítulo 7 com as conclusões do trabalho.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

A metodologia aplicada neste estudo tem o objetivo de avaliar a viabilidade econômica de uma usina de geração de energia elétrica a partir da energia das ondas baseado em bibliografias de projetos já existentes, utilizando dispositivos do tipo Coluna D'água Oscilante (CAO), instalados na localização geográfica do Porto do Recife, em Pernambuco.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Realizar a simulação computacional para obter a movimentação da coluna d'água oscilante de um dispositivo CAO, formado por uma câmara com conexão ao mar; utilizando um software comercial;
- Verificar o efeito do amortecimento viscoso na movimentação da coluna d'água para o funcionamento de um dispositivo Coluna D'água Oscilante;
- Modelar e simular a produção de energia para as condições do local de instalação;
- Avaliar a viabilidade econômica do empreendimento utilizando o *LCOE*, Valor Presente Líquido e Taxa Interna de Retorno considerando suprir o consumo energético do Porto do Recife.

1.1.3 Justificativa

Existem poucos estudos que utilizam a abordagem de viabilidade econômica para energia das ondas no Brasil, uma vez que a grande maioria deles se concentra apenas na avaliação do recurso energético disponível em diferentes localidades. Projetos com dispositivos CAO têm passado a receber mais investimentos, dando indícios de um aumento da taxa de evolução da tecnologia e possivelmente tornando-se uma realidade futura para países com ampla extensão costeira como o Brasil.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Mesmo que embrionária em termos de capacidade instalada no mundo, a energia do mar não deixa de despertar interesse de estudiosos e organizações da área de engenharia oceânica, dentre eles aqueles empenhados no estudo econômico para a implantação de projetos, pois estes indicadores são os que inevitavelmente viabilizam projetos. A seguir será apresentado um histórico de projetos que foram desenvolvidos no ramo; referências de simulação para cálculos de potência de dispositivos e aspectos financeiros para estes projetos.

2.1 ENERGIA MARÍTIMA

O mundo possui hoje uma capacidade instalada de aproximadamente 530 MW em dispositivos para conversão de energia do mar, metade proveniente do continente europeu (IRENA, 2021). Esta energia apresenta-se em diversas formas: movimento periódico das marés, movimento das ondas, hidrocínética – seja por corrente marinha ou fluxo de maré, energia térmica, e de gradiente salino. Aproximadamente 0,02% da energia contida nos oceanos seria capaz de atender a atual demanda mundial por energia elétrica (AMUNDARAIN *et al.*, 2021). Estima-se uma potência disponível global em torno de 2,7 TW nas ondas do mar (PECHER *et al.*, 2017).

Aos poucos, vários investimentos têm sido realizados neste setor mundialmente. Segundo dados de financiamentos globais disponíveis no site (IRENA, 2020), entre 2013 e 2018 foram investidos em torno de USD 270 milhões na implantação de projetos, uma média de USD 45 milhões por ano. Em 2021, o governo federal dos Estados Unidos da América anunciou investimentos de no mínimo 27 milhões de dólares em desenvolvimentos de projetos (FRANGOUL, 2021), além de aproximadamente USD 9 milhões em projetos no Reino Unido (UK RESEARCH AND INNOVATION, 2021), valores que ainda estão muito distantes das mais populares energias solar e eólica, no entanto dão evidência do interesse presente.

No que diz respeito ao Brasil, a matriz elétrica tem mostrado uma forte tendência de diversificação nos últimos dez anos. A geração em hidrelétricas ainda prevalece, não obstante com participação de 81% para cerca de 65% em 2020 (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2021); destaque para o forte crescimento da capacidade instalada de energia solar e eólica dispostas em grandes parques ou por

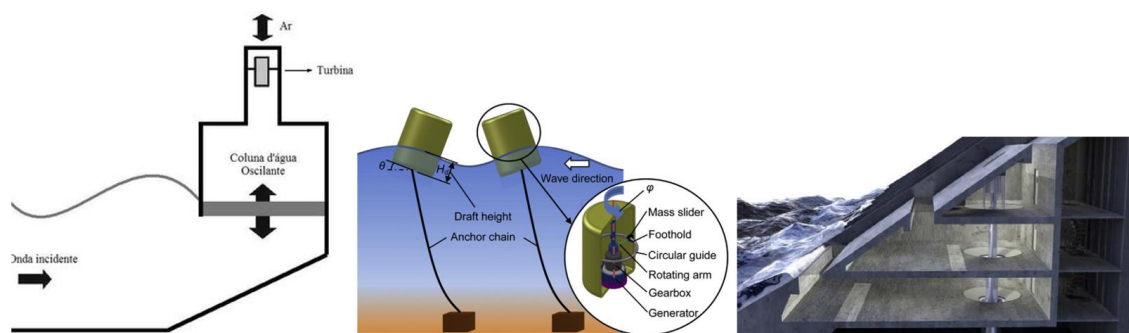
mini e microgeração distribuída, além do crescimento mais gradativo do uso de outras fontes alternativas como a biomassa e o biogás.

Tendo em vista este desenrolar de oportunidades significativas, a grande extensão do litoral do Brasil não passa despercebida com seus mais de 7.400 km. Foi estimada uma potência disponível de aproximadamente 114 GW na costa brasileira, considerando como energias primárias apenas a maremotriz e a ondomotricidade (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2020).

2.2 DISPOSITIVOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS

Concentrando-se na energia proveniente do movimento das ondas, existem vários tipos de dispositivos que podem ser utilizados para superar os desafios tecnológicos de aproveitamento dessa energia. Entre a boa variedade desenvolvida nas últimas décadas, podem-se mencionar aos dispositivos de coluna de água oscilante (CAO) (FALCÃO; HENRIQUES, 2016), sistemas de corpo oscilante (CHEN *et al.*, 2019), conversores *Overtopping* (OLIVEIRA *et al.*, 2016), como mostrado na Figura 1, entre outros.

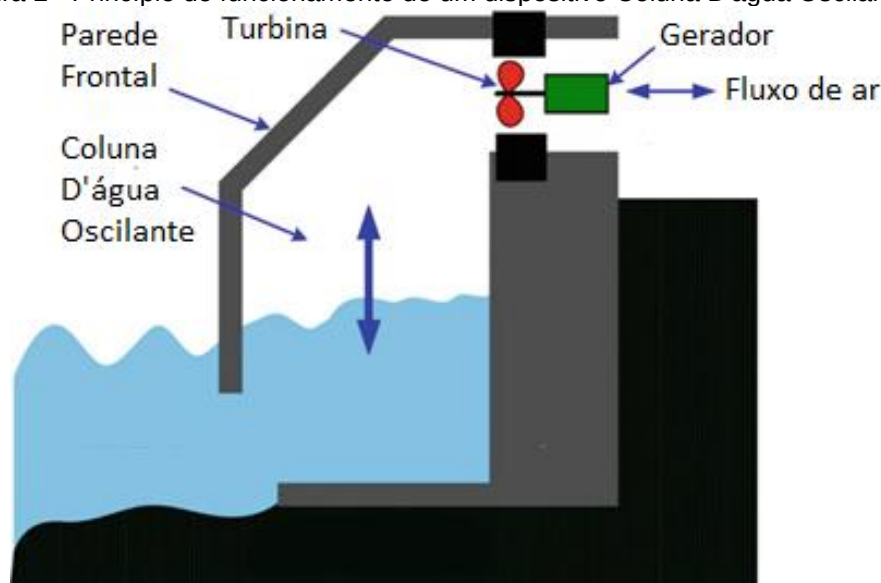
Figura 1 - Tipos de dispositivos de conversão de energia das ondas. À esquerda o Coluna D'água Oscilante, no centro o de Corpo Oscilante e à direita o tipo *Overtopping*



Fonte: adaptado de Delmonte *et al.* (2016)

Os dispositivos CAO compõem um tipo de dispositivos de conversão bem-sucedidos até o momento. São instalados na linha costeira e consistem em uma câmara vazia parcialmente submersa aberta para o mar abaixo da superfície livre e uma turbina de ar. A ação das ondas excita a coluna d'água dentro da câmara, que oscila verticalmente, forçando o ar acima a fluir alternadamente para dentro e para fora da câmara e, no processo, acionando a turbina (Figura 2).

Figura 2 - Princípio de funcionamento de um dispositivo Coluna D'água Oscilante fixo



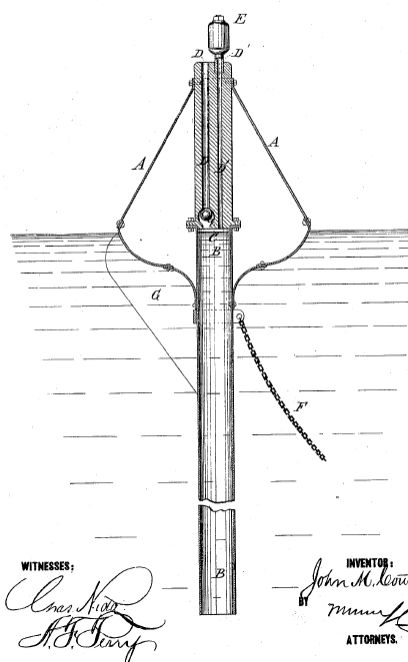
Fonte: adaptado de Delmonte et al. (2016)

2.2.1 Dispositivo Coluna D'água Oscilante (CAO)

A primeira aplicação registrada de conversão da energia das ondas por meio de uma CAO ou OWC (Oscillating Water Column) foi o *Whistling Buoy*, usada como um auxílio na navegação, com função de alerta sonoro. Em resumo, este sinalizador possui um canal vertical em seu interior por onde a água do mar entra por gravidade e forma uma coluna. Logo o movimento oscilatório das ondas do mar que movimentam verticalmente o *Whistling Buoy*, juntamente com válvulas mecânicas direcionais de fluxo, fazem com que a superfície livre da coluna d'água intermitentemente aspire o ar ambiente e posteriormente o comprima contra um apito que fica acoplado no alto, funcionando de forma cíclica. Este dispositivo surgiu no século XIX como um sucessor das tradicionais boias de sino. J. M. Courtenay, de Nova York, patenteou o *Whistling Buoy* (Figura 3) em 1876 e em 1885 havia 34 operando ao longo da costa dos EUA, o que passou a ser modernizado no século XX como fonte de energia para alimentação de luminárias para boias de navegação (HEATH, 2012).

Figura 3 - Primeira versão de conversor de energia via coluna d'água oscilante; o *Whistling Buoy*, patenteado por Courtney em 1876

J. M. COURTENAY.
AUTOMATIC SIGNAL BUOY.
No. 178,911. Patented June 20, 1876.



Fonte: Delmonte et al. (2016)

Na Europa, iniciaram-se em 1973 estudos financiados pelo governo britânico para desenvolver dispositivos de geração de energia das ondas do mar em larga escala, logo após a crise do petróleo. Com isso foi financiado o desenvolvimento de vários tipos de dispositivos, incluindo CAOs (FALCÃO; HENRIQUES, 2016).

O Laboratório Nacional de Engenharia Escocês estudou diferentes conceitos para uma grande planta CAO. Isso convergiu para um projeto que consiste em um conjunto de estruturas, em forma de quebra-mar, cada uma abrigando uma série de CAOs; a essa altura a turbina *Wells* já havia sido inventada. O programa britânico de energia das ondas foi abruptamente encerrado em 1982 sem que nenhum protótipo em tamanho real tivesse sido construído, por conta de limites orçamentários para aquele momento (FALCÃO; HENRIQUES, 2016).

Na Noruega foi instalado em 1985 um CAO integrado em um penhasco em *Toftestallen* (Figura 4). A usina foi equipada com uma turbina *Wells* de eixo vertical e foi nominalmente projetada para ter 500 kW. Nada foi publicado sobre o desempenho da planta, mas se sabia não-oficialmente que estava bem abaixo do esperado. A usina foi destruída em 1988 durante uma tempestade (FALCÃO; HENRIQUES, 2016).

Figura 4 – Usina CAO em Toftestallen (500 kW) na Noruega



Fonte: Delmonte *et al.* (2016)

Em 1991, a Comissão Europeia iniciou o Projeto *JOULE*, voltado para investimento em energias renováveis, e passou a englobar a energia das ondas em seus planos de Pesquisa e Desenvolvimento, o que resultou no investimento para construção de três estruturas fixas CAO de maior porte; duas na Ilha de Islay na Escócia, sendo uma delas um projeto piloto, e outra na Ilha de Pico, em Portugal (FALCÃO; HENRIQUES, 2016).

Figura 5 – Usina Belfast (capacidade 75 kW) para estudo na Ilha de Islay, Escócia



Fonte: Falcão e Henriques (2016)

Figura 5 mostra um modelo que foi construído pela Queen's University Belfast em Islay, Escócia, no ano de 1991, com capacidade nominal de 75 kW para ser um protótipo de estudos da capacidade de potência, assim como para entendimento dos principais desafios de construção e operação. Tal planta chegou a ser conectada à rede e foi desativada em 1999 para o desenvolvimento de uma nova estrutura com maior potência, em uma localização diferente da mesma ilha, desta vez com parcerias privadas atuantes no desenvolvimento e operação (QUEEN'S UNIVERSITY BELFAST, 2002).

Deste modo, como uma continuação do protótipo de Islay, a equipe da *Queen's University Belfast* junto a partes interessadas construiu a planta *LIMPET* (Figura 6), o primeiro modelo comercial de usina de ondas, conectada à rede. Deu início com uma potência nominal estimada de 500 kW, posteriormente reduzida para 250 kW, entrando em operação em 2000 e encerrando as atividades em 2012 (DELMONTE *et al.*, 2016). Aparentemente o projeto foi parado por questões estratégicas, já que a empresa responsável pelos custos de operação da planta, *Wavegen*, foi adquirida em 2005 por uma nova empresa, a *Voith Hydro* (BBC, 2013).

Figura 6 - Montagem da Usina de Ondas *LIMPET* (500 kW) na Ilha de Islay, na Escócia



Fonte: Falcão e Henriques (2016)

Em 1999 entrou em operação a usina de Pico, em Portugal. Com uma potência nominal estimada inicialmente em 400 kW (Figura 7), tinha em contrato dois principais objetivos definidos pela Comissão Europeia: a geração de energia para abastecer parte da ilha e a disponibilização do local para estudos de desenvolvimento da tecnologia (FALCÃO *et al.*, 2020). Tal projeto é visto como uma das referências no ramo de energia das ondas pois passou por diversos projetos de estudo como o *WAVETRAIN* (2004 – 2008), *EQUIMAR* (2008 – 2011), *WAVETRAIN 2* (2008 – 2012), *MARINET* (2011 – 2014), *OCEANET* (2013 – 2016), *MERIKA* (2014 – 2017), que proporcionaram diversos treinamentos, artigos, teses e trabalhos a respeito (FALCÃO *et al.*, 2020).

Figura 7 – Usina de Pico (400 kW), Portugal



Fonte: Falcão e Henriques (2016)

A usina foi desativada em 2018, pois a *WaveEC*, responsável pela operação da planta, tentou angariar fundos para reformas estruturais. Tais tentativas não tiveram sucesso. Uma vez que a usina já tinha contribuído bastante com pesquisas e desenvolvimento, foi tomada em 2017 a decisão de desativá-la em 2018 (FALCÃO *et al.*, 2020). O processo foi acelerado pelo colapso parcial da fundação da estrutura durante uma forte tempestade marítima (Figura 8).

Figura 8 – Usina de Pico em colapso em abril de 2018

Fonte: Falcão *et al.* (2020)

Em 2011 passou a operar a primeira usina de ondas instalada em um quebra-mar, na Baía de Mutriku, Espanha. Ela consiste de 16 câmaras CAO, cada um com uma turbina *Wells*, e a potência nominal é de aproximadamente 300 kW. Nesse tipo de sistema a usina elétrica é integrada a uma estrutura costeira, neste caso um quebra-mar em torno de um porto, que ao mesmo tempo atua como uma proteção costeira. A principal vantagem dessa abordagem é a redução significativa do custo da usina, pois inicialmente já é aproveitada a infraestrutura existente (ligação à rede, vias de acesso, etc.) (DELMONTE *et al.*, 2016). A usina de Mutriku (Figura 9) opera até a atualidade, comandada pela agência de energia *Ente Vasco de la Energía (EVE)*, gerando anualmente a média de 300 MWh, equivalente ao consumido por 100 residências em um ano, batendo a marca de 2 GWh de energia gerada desde sua inauguração (GARANOVIC, 2021).

Figura 9 - Usina de ondas do tipo CAO, em operação no quebra-mar do Porto da baía de Mutriku, Espanha



Fonte: Garanovic (2021)

Atualmente outras usinas CAO estão em processo de desenvolvimento e expansão na região da Calábria, na Itália. Trata-se do projeto *Resonant Wave Energy Converter 3 (REWEC3)*, que estão avançando para construções de CAOs em quebra-mares de portos para torná-los mais eficientes. O projeto é financiado pelo Governo da Calabria, União Europeia e pelo Governo Nacional Italiano. (Plano Nacional de Energia) (F. ARENA *et al.*, 2015).

Atualmente, um dispositivo CAO *REWEC3* está sendo testado em condições reais no porto de Civitavecchia, onde existe um potencial de cerca de 2,5 MW em 124 câmaras independentes, cada uma equipada com um conjunto turbina *Wells* e gerador de cerca de 20 kW (F. ARENA *et al.*, 2015).

Figura 10 - Usina de CAO *REWEC3* sendo construída no porto de Civitavecchia, na Itália



Fonte: Wavenergy.it ([s.d.])

Semelhante aos modelos nos contextos citado anteriormente, existe o Porto do Recife, administrado pelo governo do estado de Pernambuco. Em vista disso, vislumbrando agregar ainda mais valor ao porto e gerar oportunidades de desenvolvimento de projetos e pesquisa, esta localidade foi escolhida para o atual trabalho. Uma contribuição que a longo prazo pode ser útil para todo o litoral brasileiro, gerando impacto socioeconômico com geração de empregos na instalação e operação, assim como diversificação da matriz energética.

2.3 SIMULAÇÃO DE UM DISPOSITIVO CAO

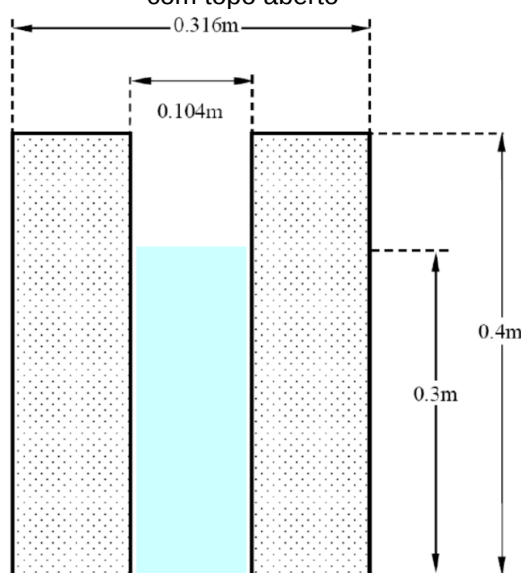
Devido à coluna de água oscilante de uma CAO ser produzida pela diferença de pressões imposta pelas ondas do mar, o desenvolvimento de simulações numéricas deste tipo de dispositivos começou utilizando a teoria potencial. Porém, com esta teoria não é possível representar os efeitos viscosos produzidos entre as paredes da parte inferior da CAO e escoamento da coluna de água oscilante, assim

como a influência da variação de pressões na coluna de água produzida pelo escoamento de ar que passa pela turbina *Wells*. Também não foram considerados os efeitos termodinâmicos do ar, ou seja, o comportamento da pressão interna do ar na câmara e sua relação com o volume específico. Estes efeitos podem produzir diferenças substanciais entre os resultados numéricos e experimentais.

2.3.1 Simulação de CAO cilíndrico de escala reduzida

Um dispositivo CAO com formato cilíndrico genérico foi fabricado e testado em laboratório por (SHENG et. al, 2012) visando um melhor entendimento sobre dispositivos coluna d'água oscilante, bem como fornecimento de dados experimentais para análise, validação hidrodinâmica numérica e para estudos de potência. Foram realizados ensaios num tanque de prova de um modelo em escala reduzida de uma CAO cilíndrica, considerando os casos de CAO flutuando com ancoragem e CAO fixa (SHENG et al., 2012). Assim conseguiu-se resultados experimentais para análise e validação hidrodinâmica, numérica e estudos de potência. O dispositivo foi dimensionado conforme a Figura 11, com a coluna d'água oscilando em seu centro.

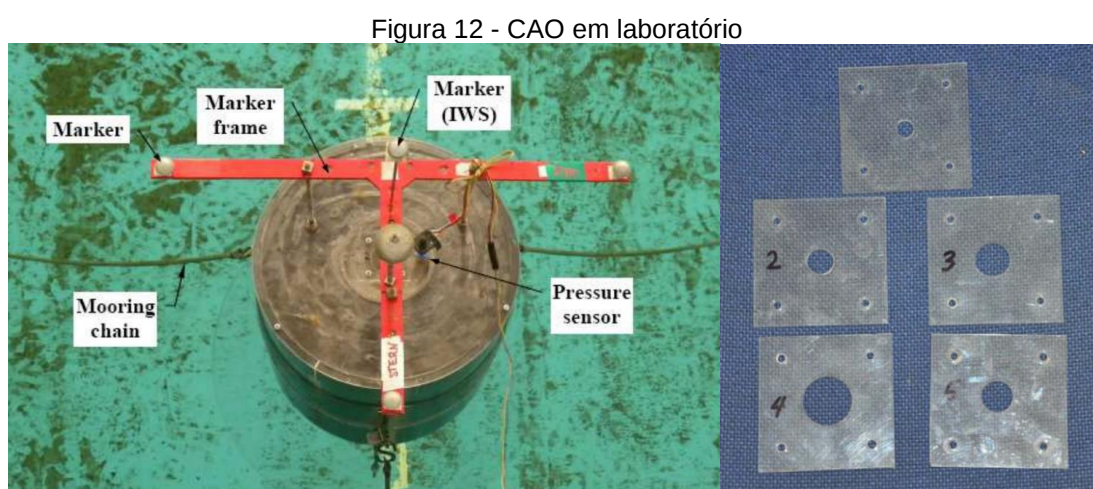
Figura 11 – Ilustração em corte longitudinal da estrutura experimental de um CAO em escala reduzida com topo aberto



Fonte: Sheng et al. (2012)

Foram instaladas placas com orifícios de diferentes tamanhos no topo em instantes diferentes para obter de forma experimental o comportamento da elevação da coluna d'água. Assim foram estimados coeficientes de amortecimento para

posteriormente serem comparados com resultados numéricos simulados no *software* WAMIT, o que resultou em resultados satisfatórios de compatibilidade entre a teoria e a prática. A maior dificuldade encontra-se na determinação da potência estimada disponível na saída do ar pelo orifício, pois detectou-se um comportamento não-linear entre a pressão no interior da câmara e o fluxo de ar através do orifício superior, muito provavelmente por conta da própria geometria da estrutura flutuante, ou devido ao pequeno tamanho do modelo, que pode ser muito sensível para diferentes ondas, mas que pode ser amenizado para estruturas fixas e de maior escala (SHENG *et al.*, 2012).



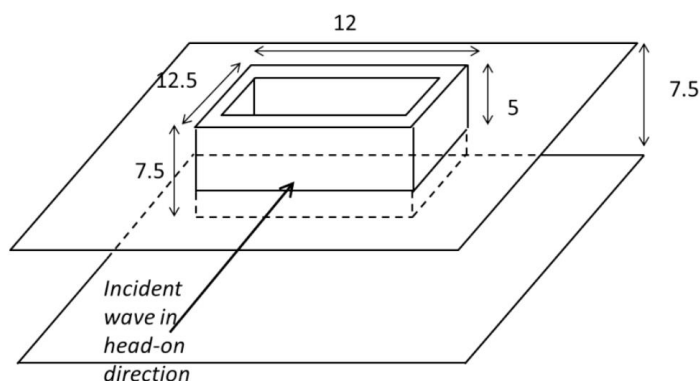
Fonte: adaptado de Sheng *et al.* (2012)

2.3.2 Simulação de um CAO fixo

Foi desenvolvida uma tese voltada para a simulação de uma CAO com inclusão de um sistema de controle do sistema de potência para otimizar a energia total convertida das ondas (FREEMAN, 2015). Um modelo numérico foi desenvolvido neste caso para estudar a interação de um CAO com a água, além de eventuais situações com outras estruturas ao seu redor. Com ele foi possível encontrar os efeitos na superfície da água dentro e ao redor de uma estrutura única e até mesmo de um quebra-mar com cinco colunas. Para estruturas de CAO consideradas abertas no topo, foram observados modos diferentes de respostas conforme alturas de ondas, frequências e direções, para posteriormente determinar cálculos de potência baseados em um modelo de turbina e consequentemente definir modelos de controladores convenientes para o problema.

Conforme a Figura 13, a estrutura da referência se constitui de paredes fixadas com espessura de 1m, comprimento 10,5 m, largura 10 m e calado 2,5 m. A parede é semi-submersa, com 5m acima da linha d'água. As ondas incidentes têm uma altura de 1 m (amplitude de 0,5 m) (FREEMAN, 2015).

Figura 13 - Modelo de CAO utilizado para simulação numérica de Freeman



Fonte: Freeman (2015)

O *software* utilizado ANSYS AQWA, resolve a teoria do potencial com uma malha de painéis gerada automaticamente, com base nos tamanhos de elemento máximo e mínimo definidos. Dependendo da frequência das ondas que devem ser consideradas, o tamanho da malha deve ser escolhido de tal forma que as características da estrutura possam ser resolvidas. A menor dimensão do elemento da malha escolhida no trabalho foi de 0,5 m e a maior de 2 m. Isso permitiu que uma faixa de períodos de ondas regulares - ondas de 4,0 s a ondas de 17,5 s - seja investigada com confiança, com base no comprimento de onda e como a estrutura é dividida nos painéis de malha (FREEMAN, 2015).

Freeman concluiu que potência média convertida em qualquer estado de mar pode ser significativamente aumentada ao usar um sistema controlador, embora isso seja moderado pela quantidade de energia necessária para alcançar as mudanças nos parâmetros da turbina. Isso pode ser feito aumentando o fluxo de massa através da turbina sem alterar significativamente a pressão da câmara (FREEMAN, 2015).

2.4 O ASPECTO ECONÔMICO NA ENERGIA MARÍTIMA

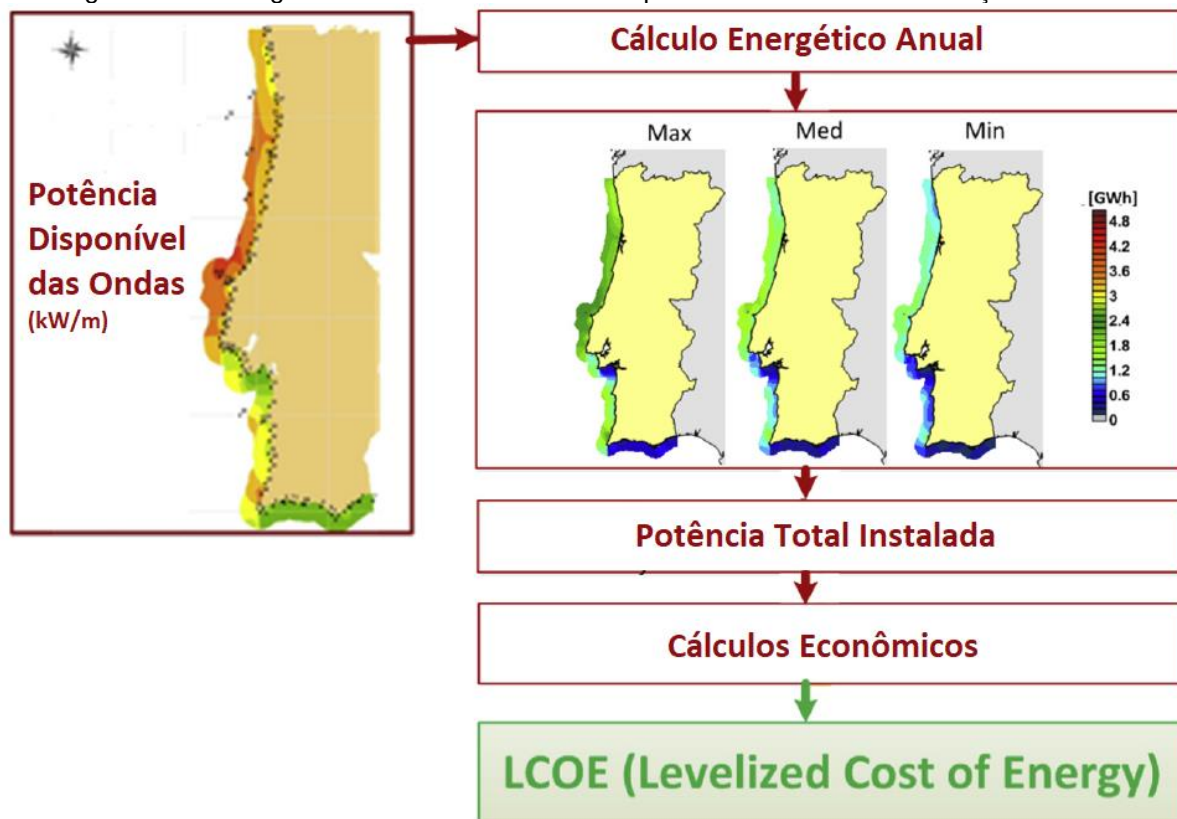
A implantação de projetos no ramo da conversão de energia das ondas marítimas ainda é bem desafiadora, principalmente por conta da existência de poucas instalações deste tipo ao redor do mundo, além da diversidade de tecnologias possíveis para aplicação. O fator viabilidade econômica é obviamente essencial, e já existem vários estudos na literatura voltados para esta análise.

Dentre as métricas econômicas utilizadas para avaliação desses projetos, o Custo Nivelado de Energia (*LCOE*) é uma opção de avaliação essencial para diversos tipos de geração de energia com preço de mercado a princípio indeterminado, ou projeto focado em desenvolvimento de tecnologia, com menos interferências de questões legais e fiscais (PECHER; KOFOED, 2017). Para o caso de instalações de média e grande escala, onde são investidos dezenas de milhares de dólares, há demanda de fundos privados que devem se mostrar rentáveis e competitivos em relação a quaisquer outras opções de investimentos, e nestas condições utilizam-se principalmente os parâmetros de valor presente líquido e taxa interna de retorno, levando em conta aspectos de maior competitividade (PECHER; KOFOED, 2017).

Um trabalho que utiliza um modelo econômico de energia das ondas, estabelecido através de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) aplicado ao longo da costa norte de Portugal, é apresentado por (CASTRO-SANTOS *et al.*, 2015). Nele é apresentada uma análise espacial do *LCOE* para determinar os melhores locais para instalação. Na Figura 14, é mostrado o esquema do processo de estimativa da potência anual de ondas (kW/m), utilizada no cálculo da produção anual de energia, função um atlas de recurso anual das ondas. Posteriormente, parâmetros técnicos gerais de dispositivos como a sua abrangência na captura da frente de onda, horas de operação por ano e eficiência mecânica são colocados como entrada. Além disso, estima-se a potência nominal de cada dispositivo, essencial para obter o investimento inicial quando multiplicado pelo custo de capital inicial. Para determinar a potência nominal, em kW, é necessário saber a potência disponível das ondas na zona costeira e o fator de capacidade (CASTRO-SANTOS *et al.*, 2015).

Os mapas resultantes têm o formato (coordenadas e tamanho) dos mapas de referência de recursos de ondas e fornecem uma perspectiva espacial na análise econômica com todos os parâmetros técnicos e econômicos introduzidos como dados de entrada no início da ferramenta.

Figura 14 – Fluxograma de cálculos econômicos para o modelo GIS de obtenção do LCOE



Fonte: adaptado de Castro-Santos *et al.*(2015)

Foram calculados valores de *LCOE* de 0,09 \$/kWh, 0,10 \$/kWh e 0,11 \$/kWh para respectivamente 5%, 7,5% e 10% de taxas de desconto, sendo estes valores menores aos *LCOE* de fontes convencionais de energia. Indicando que em algumas zonas de Portugal podem existir resultados viáveis para investidores (CASTRO-SANTOS *et al.*, 2015).

Outro artigo avaliou projetos de conversão de energia a partir do *LCOE*, considerando o local de instalação na costa do Pacífico dos EUA (CHANG *et al.*, 2018). Os resultados do *LCOE* para um projeto piloto variaram entre \$0,37/kWh e \$1,22/kWh, sem incluir nenhuma taxa de desconto, sendo estes valores maiores que o *LCOE* de fontes convencionais de geração de energia. O resultado indicou, para este caso, que o aproveitamento da energia das ondas, atualmente não é economicamente viável, mas que há potencial de viabilidade para o desenvolvimento a longo prazo, com ajustes mais precisos de fator de capacidade, custos com capital e operação, além de sistemas de controle e otimização de dispositivo.

Outro caso propõe uma ferramenta geoespacial para apoio na escolha otimizada de locais exploração de energia das marés com base no custo nivelado de energia (LCOE): *LCOE Mapping*. A metodologia combina resultados do recurso energético, obtidos via modelos numéricos, com avaliações econômicas em uma ferramenta projetada em *MatLab*, considerando a variabilidade espacial e temporal das marés; com ela é realizada uma análise de sensibilidade possibilitando uma avaliação das tendências de custo para determinação do *LCOE* (VAZQUEZ; IGLESIAS, 2015). O método é aplicado ao Estuário do Canal de Bristol e Severn (Reino Unido), uma das áreas mais promissoras para a exploração de correntes de maré no Reino Unido. Resultados indicam que os custos de capital e operação do projeto interferem mais fortemente no custo nivelado do que o fator de capacidade .

Outra metodologia traz uma abordagem voltada para uma análise econômica utilizando o *LCOE* envolvidos na implementação de dispositivos conversores de energia das ondas para gerar eletricidade no Brasil (DE OLIVEIRA *et al.*, 2021). O estudo divide-se em duas etapas: uma análise econômica e energética para a implantação de conversores de energia das ondas em regiões do Brasil com dois dispositivos conversores distintos; desenvolvimento dos custos nivelados de geração de energia elétrica, de forma a observar as possíveis oscilações desses custos e os parâmetros responsáveis pelo maior impacto. A conclusão aponta que um alto fator de capacidade pode ter grande influência nos valores de *LCOE* ao ponto de tornar a taxa de venda de energia das ondas do mar comparável à energia solar fotovoltaica no Brasil (DE OLIVEIRA *et al.*, 2021).

Um relatório de 2015 da *Ocean Energy Systems* (OES), organização intergovernamental voltada para pesquisa e desenvolvimento na área de energia marítima, indica que, baseado em alguns dados obtidos de desenvolvedores até então, espera-se uma redução rápida no *LCOE* por meio do aprendizado, inovação e escalada de projetos, ao passo que se atinja uma capacidade mundial instalada de 1 GW, derrubando o *LCOE* para cerca de 100-300 \$ / MWh, que no momento varia de 200 a 700 \$ / MWh, (OCEAN ENERGY SYSTEMS - OES, 2015).

Pelo apresentado até o momento, é difícil por enquanto definir uma faixa estreita de estimativas de *LCOE* para o setor, dada a diversidade de tecnologias e incertezas envolvidas. Um esforço colaborativo e aprofundado tende ajudar o setor a avançar, compartilhando informações não-comercialmente sensíveis para construir conhecimento, ajudar a reduzir incertezas e custos e melhorar a confiabilidade,

disponibilidade e desempenho, o que poderia, em última análise, compreender quais são os geradores de custos mais impactantes e avançar nas suas minimizações (OCEAN ENERGY SYSTEMS - OES, 2015).

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 ONDAS OCEÂNICAS

As ondas do mar possuem a característica fundamental de se apresentarem como movimentações ascendentes e descendentes da superfície oceânica em uma determinada localização. Tal movimento oscilatório é decorrente de efeitos gravitacionais na superfície da água, a qual não possui restrição geométrica de movimentação e está submetida a um campo de pressão constante gerado pela pressão atmosférica. Ou seja, qualquer perturbação que ocasione uma variação da pressão do fluido próximo à superfície livre acarreta um movimento da massa fluida que, por conseguinte, busca o equilíbrio com a pressão atmosférica e, com isto, acontecem mudanças de forma desta superfície (FALNES; KURNIAWAN, 2020).

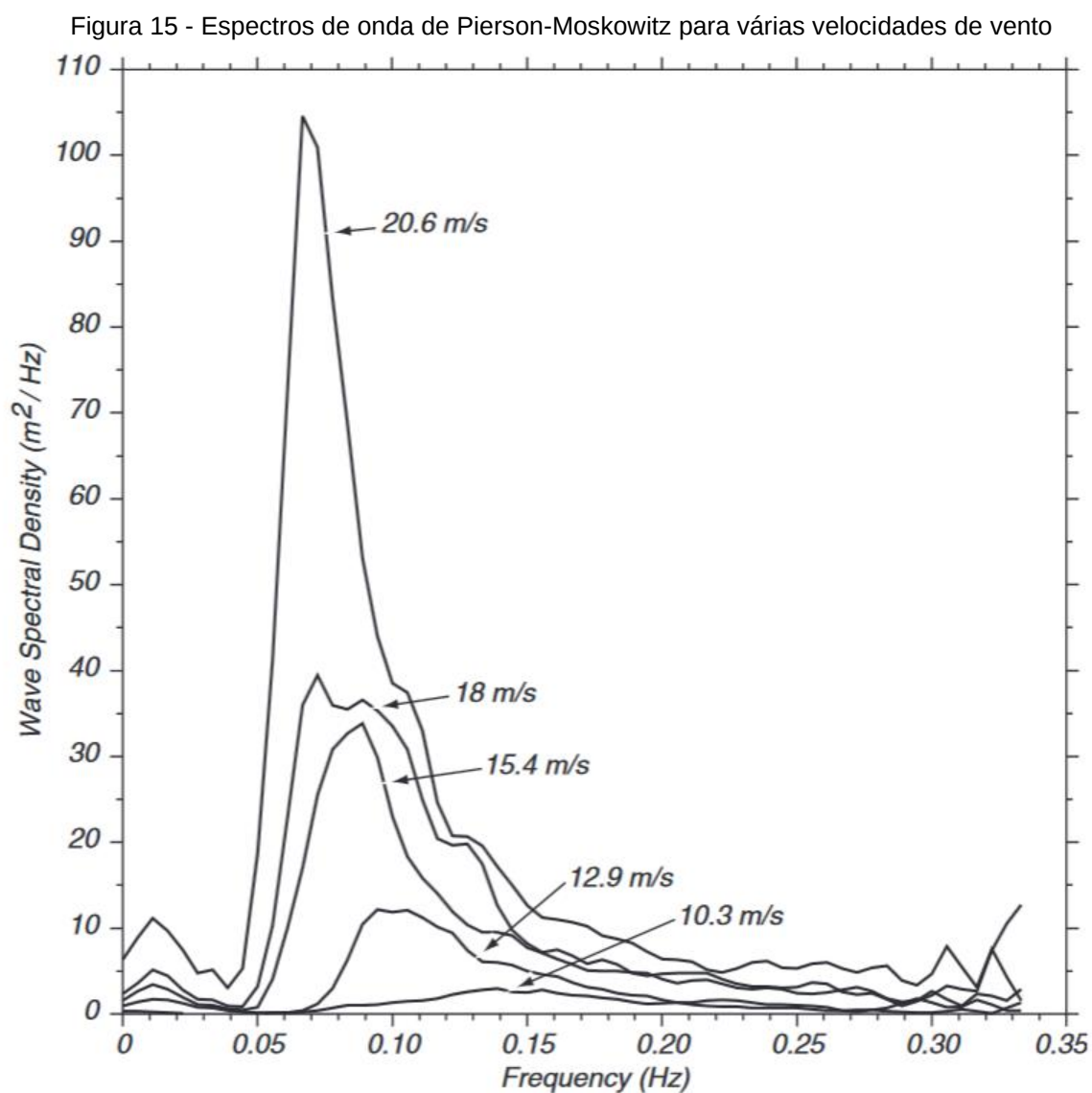
Eminentemente existe um potencial energético envolvido e que, de fato, pode ser ocasionado por diversas fontes geradoras tais como terremotos, deslizamentos, efeitos gravitacionais da Lua e do Sol, assim como a mais comum e preponderante que é o vento (FALNES; KURNIAWAN, 2020).

3.2 FORMAÇÃO DAS ONDAS

O vento possui um comportamento naturalmente estocástico, isto é, varia ao longo do tempo, tanto em direção quanto em velocidade, o que provoca a formação de ondas com alturas e períodos diferentes. O conjunto dessas várias ondas com características diferentes é chamado “campo de onda”, e este pode ser representado por vários tipos de espectro, um deles é o espectro de *Pierson-Moskowitz*, que informa quais as frequências de onda mais energéticas e pode ser descrito utilizando a Equação (1) (ESPINDOLA; ARAÚJO, 2012).

$$S(f_w) = \frac{0,0081g^2}{(2\pi f_w)^5} \exp \left[-0,74 \left(\frac{g}{2\pi f_w U_{19,5}} \right)^4 \right] \quad (1)$$

Em que f_w é a frequência de onda em Hertz e $U_{19,5}$ é a velocidade do vento medida a 19,5 m acima do nível médio do mar. Na Figura 15 observa-se um exemplo de espectros de onda para várias velocidades de vento.



Fonte: Stewart (2008)

3.3 DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

A distribuição de Weibull é uma função de distribuição de probabilidade contínua e unimodal, podendo ser utilizada com dois ou três parâmetros, sendo aplicada a diversas populações e fenômenos (BARBOSA, 2016). Este recurso pode ser utilizado para representar a distribuição de probabilidade da velocidade do vento.

A distribuição de *Weibull* para uma determinada velocidade de vento v , consegue ser expressa pela função densidade de probabilidade, que é apresentada na Equação (2) (JUSTUS *et al.*, 1978):

$$f(v) = \frac{dF(v)}{dv} = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2)$$

Onde:

$f(v)$: função densidade de probabilidade;

c : fator de escala de distribuição de Weibull;

k : fator de forma da distribuição de Weibull;

v : velocidade do vento.

A função de probabilidade acumulada equivalente $F(v)$ é a parte integral da função de densidade de probabilidade (ver Equação (3)):

$$F(v) = \int_0^v f(v)dv = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (3)$$

Onde $F(v)$ é a função de probabilidade acumulada.

Existem três vantagens da utilização da distribuição de Weibull: É uma função com somente dois parâmetros a serem determinados; Determinados os parâmetros c e k para uma certa altura utiliza-se da extrapolação direta da distribuição para outras alturas; Fornece uma boa representação da assimetria da distribuição de vento (HENNESSEY, 1977; JUSTUS *et al.*, 1978).

Os parâmetros c e k da distribuição de Weibull comandam o comportamento da função em relação à variável aplicada, de forma que, no caso da velocidade do

vento, o parâmetro c está mais diretamente relacionado à velocidade média e o parâmetro k está mais relacionado ao desvio padrão (BARBOSA, 2016).

3.4 CARACTERIZAÇÃO ESTATÍSTICA DA ONDA

Existem determinados parâmetros que servem como base para a caracterização das ondas oceânicas, são eles a altura significativa de onda e período de energia de onda, que podem ser determinados por meio de um espectro do mar, considerando que a variação na superfície da água pode ser representada como a superposição linear de ondas senoidais de diferentes frequências, amplitudes, direções e fases.

3.4.1 Altura significativa da onda

A altura significativa de onda (H_s) é um registro da variação na elevação da superfície da água. Verificou-se que uma boa estimativa de H_s foi dada usando a altura média de um terço das ondas mais altas, e a forma mais usada para calcular H_s a partir do espectro de onda é a da Equação (4) (ESPINDOLA; ARAÚJO, 2012; HENRIQUES *et al.*, 2013; PECHER; KOFOED, 2017).

$$H_s \cong H_{m0} = 4\sqrt{m_0} \quad (4)$$

O período comumente utilizado como característico da onda é o denominado período de energia, T_e , que é dado pela Equação (5).

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (5)$$

Em que m_0 e m_{-1} são, respectivamente, o momento zero do espectro de onda e o inverso do seu primeiro momento. O n -ésimo momento do espectro de onda pode ser encontrado através da Equação (6) (PECHER; KOFOED, 2017).

$$m_n = \int_0^{\infty} f_w^n S(f_w) df_w \quad (6)$$

Calculando os valores de m_0 e m_{-1} e substituindo nas Equações (4) e (5), encontra-se H_s e T_e . O valor de T_e pode também ser aproximado como o período de pico da onda (ESPINDOLA; ARAÚJO, 2012).

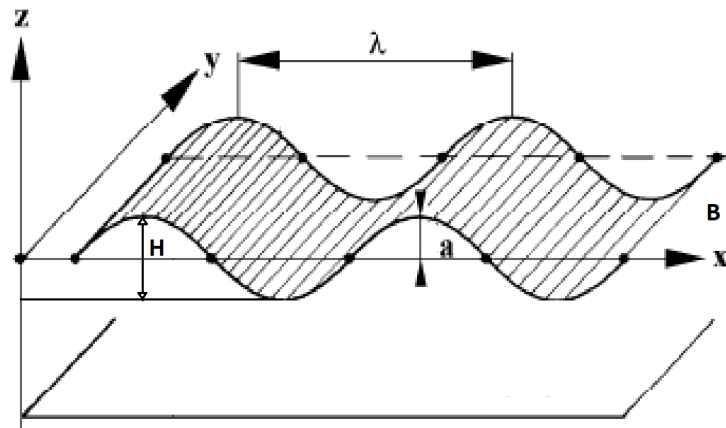
3.4.2 Potência teórica de ondas regulares

A potência média de uma frente de onda regular por unidade de comprimento para águas profundas é calculada conforme a Equação (7) (SHENG *et al.*, 2012)

$$Pot_{onda} = \frac{\rho_{H_2O} g^2}{32\pi} H^2 T \quad (W/m) \quad (7)$$

Em que H se refere à altura de onda (Figura 16) e T ao período.

Figura 16 - Esquemático das dimensões da onda do mar



Fonte: adaptado de Pecher e Kofoed (2017)

Por outro lado a potencia média teórica disponível num espaço com largura B (Figura 16) de uma frente onda regular em águas profundas é apresentada na equação (8).

$$Pot \text{ Disponível}_{onda} = \frac{\rho_{H_2O} g^2}{32\pi} H^2 T B \quad (W) \quad (8)$$

Portanto, a eficiência de geração de energia de um dispositivo CAO pode ser obtida mediante a Equação (9).

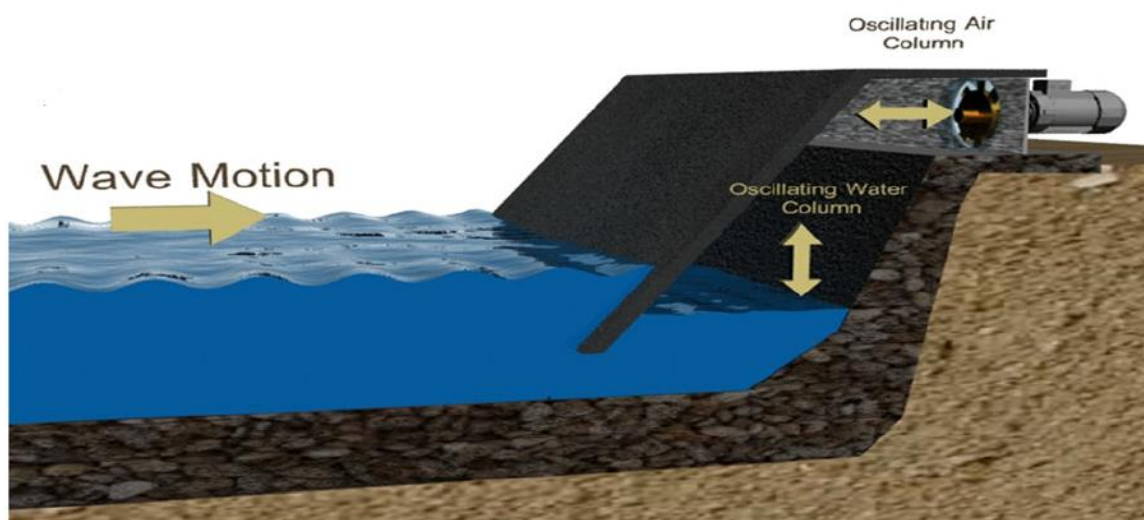
$$Eficiência_{onda} = \frac{Potência\ gerada\ OWC}{Pot\ Disponível_{onda}} * 100\% \quad (9)$$

3.5 DISPOSITIVO COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE (CAO)

O coluna de água oscilante é um tipo de dispositivo de conversão da energia das ondas normalmente construído na linha da costa. Consiste de uma espécie de câmara com fundo aberto, através do qual a superfície livre e oscilante da água do mar se faz presente durante o funcionamento. A água preenche parcialmente o espaço, enquanto o restante do volume é preenchido com ar, consequentemente a superfície da água movimenta a massa de ar acima. No topo da câmara existe uma abertura de formato circular onde fica presente uma turbina do tipo *Wells* (MISHRA *et al.*, 2021). O funcionamento pode ser visto na Figura 17.

A energia potencial das ondas que movimenta as ondas causa um movimento sobe-desce da água dentro do câmara e provoca, respectivamente, a compressão e descompressão na massa de ar presente no interior da câmara. Este ar entra e sai necessariamente pela abertura no topo da câmara, convertendo a energia pneumática em energia cinética de rotação da turbina *Wells*, que a converte finalmente em energia elétrica (PECHER; KOFOED, 2017).

Figura 17 - Esquemático do funcionamento de um dispositivo CAO

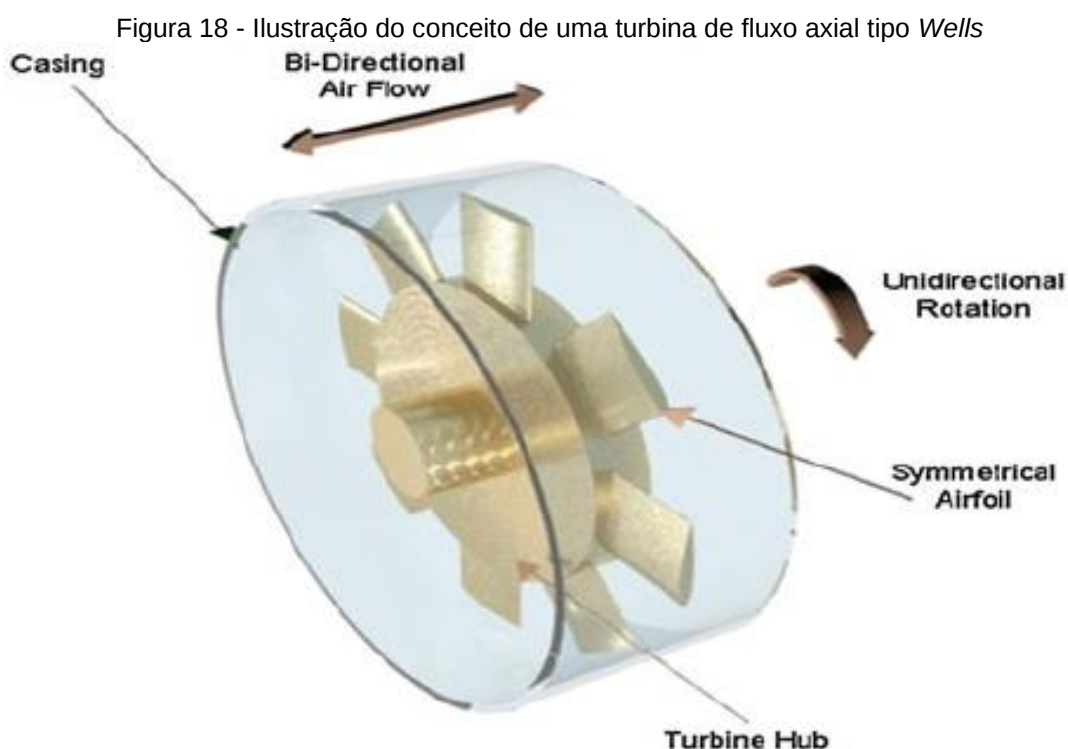


Fonte: Mishra *et al.* (2021)

3.6 TURBINA WELLS

Apresentado anteriormente, o princípio de funcionamento de um dispositivo CAO depende de uma turbina no topo da câmara que, de forma viável técnica e economicamente, converta energia a partir de um fluxo de ar que oscila constantemente em termos de intensidade e sentido em decorrência do aspecto estocástico das ondas do mar. A solução mais comum para este fim foi criada no ano de 1976 no Reino Unido pelo Dr. Alan Arthur Wells; a turbina Wells (MISHRA *et al.*, 2021).

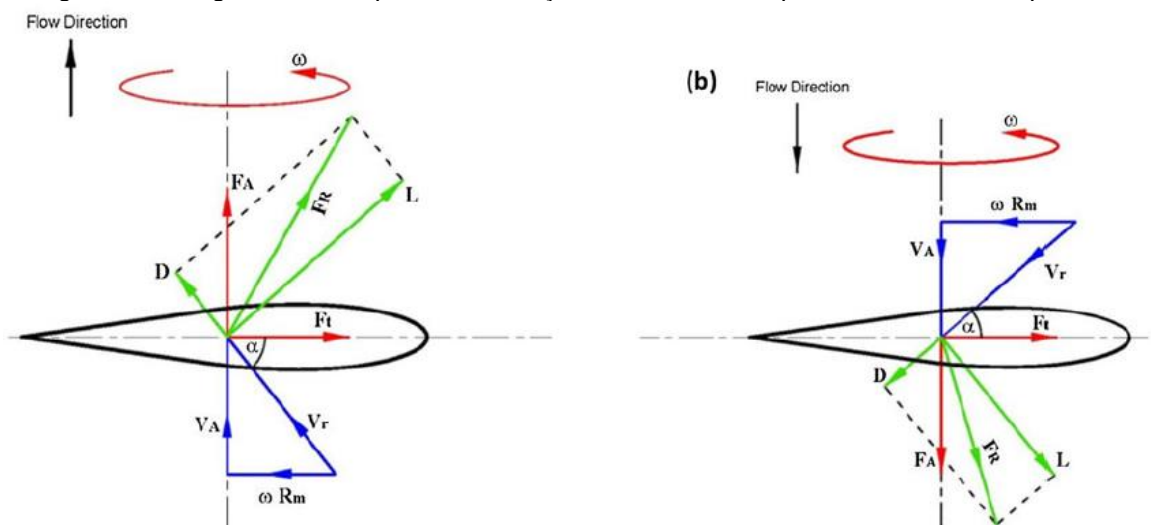
Trata-se de um tipo de turbina de fluxo axial, com a característica principal de possuir pás com perfil aerodinâmico simétrico na seção transversal e constante no comprimento, permitindo que o fluxo de ar proveniente da câmara do dispositivo CAO, rotacione a turbina em apenas um sentido independentemente das características do fluxo de ar (Figura 18).



Fonte: Shehata *et al.* (2017)

A Figura 19 ilustra um diagrama de corpo livre no perfil das pás, que esclarece como o sentido do fluxo de ar não altera o sentido de rotação do eixo da turbina Wells (SHEHATA *et al.*, 2017).

Figura 19 - Diagrama de Corpo Livre na seção transversal das pás de uma turbina tipo *Wells*



Fonte: Shehata *et al.* (2017)

A turbina *Wells* é um dos mais simples e provavelmente a turbina mais econômica para fins de conversão de energia das ondas, pois não exigem válvulas de retificação de ar e consegue extrair potência até mesmo de relativamente baixas vazões de ar, diferentemente de outras turbinas que possuem esta limitação (SHEHATA *et al.*, 2017).

Além disso, têm sido extensivamente estudadas e aprimoradas (INOUE *et al.*, 1988; PATEL, 2015; RAGHUNATHAN, 1995; VALIZADEH; ABBASPOUR; RAHNI, 2020).

3.7 PARÂMETROS ECONÔMICOS

Os custos a serem incorridos durante a vida útil de uma determinada usina são normalmente subdivididos em despesas de capital (*CapEx*), incorridos antes da geração de energia, e despesas operacionais (*OpEx*), incorridos para gerar eletricidade e manter a instalação ao longo da vida útil, que normalmente é de 20 anos (DALTON *et al.*, 2015).

Através do *LCOE* é possível desenvolver uma análise básica dos custos de uma usina a efeito de comparação com outras formas de geração (ESPINDOLA, 2017).

Com o valor presente líquido (VPL) e a taxa interna de retorno (TIR) a viabilidade econômica do projeto se torna mais compreensível para comparações gerais (PECHER; KOFOED, 2017). Estes serão apresentados a seguir.

3.7.1 Valor Presente Líquido

Investimentos basicamente são vistos como um desembolso inicial de verba que deverá ser convertido em lucro em um determinado período de tempo. O cálculo do Valor Presente consiste de um montante financeiro do futuro trazido para o momento atual em questão, sendo útil para analisar o valor do dinheiro no tempo, considerando juros compostos (RYBA; LENZI, 2012). O seja, o cálculo de valor presente traz para o momento atual um valor que poderá ser obtido no futuro, e pode ser calculado pela Equação (10) (PECHER; KOFOED, 2017):

$$VP = \frac{VF}{(1 + d)^n} \quad (10)$$

Onde VF é o valor futuro financeiro, d é a taxa de juros (retorno), e n o número de períodos (ou parcelas) do retorno financeiro (anos).

Usando a base do valor Presente, surge o conceito do Valor Presente Líquido (VPL). O VPL indica se o valor presente do lucro operacional é ou não maior do que o valor investido inicialmente, para um projeto rentável durante toda sua vida útil. Ele deve necessariamente ser positivo, e quanto maior este parâmetro, mais competitividade de investimento caracteriza o projeto, pode ser calculado através da Equação (11) (PECHER; KOFOED, 2017):

$$VPL = \sum_{n=1}^N \frac{(FC)_n}{(1 + d)^n} \quad (11)$$

Em que N é a vida útil do projeto e FC é o fluxo de caixa livre do projeto. Este é calculado conforme a equação (12).

$$FC = Receita - OpEx - CapEx - Impostos \quad (12)$$

O fluxo de caixa descreve a situação financeira geral durante a operação do projeto. Ou seja, a receita que é adquirida com a subtração dos custos operacionais e impostos. Portanto, o lucro operacional subtraído das taxas de impostos (PECHER; KOFOED, 2017).

3.7.2 Taxa Interna de Retorno

A taxa interna de retorno (TIR) é um parâmetro utilizado para determinar se há rentabilidade no projeto, e é definida como a taxa de juros para a qual o valor presente do fluxo de caixa é nulo (ver a equação (13)) (RYBA; LENZI, 2012).

$$\sum_{n=1}^N \frac{(FC)_n}{(1 + TIR)^n} = 0 \quad (13)$$

A TIR normalmente é usada em análise comparativa com uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA), que geralmente se refere à taxa que determina a rentabilidade que se pode conseguir no mercado de maneira mais fácil e com um baixo risco (RYBA; LENZI, 2012). Em outras palavras, para analisar o resultado da TIR o investidor deve conhecer a TMA. O projeto será lucrativo caso os retornos sejam maiores que a TMA, ou seja:

Caso $TIR > TMA$, o investimento é viável;

Caso $TIR < TMA$, o investimento não é viável;

Caso $TIR = TMA$, decisão de investimento é particular de cada investidor.

3.7.3 Custo normalizado de energia

O custo normalizado de energia (LCOE) é uma avaliação econômica dos custos de um sistema de geração de energia ao longo da sua vida útil trazidos a valor presente, que possibilita a comparação entre alternativas que envolvem diferentes

montantes de capital. Pode ser determinado pela equação (14) (PECHER; KOFOED, 2017):

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum_1^n VP(OPEX) + VP(DESCOMIS.)}{\sum_1^n PAE} \quad (14)$$

Em que CAPEX é o custo aplicado inicialmente, OPEX representa o custo de operação e manutenção que é trazido a valor presente, assim como o DESCOMIS., que é o custo final de descomissionamento. PAE a produção anual de energia que é somada em todos os anos da vida útil.

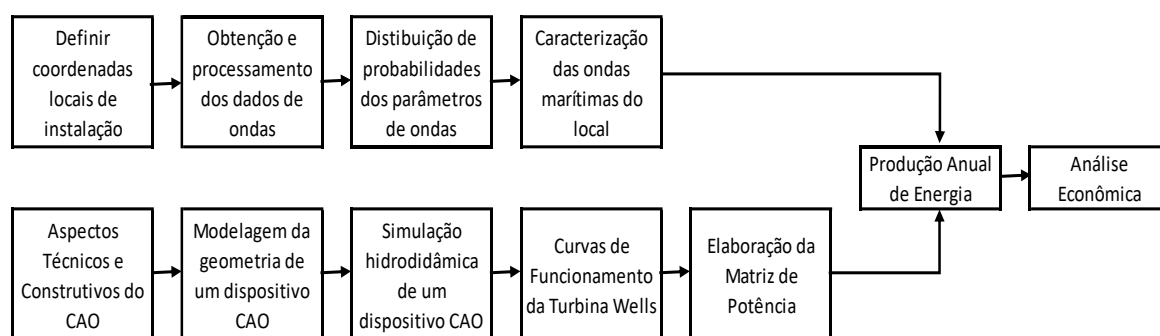
4 METODOLOGIA

A metodologia consiste primeiramente da caracterização das ondas no quebra-mar no Porto do Recife/PE, determinando uma matriz de probabilidade de ocorrências das alturas significativas e períodos de onda com auxílio do banco de dados presente na ferramenta do Projeto Sistema de Modelagem Costeira – Brasil (SMC-Brasil), gerando uma representação estatística do estado de mar que possibilita os cálculos de potência disponível e gerada do dispositivo CAO.

Posteriormente ocorre a caracterização energética, utilizando o software *WAMIT* para modelar um dispositivo CAO para a conversão daquela energia disponível, isto é, determinar uma matriz de potência teórica para o dispositivo e posteriormente estimar a potência elétrica gerada em função das condições de mar daquela região.

Definindo a instalação de dispositivos e a energia gerada, dá-se início à fase financeira do estudo, realizando análises e discussão em torno dos parâmetros de Custo Nivelado de Energia, Valor Presente Líquido e Taxa Interna de Retorno em busca de atratividade de investimento para esta alternativa de energia limpa.

Figura 20 - Fluxograma da Metodologia



Fonte: Autor

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ONDAS MARÍTIMAS

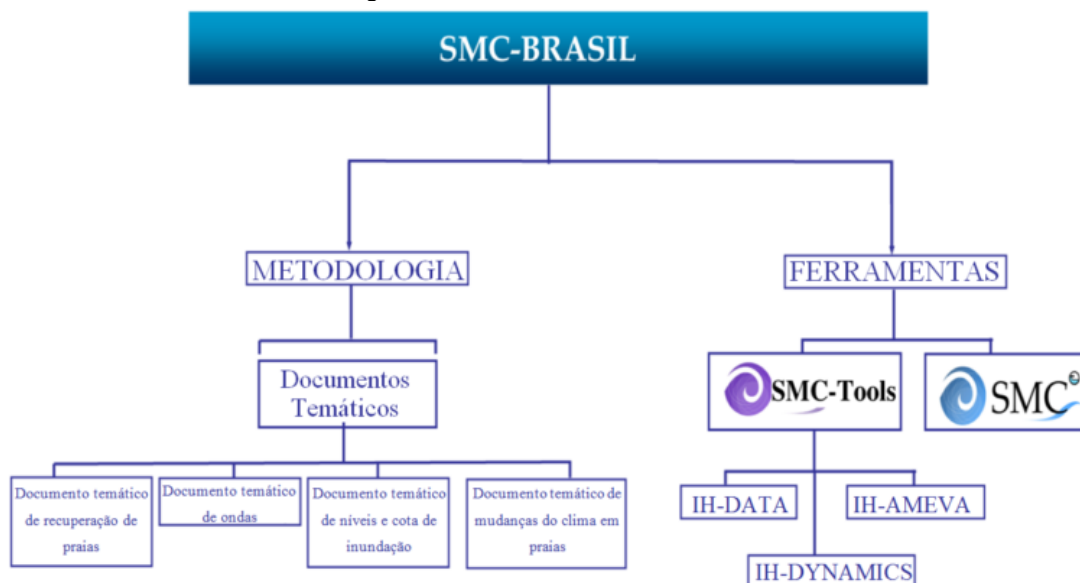
Os dados estatísticos de ondas marítimas foram retirados do banco de dados do projeto SMC-Brasil. Para isso foram fornecidas ao programa as coordenadas do local, neste caso o quebra-mar do Porto do Recife, e logo após foi realizada a manipulação com o módulo de Análise Matemática e Estatística de Variáveis Ambientais (AMEVA) que proporciona histogramas de altura significativa e período de pico de onda.

4.1.1 Sobre o Projeto SMC - Brasil

O SMC é um conjunto de programas, bancos de dados e procedimentos projetados para facilitar a análise de processos costeiros movidos por ondas. O projeto foi desenvolvido com a colaboração da Agência Espanhola de Cooperação para o Desenvolvimento Internacional (AECID) e do Instituto de Hidráulica Ambiental da Universidade da Cantábria. A versão brasileira do SMC, conhecida como SMC-Brasil, é uma versão aprimorada do sistema, desenvolvida inicialmente para outros países, e inclui avanços científicos recentes em engenharia costeira e informática.

Um dos módulos presentes no pacote SMC-Brasil é o *SMC-Tools*, que executa o processamento de dados, criando análises estatísticas a partir de bancos de dados de variáveis como batimetria, ondas e marés. Tal módulo permite o processamento estatístico dos dados de ondas e a caracterização do clima de ondas para qualquer região da costa brasileira, com base na reanálise de 60 anos de dados de ondas armazenados no banco de dados. Para isso, foi utilizado o AMEVA (SMC-Brasil, [s.d.]).

Figura 21 - Estrutura do SMC Brasil



Fonte: SMC-Brasil ([s.d.])

O SMC-Brasil inclui um banco de dados interno de ondas oceânicas, conhecido como *Global Ocean Waves* (GOW), que é baseado em uma reanálise de previsão de ondas de 60 anos, de 1948 a 2008. O modelo *Wavewatch III* foi usado para modelar as ondas do Oceano Atlântico, com resolução de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. A reanálise global dos dados de campo de vento de 10 m do *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) e do *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) foi usada como dados de entrada para o modelo de onda.

Pelo fato de o quebra-mar ser uma estrutura costeira reta, a refração garante a incidência frontal dessas ondas.

4.1.2 Obtenção dos dados estatísticos de onda

Os dados de interesse são as distribuições de probabilidade para as variáveis de altura significativa (H_s) e período de pico (T_p), que serão fornecidas pela base de dados SMC-Brasil.

No primeiro passo, deve-se ter ciência das coordenadas do ponto no qual serão fornecidos os dados de onda e disponíveis no *software*. Logo, utilizando a ferramenta *SMC-Tool*, na interface do *software*, filtrar uma região de dados disponíveis, posteriormente escolher no litoral do mapa o ponto de ondas correspondente ou mais próximo à localização já selecionada.

CAO para este trabalho foi a da usina de Pico, em Portugal, a qual foi desativada depois de duas décadas de funcionamento e estudo (FALCÃO *et al.*, 2020).

Figura 23 - Fotografia da CAO instalada em Pico, Portugal



Fonte: Falcão *et al.* (2020)

Foram consideradas as seguintes hipóteses para o sistema estrutural do CAO:

- Regime não-estacionário;
- Transferência de calor desprezível;
- Escoamento Incompressível do ar na turbina;
- Propriedades uniformes nas seções;
- Ausência de efeitos viscosos no sistema.

Escoamentos de gases com transferência de calor desprezível também podem ser considerados incompressíveis, desde que as velocidades do escoamento sejam pequenas em relação à velocidade do som (FOX; 2018). Conforme a Equação (15), a razão entre a velocidade do escoamento, V , e a velocidade local do som, c , no gás, é definida como o número de Mach (FOX; 2018).

$$M = \frac{V}{c} \quad (15)$$

Para $M < 0,3$, a variação máxima da massa específica é inferior a 5%. Assim, os escoamentos de gases com $M < 0,3$ podem ser tratados como incompressíveis; um valor de $M = 0,3$ no ar, na condição-padrão, corresponde a uma velocidade de aproximadamente 100 m/s.

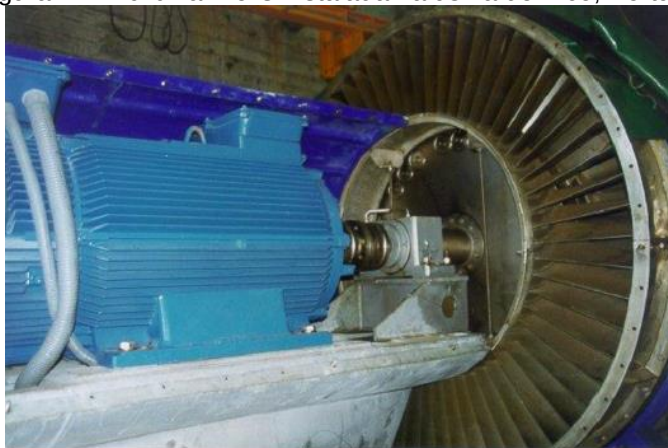
O princípio básico de funcionamento está na variação de pressão do ar dentro da câmara em relação ao ambiente externo, o que proporciona um determinado fluxo de ar através da turbina. As condições de pressão podem ser controladas para uma melhor eficiência da turbina, pois assim esta trabalhará em uma determinada faixa de operação com uma rotação menos instável. Neste trabalho não será abordado o sistema de controle aplicado ao CAO, ficando como possível aplicação de trabalhos futuros.

4.2.2 Turbina Wells

4.2.2.1 Modelo de Referência

A turbina da usina de Pico foi projetada aerodinamicamente pelo Instituto Superior Técnico, e foi fabricada pela empresa escocesa *WaveGen*. Estima-se que operou por aproximadamente 6650 h, apenas 4% do tempo total disponível, o que evidencia dificuldades de operação ao longo do tempo de atividade (BRUSCHI *et al.*, 2019). Dentre outros dados, para este trabalho foi necessário para fins de cálculo o diâmetro da turbina, constando como 2,3 metros (FALCÃO *et al.*, 2020).

Figura 24 - Turbina Wells instalada na usina de Pico, Portugal



Fonte: Falcão *et al.* (2020)

Através de ensaio em laboratório e simulações numéricas, (LÓPEZ *et al.*, 2014) conclui que dois elementos devem ser determinados: o amortecimento que a turbina deve exercer sobre a câmara para que ela atinja o coeficiente de potência pneumática máxima; e as condições de queda de pressão sob as quais a turbina operaria.

4.3 SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA DE UM DISPOSITIVO CAO

4.3.1 Sobre o programa computacional *WAMIT*

O *WAMIT* V6.4 é um programa desenvolvido para a análise da interação hidrodinâmica de ondas marítimas com navios e estruturas *offshore*. Baseia-se no método dos painéis, o qual consiste na solução da equação de *Laplace* através da terceira identidade de Green em conjunto com as condições de contorno que caracterizam o problema de uma unidade flutuante em presença de ondas (*WAMIT*, 2004).

Este método requer a discretização da superfície submersa do corpo flutuante em painéis. Sobre estes impõe-se a condição de contorno de impenetrabilidade, e as demais condições de contorno são definidas pela fonte de Green utilizada e distribuída sobre cada painel do corpo submerso.

O programa tem a capacidade de auxiliar na avaliação das forças hidrodinâmicas e movimentos de um corpo na presença de ondas regulares. A profundidade da água pode ser infinita ou finita, e um ou vários corpos que interagem entre si podem ser analisados. Os corpos podem estar localizados em superfície livre, submersos ou fixados no fundo do mar. Uma variedade de opções permite a análise hidrodinâmica de corpos que estão flutuando livremente, contidos ou fixos (*WAMIT*, 2004).

Quanto ao escoamento, é considerado ideal e harmônico no tempo. A condição de superfície livre é linearizada, isto é, uma análise de primeira ordem. As forças médias de segunda ordem estão incluídas nesta análise, uma vez que podem ser calculadas rigorosamente a partir da solução linear. Dentre as quantidades que podem ser calculadas estão:

- Coeficientes hidrostáticos
- Coeficientes de massa adicional e amortecimento para todos os modos;
- Momentos e forças excitantes de Ondas;
- Amplitudes e fases de movimento para um corpo de flutuação livre;
- Pressão hidrodinâmica e velocidade do fluido na superfície do corpo;
- Pressão hidrodinâmica e velocidade do fluido no domínio do fluido.

O software está composto por dois principais subprogramas que permitem a devida execução. O primeiro denominado *POTEN*, permite a resolução da equação diferencial identificada como o potencial de velocidades na superfície do corpo. O segundo subprograma é denominado *FORCE*, este avalia parâmetros físicos, incluindo os coeficientes de força e movimento, e dados de campo, incluindo a pressão do fluido, velocidade e elevação da superfície livre.

A sequência básica em uma aplicação típica do *WAMIT* é:

- Preparar os arquivos de entrada;
- Execução do programa;
- Resultados em arquivos de saída que podem ser impressos e pós-processados.

Definidas as condições do problema nos arquivos de entrada, existem dois principais resultados de interesse que variam em função do período de onda que incide na estrutura do CAO e que são fundamentais para os futuros cálculos de potência da turbina, são eles a pressão hidrodinâmica e elevação da superfície livre da água no interior da câmara.

4.3.1.1 Pressão Hidrodinâmica

O *WAMIT* parte do princípio da linearização da equação de Bernoulli, determinando a pressão hidrodinâmica conforme a Equação (16)

$$p_7 = -\rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (16)$$

Na qual φ é a função potencial de velocidades do escoamento.

A simulação resulta em um valor adimensional de pressão ou o RAO (*Response Amplitude Operator*) de pressão que obedece a Equação (17) (WAMIT, 2004):

$$\bar{p} = \frac{p_7}{\rho_{ar} g A} \quad (17)$$

Em que g é a aceleração gravitacional (m.s^{-2}), p_7 é a pressão na superfície livre (Pa), ρ_{ar} é a massa específica do ar (kg.m^{-3}) e A é a amplitude da onda incidente (m).

Portanto, ao obter os resultados adimensionais de pressão é possível realizar o cálculo para o valor de pressão em Pascal.

4.3.1.2 Elevação da superfície livre da coluna d'água

A elevação da superfície livre da coluna d'água é fundamental para futuros cálculos de fluxo mássico de ar através da turbina. A condição dinâmica de superfície livre que permite o cálculo do deslocamento é representada pela Equação (18) (WAMIT, 2004):

$$\eta_7 = -\frac{1}{g} \left(\frac{\partial \varphi_7}{\partial t} \right) \quad (18)$$

O resultado fornecido pelo WAMIT encontra-se no formato adimensional, conhecido como RAO de elevação (Equação (19)):

$$Z_7 = \frac{\eta_7}{A} \quad (19)$$

4.4 CÁLCULO DE POTÊNCIA DA TURBINA WELLS

Objetivando determinar o cálculo da potência convertida pela turbina *Wells* a ser utilizada no projeto, primeiro deve-se determinar quais as dimensões da turbina assim como seus aspectos de funcionamento, que são básicos de uma turbomáquina; as curvas relacionando os coeficiente de vazão, pressão e potência. Posteriormente é possível estimar a rotação e consequentemente a potência para diversas condições de mar, convergindo para uma matriz de capacidade de potência do sistema. A turbina selecionada neste trabalho baseia-se em uma turbina *Wells* projetada para funcionamento na usina de Pico (FALCÃO; JUSTINO, 1999).

4.4.1 Curvas características da Turbina *Wells*

Desprezando o efeito das variações no número de Reynolds e no número de Mach, as características de desempenho de uma turbina podem ser escritas na forma adimensional, através dos coeficientes de vazão (Equação (20)), pressão (Equação (21)) e potência (Equação(22)) (FALCÃO; JUSTINO, 1999).

$$\phi = \frac{\dot{m}_{ar}}{\rho_{ar} N D^3} \quad (20)$$

$$\psi = \frac{p_t}{\rho_{ar} N^2 D^2} \quad (21)$$

$$\pi = \frac{Pot}{\rho_{ar} N^3 D^5} \quad (22)$$

Em que,

ρ_{ar} : Massa específica do ar em ton/m³

N : Velocidade angular do eixo da turbina em rad/s

D : Diâmetro da turbina em m

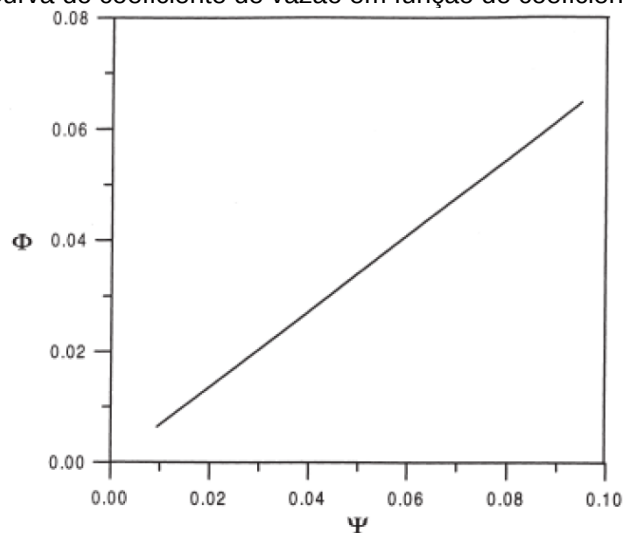
$\dot{m}_{ar}$: Vazão mássica de ar através da turbina em ton/s

p_t : Pressão do fluxo na turbina em kPa

Pot : Potência gerada pela turbina em kW

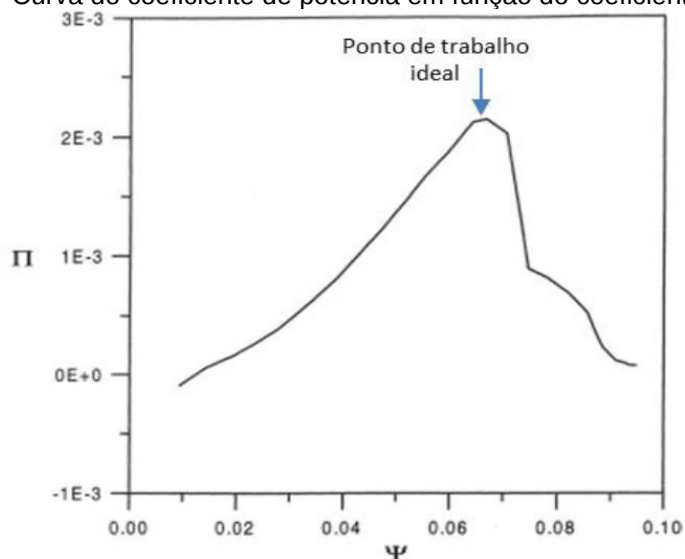
As relações entre os coeficientes adimensionais citados acima geram curvas de desempenho características da turbina. Figura 25 e Figura 26 possuem os gráficos derivados de do funcionamento de uma turbina *Wells* operando nas dimensões da planta de Pico (FALCÃO; JUSTINO, 1999).

Figura 25 – Curva do coeficiente de vazão em função do coeficiente de pressão



Fonte: Cordeiro (2015)

Figura 26 – Curva do coeficiente de potência em função do coeficiente de pressão



Fonte: Cordeiro (2015)

Para as curvas acima (FALCÃO; JUSTINO, 1999) cita os dados utilizados nos cálculos (Tabela 1).

Tabela 1 - Propriedades Termodinâmicas de cálculo das curvas de desempenho da Turbina Wells

Dimensões da câmara	12x12 m
Volume da câmara	1050 m ³
Profundidade da água	8 m
Pressão Atmosférica	1,013 x 10 ⁵ Pa
Massa específica do ar	1,2 kg.m ⁻³
Massa específica da água	1,025 x 10 ³ kg m ⁻³
Calor Específico C _p	1004,5 J kg K ⁻¹
Calor Específico C _v	717,5 J kg K ⁻¹

Fonte: adaptado de Falcão e Justino (1999)

4.4.2 Elaboração da Matriz de Potência

Utilizando o *software* comercial *WAMIT*, já foi visto que obtêm-se os resultados *RAO* de pressão e elevação da coluna d'água em função dos períodos de onda, a partir dos quais é possível calcular o fluxo de massa de ar e a pressão para todas as alturas de onda. Percebe-se que, obtendo tais resultados do *WAMIT*, o diâmetro da turbina e suas curvas de operação, a partir das Equações (20), (21) e (22) pode ser montado um sistema de equações para determinar quais os valores dos coeficientes de funcionamento para cada contexto, conseqüentemente qual a rotação e assim é descoberta a potência.

Primeiramente, divide-se o quadrado de (20) por (21) a fim de eliminar a incógnita da rotação, resultando na Equação (23):

$$\frac{\phi^2}{\psi} = \frac{\dot{m}_{ar}}{p_t \rho_{ar} D^4} \quad (23)$$

Logo, para cada estado de mar, determina-se a razão calculada na Equação (23), ainda sem saber diretamente os resultados para os coeficientes de vazão e pressão. Após isso, com auxílio da curva mostrada na Figura 25, são realizadas interpolações sobre os valores disponíveis nesta curva e assim determinar se algum ponto exato ou próximo da curva satisfaz a relação imposta por (23). Satisfazendo, encontram-se os coeficientes de vazão e pressão.

Posteriormente, utilizando o coeficiente de pressão (ψ), determina-se a rotação da turbina com a Equação (21) e, subseqüentemente, com auxílio da curva mostrada na Figura 26 descobre-se o coeficiente de potência (π), finalmente é possível calcular uma matriz de capacidade de potência com a Equação (22) para cada estado de mar.

Para determinar a matriz de potência especificamente para a localidade desejada, são necessárias a matriz de probabilidade de ocorrência dos parâmetros de onda (altura significativa e período) juntamente com a matriz de capacidade de potência do dispositivo. Portanto basta multiplicar ambos os fatores e assim descobre-se potência gerada para aquele contexto.

A matriz de probabilidade dos parâmetros de onda pode ser desenvolvida com os dados já adquiridos, de tal forma que cada elemento p_{ij} desta matriz é calculado conforme a Equação (24) , em que pH_{ij} é a probabilidade para cada altura significativa de onda e pT_{ij} a probabilidade para cada período de pico de onda.

$$p_{ij} = pH_{ij} \cdot pT_{ij} , \quad i = j \quad (24)$$

A matriz de potência que caracteriza o dispositivo conversor de energia, neste caso o CAO com instalação *onshore*, é o quanto de energia o dispositivo consegue converter para cada combinação de parâmetros H_s e T_p de estado de mar e pode ser calculada pela Equação (25), onde $CapPot$ é a capacidade teórica do dispositivo independentemente de onde será instalado. Na Figura 27 está um exemplo de matriz de potência para um modelo de CAO.

$$Pot_{ij} = p_{ij} \cdot CapPot_{ij} , \quad i = j \quad (25)$$

Figura 27 - Matriz de potência exemplo para um dispositivo CAO

		Período (Ts) [s]												
Altura de Onda (Hs) [m]		5,00	5,63	6,25	6,88	7,50	8,13	8,75	9,38	10,00	10,63	11,25	11,88	12,50
	0,02	0	0	0	0	0	0,001	0,001	0,001	0,001	0	0	0	0
	0,08	0,008	0,009	0,012	0,018	0,027	0,036	0,039	0,036	0,032	0,03	0,029	0,029	0,03
	0,19	0,103	0,124	0,163	0,241	0,365	0,484	0,521	0,486	0,433	0,396	0,383	0,386	0,396
	0,34	0,59	0,709	0,931	1,381	2,093	2,771	2,985	2,782	2,479	2,269	2,194	2,213	2,27
	0,53	2,235	2,687	3,527	5,232	7,929	10,497	11,308	10,54	9,39	8,594	8,312	8,384	8,598
	0,76	6,591	7,923	10,4	15,426	23,379	30,951	33,343	31,077	27,687	25,34	24,508	24,721	25,352
	1,04	16,889	20,303	26,65	39,528	59,909	79,31	85,442	79,633	70,948	64,932	62,802	63,347	64,963
	1,36	37,767	45,402	59,595	88,393	133,97	177,36	191,07	178,08	158,655	145,203	140,44	141,658	145,273
	1,72	76,398	91,843	120,55	178,81	271,01	358,77	386,51	360,23	320,94	293,727	284,093	286,555	293,869
	2,12	143,06	171,98	225,74	334,82	507,46	671,79	723,73	674,53	600,96	550,004	531,964	536,575	550,271

Fonte: Autor

4.5 DETERMINAÇÃO DA PRODUÇÃO ANUAL DE ENERGIA

4.5.1 Parâmetros de entrada

A determinação do potencial energético das ondas na localidade do Porto de Recife/PE é realizada seguindo a metodologia proposta por Harrison e Wallace (2005), com a premissa principal de que cada velocidade de vento resulta em uma condição específica de mar, que pode ser representada por uma matriz de alturas significativas, H_s , e períodos de pico, T_p . A partir de uma distribuição de frequência de vento incidente no local, estas geram uma distribuição de probabilidade de estados de mar, de onde as potências de frente de onda são determinadas (HARRISON; WALLACE, 2005).

Utilizando a matriz de potência do dispositivo selecionado e a frequência de ocorrência de estados de mar (H_s e T_p) em toda a área de estudo, calcula-se a potência elétrica média, utilizando a Equação (26) (ESPINDOLA, 2017):

$$P_e = \sum_{i=1}^{n_T} \sum_{j=1}^{n_H} f_{ij} P_{ij} \quad (26)$$

Em que:

f_{ij} é a frequência de ocorrência de um estado de mar correspondendo à coluna j e à linha i da matriz de potência.

P_{ij} é a potência elétrica convertida pelo dispositivo para esse mesmo estado de mar.

A Potência Elétrica Anual ou *PAE* é dada pela Equação (27), considerando a equação anterior multiplicada pelas 8760 horas do ano.

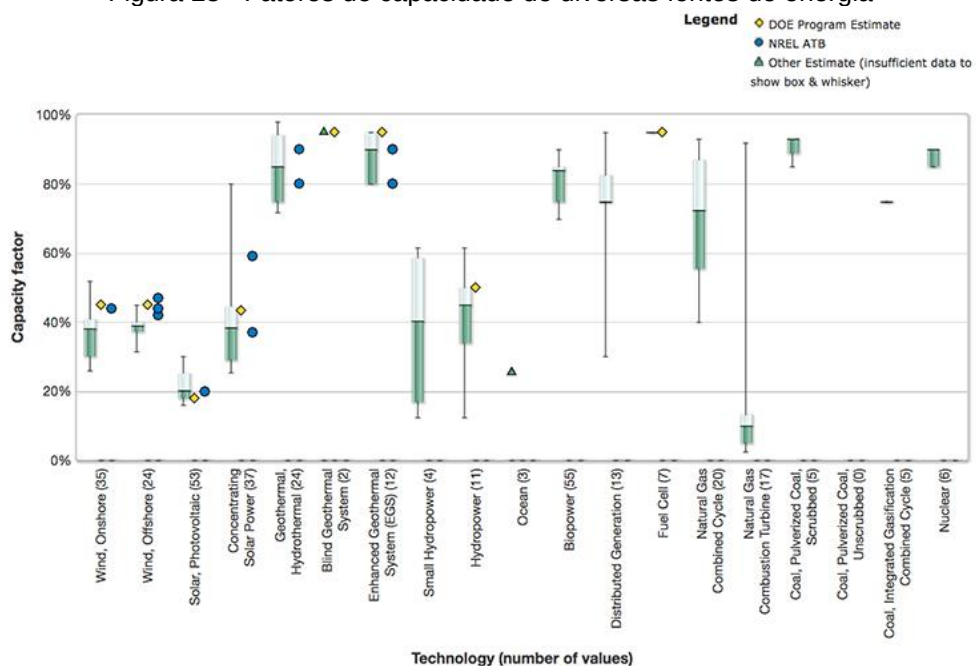
$$PAE = \left(\sum_{i=1}^{n_T} \sum_{j=1}^{n_H} f_{ij} P_{ij} \right) \cdot 8760 \quad (27)$$

Através da potência elétrica calculada, tendo uma capacidade nominal do dispositivo, determina-se o fator de capacidade, que será útil na análise econômica.

4.5.2 Fator de Capacidade

Um dispositivo de conversão de energia pode estar exposto a diversos comportamentos variáveis da sua fonte de energia, porém é projetado de tal forma que possui uma capacidade máxima – nominal - que irá depender de uma combinação de condições da fonte de energia que pode ser atingida ou não.

Figura 28 - Fatores de capacidade de diversas fontes de energia



Fonte: NREL (2022)

Sabendo disso, o fator de capacidade é definido como a razão entre a potência real gerada em relação à capacidade nominal de um dispositivo em suas perfeitas condições de funcionamento. A partir disso é alcançado um percentual que pode servir de parâmetro técnico de avaliação dos dispositivos, do quanto eles conseguem desempenhar seu papel em certas condições específicas comparado à sua capacidade máxima projetada. Na Figura 28 é mostrada uma comparação entre diversas formas de geração de energia elétrica.

Através da equação (28) é possível determinar o fator de capacidade.

$$C_f = \frac{P_e}{P_n} \quad (28)$$

Em que:

P_e é a potência elétrica média convertida pelo CAO.

P_n é a potência nominal do CAO.

O relatório desenvolvido pela *Ocean Energy Systems*, estima que projetos de conversão da energia das ondas em média possuem de 30 a 35% de fator de capacidade, que é intermediário entre usinas eólicas, de aproximadamente 40%, e usinas fotovoltaicas que, em média, entregam 20% (OCEAN ENERGY SYSTEMS - OES, 2015).

4.6 ANÁLISE ECONÔMICA

Nesta etapa, primeiramente são estimados todos os custos para uma usina de energia das ondas, desde a concepção do projeto até a desmontagem do fim de vida útil, para posteriormente obter parâmetros de avaliação que validem ou não a viabilidade de um projeto do tipo estudado.

Conforme estudo, estimam-se os principais custos em uma usina de energia das ondas são o custo pré-operacional, custos de construção e instalação, despesas operacionais e os custos de descomissionamento ou desativação (DE OLIVEIRA *et al.*, 2021).

Determinados os custos do projeto, é alcançado um parâmetro de custo nivelado de energia (*LCOE*) que suscita análises comparativas com opções disponíveis na matriz do Brasil. Através disso, podem ser desenvolvidas análises de sensibilidade econômica, constatando o comportamento do *LCOE* em função de um intervalo de valores entre o melhor e pior cenário de parâmetros, assim como a interferência de aspectos técnicos da usina como fator de capacidade e eficiência. Abre-se espaço também para avaliação da atratividade do projeto para investidores privados, observando com uma perspectiva de taxa interna de retorno e valor presente líquido, comparando com outras opções de investimento disponíveis.

4.6.1 Custos Iniciais

O custo pré-operacional inclui tópicos como estudos preliminares de recursos energéticos, projetos de instalação, avaliação de impacto ambiental, social etc. Apesar da complexidade para estabelecer um valor genérico para este custo por depender da localização, instalação e características particulares do projeto (SI OCEAN, 2013), frequentemente pode ser considerado como 10% do *CapEx* despesas de capital. Estima que varia entre \$ 660.000 e \$ 2.640.000 (SI OCEAN, 2013). Em seguida, os custos associados aos procedimentos para licenças também são levados em conta. Estes são estimados como 3,7% da potência da planta (Watts) em dólares americanos (LI; LENÇE; CALISAL, 2011), ou seja, para uma planta de 100 MW, o custo das permissões e licenças totalizariam 3,7 milhões de dólares.

Também é necessário levar em consideração os outros elementos da instalação elétrica. A mais relevante é a subestação elétrica, cujo custo varia de acordo com a elevação da tensão necessária para entregar eletricidade à rede. Por exemplo, o custo de uma subestação para elevar a tensão de 11 para 33 kV é de \$ 1.000.000, e de 11 para 66 kV, \$ 1.124.000 (DE OLIVEIRA *et al.*, 2021).

Com relação aos custos de capital, no qual está incluído o dispositivo, é estimado para cada dispositivo de 8.200 \$/kW e para construção estrutural em torno de 15.900 \$/kW (OCEAN ENERGY SYSTEMS - OES, 2015). O cálculo do custo inicial, realizado com a Equação (29) diz respeito ao valor necessário para aquisição dos dispositivos de conversão de energia e outros elementos para a usina, assim como suas instalações. Pode ser calculado basicamente:

$$C_{inicial} = N \cdot C_{dispositivos} + L_{cabos} \cdot C_{cabos} + C_{ee} + C_{subest} + C_{prelim} \quad (29)$$

N: Quantidade de dispositivos instalados

$C_{dispositivos}$: Valor de cada dispositivo

C_{cabos} : Custo com cabos

C_{ee} : Custo com equipamentos elétricos

C_{subest} : Custo da subestação

C_{prelim} : Custos Preliminares (Pré-Operacionais)

Tabela 2 – Resumo da base de cálculo para os Custos Iniciais do projeto

CUSTOS INICIAIS	
Custos Preliminares	FORMA DE CALCULO
Custos Pré-Operacionais da Planta	10% do Custo total de Capex
Custos com Licenças	3,7% do valor absoluto da capacidade de potência em Watts
Custos com Capital (CaPex)	
Custo Unitário de Dispositivo	8.200,00 \$/kW
Custo de Construção Estrutural	15.900,00 \$/kW
Custo com subestação e equipamentos elétricos	Fixado em \$ 1.600.000,00

Fonte: Autor

4.6.2 Custos Operacionais

Para o caso de operação e manutenção (anual) estima-se 4.180 \$/kW, porém estes valores podem ser reduzidos conforme o aumento de capacidade instalada. A *Sandia National Laboratories* disponibiliza através do seu site uma planilha para desdobramento de custos e análise desses valores do modelo CAO (BULL *et al.*, 2014).

4.6.3 Custos de Descomissionamento

Estima-se uma vida útil de 20 anos do projeto, após os quais toda a planta deve ser desmontada, e o custo de descomissionamento é estimado 5% dos custos de capital ("Projected Costs of Generating Electricity 2010", 2010).

5 VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA DE DISPOSITIVOS CAO

Neste capítulo são comparados os resultados numéricos obtidos com o software *WAMIT* para o RAO da elevação da coluna de água de oscilante e pressão de diversos dispositivos CAO. Também é apresentado um método para o cálculo de um coeficiente de amortecimento para o sistema de coluna d'água oscilante para posteriormente ser utilizado, utilizando como base os resultados experimentais (SHENG *et al.*, 2012).

5.1 VALIDAÇÃO PARA UM CAO CILÍNDRICO EM ESCALA REDUZIDA

Dos ensaios de (SHENG *et. al*, 2012), foi determinada uma expressão analítica para determinar o RAO de potência média gerada ou *PTO (Power Take Off)*, assim como a eficiência de geração de energia. Estas expressões encontram-se nas Equações (30) e (31) (SHENG *et. al*, 2012).

$$\bar{P} = \frac{2\pi^2 \rho_a A_0 N}{3C_q^2} \cdot \left(\frac{A_0}{A_1}\right)^2 \cdot \left(\frac{H^3 X_7^3}{T^3}\right) \quad (30)$$

$$\eta = \frac{64\pi^3 \rho_a A_0}{3C_q^2 \rho_w g^2 B} \cdot \left(\frac{A_0}{A_1}\right)^2 \cdot \left(\frac{H X_7^3}{T^4}\right) \quad (31)$$

Onde:

N : Quantidade de dispositivos instalados

C_q : Coeficiente adimensional de perda de carga do fluxo de ar na câmara

g : Aceleração da gravidade (m/s²)

ρ_a : Massa específica do ar (ton/m³)

ρ_w : Massa específica da água (ton/m³)

A_0 : Área da seção da câmara (m²)

A_1 : Área da seção da turbina *Wells* (m²)

H : Altura de onda (m)

X_7 : Operador de Resposta de Amplitude (RAO)

T : Período de onda (s)

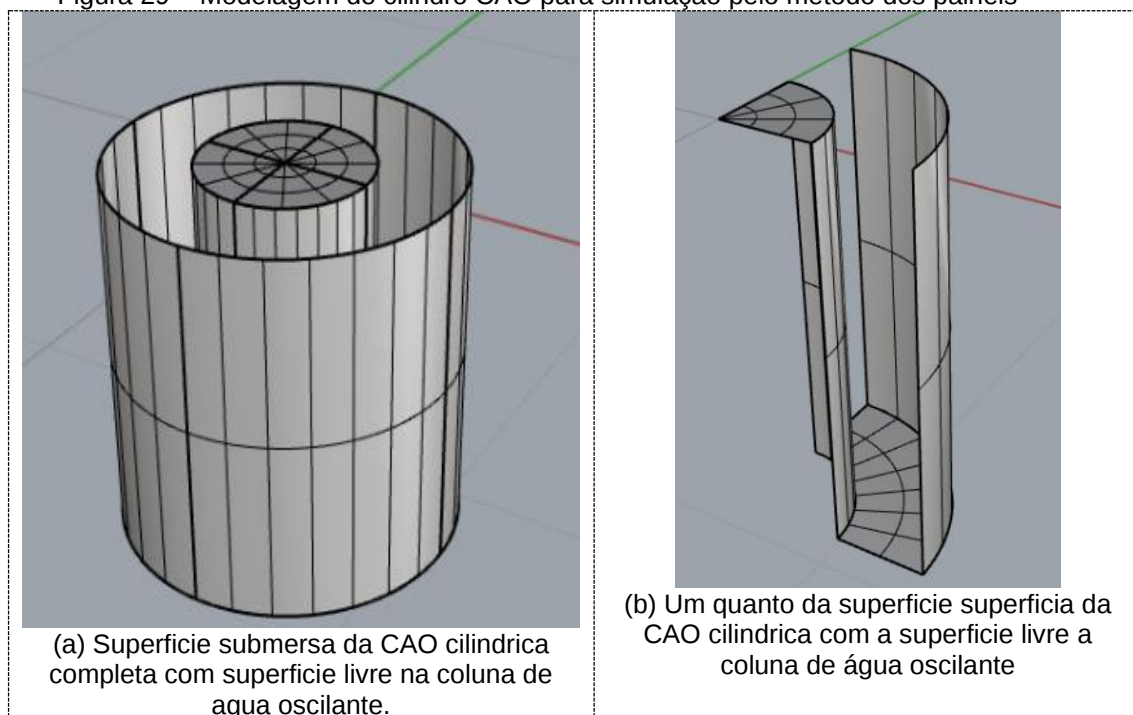
B : Largura da coluna d'água (m)

5.1.1 Determinação da elevação interna da coluna de água oscilante de um CAO

Os resultados da elevação da coluna de água da CAO testados por (SHENG et. al, 2012) foram reproduzidos para fins de testes iniciais com o *WAMIT*; a comparação de respostas de amplitude RAO é apresentado na Figura 30.

Foi modelado um cilindro tal como já foi indicado nas medições da Figura 11, com massa inserida no programa de aproximadamente 20 kg em condição flutuante. A Figura 29 mostra a fase de modelagem do cilindro para ser simulado pelo método dos painéis.

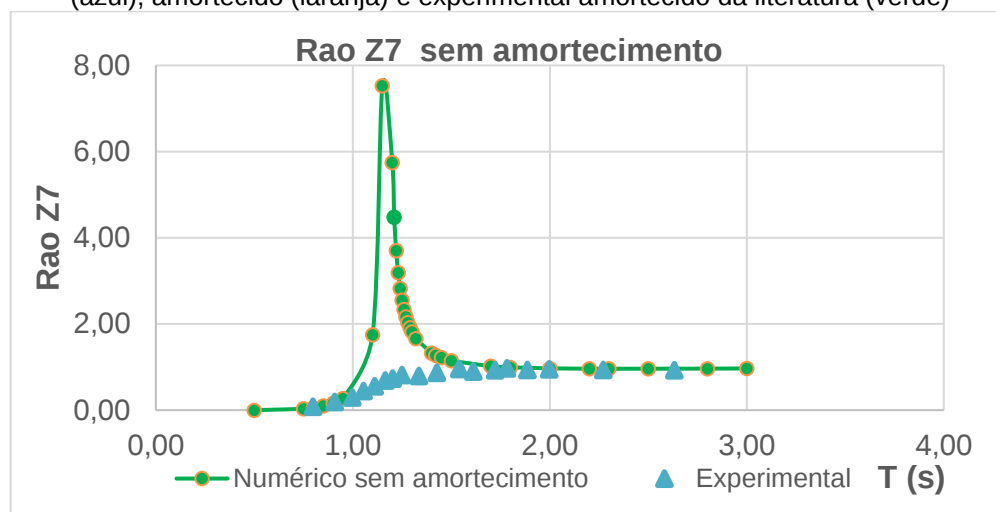
Figura 29 – Modelagem do cilindro CAO para simulação pelo método dos painéis



Fonte: Autor

O gráfico da Figura 30 apresenta o resultado do RAO da coluna de água oscilante no *WAMIT* sem considerar o efeito do amortecimento produzido pela presença da turbina *Wells* nem os efeitos viscosos produzidos no fundo da CAO. Os resultados experimentais foram retirados de (SHENG et. al, 2012) e encontram-se apresentados com indicadores em formato triangular, estes foram obtidos para os ensaios realizados em ondas regulares com altura de 0,04 m e com diâmetro do orifício de topo igual a 0,012m.

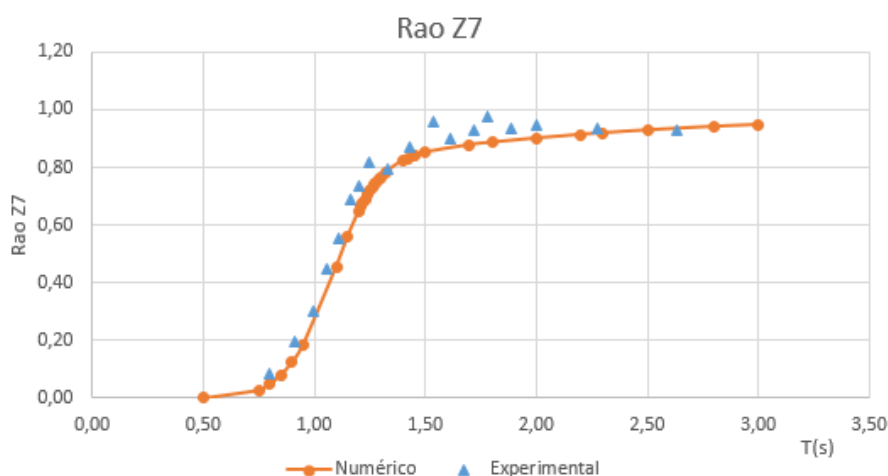
Figura 30 – Gráfico comparativo de elevação da coluna d'água RAO simulado sem amortecimento (azul); amortecido (laranja) e experimental amortecido da literatura (verde)



Fonte: adaptado de Sheng et al. (2012)

Considerando as mesmas condições ao caso anterior, mas inserindo um coeficiente de amortecimento de 7 kg/s para a superfície livre da coluna d'água nas configurações do *WAMIT*, chega-se ao gráfico da Figura 31.

Figura 31 – Gráfico comparativo sobre o RAO da elevação da coluna de água, experimental e numérica com amortecimento

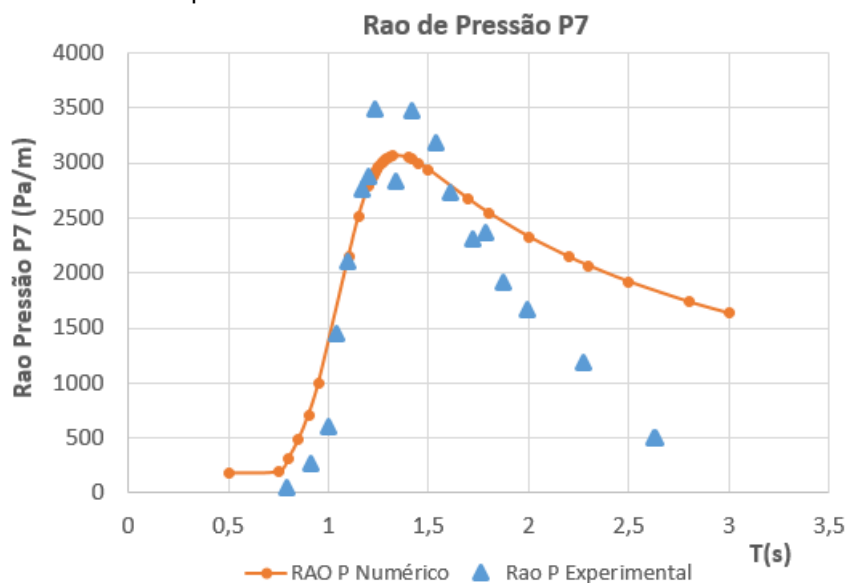


Fonte: adaptado de Sheng et al. (2012)

Logo, verifica-se que o modo de implementação utilizado no *software WAMIT* parece ser coerente com resultados observados em laboratório.

Adicionalmente, foi determinado o RAO da pressão na câmara da OWC cilíndrica considerando a inclusão de amortecimento, os resultados encontram-se apresentados na Figura 32. O valor do coeficiente de perda de carga C_q considerado foi 0,65 (SHENG et. al, 2012)

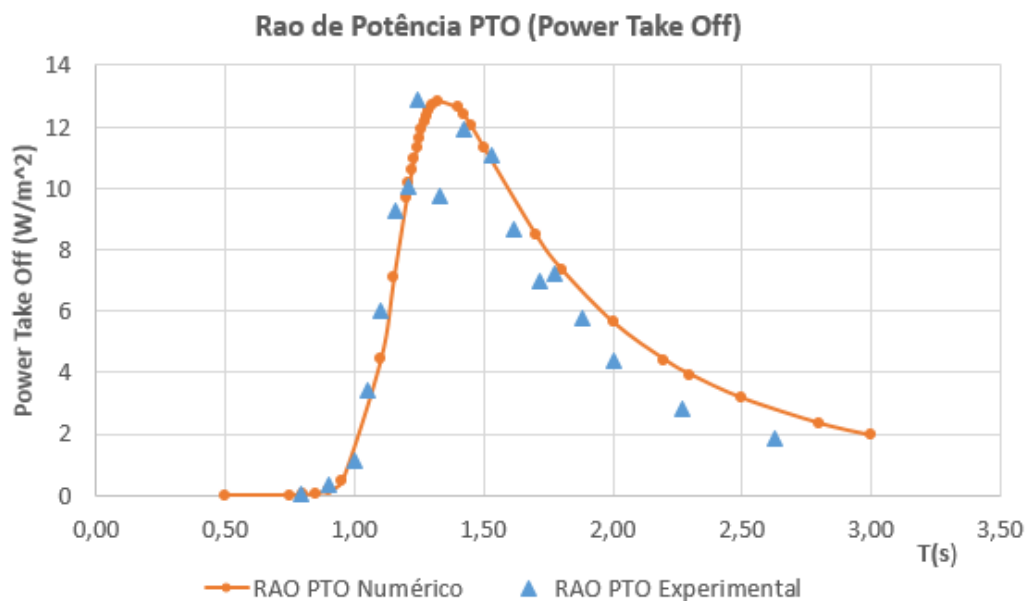
Figura 32 – Gráfico comparativo sobre o RAO da pressão no interior da câmara da coluna de água, experimental e numérica com amortecimento



Fonte: adaptado de Sheng et al. (2012)

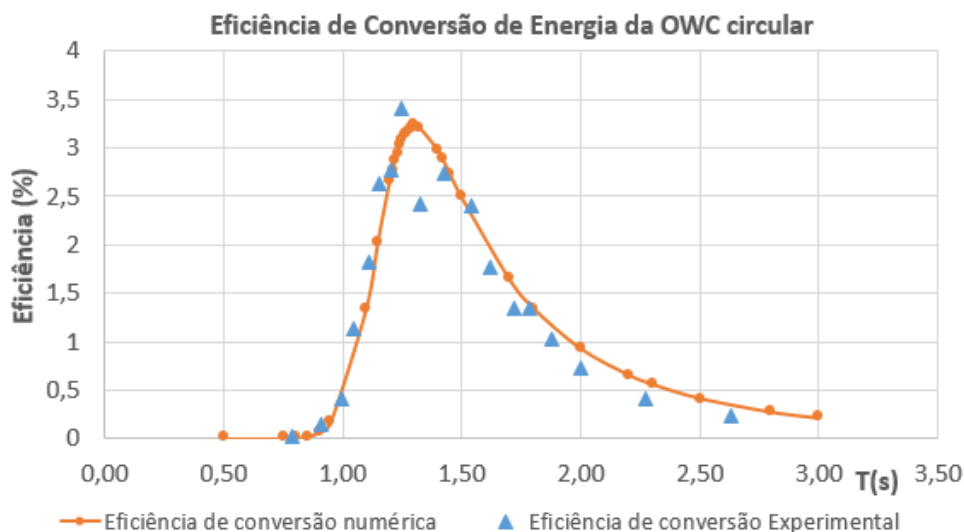
O RAO da potência gerada pela elevação da coluna de água oscilante através do orifício no topo da câmara da OWC denominada como *PTO* (*Power Take Off*) é apresentada na Figura 33, a eficiência de geração de energia (Equação (9)) é apresentada na Figura 34.

Figura 33 – Gráfico comparativo sobre o RAO de Potência PTO do interior da câmara da coluna de água, experimental e numérica com amortecimento



Fonte: adaptado de Sheng et al. (2012)

Figura 34 – Gráfico comparativo sobre a eficiência de conversão de energia no interior da câmara da coluna de água, experimental e numérica com amortecimento



Fonte: adaptado de Sheng et al. (2012)

Os valores experimentais das Figura 33 e Figura 34 foram obtidos por Sheng et. al (2012) a partir das equações (30) e (31) em combinação com os resultados experimentais obtidos por eles. Observou-se uma grande semelhança com os resultados numéricos obtidos pelo presente trabalho.

5.1.2 Determinação da equação de amortecimento de uma CAO

Para melhorar o modelo de previsão do comportamento da coluna de água, o amortecimento precisa ser corrigido. Visto que a teoria potencial não consegue representar efeitos viscosos e de geometria, este amortecimento precisa ser inserido em forma externa nas simulações.

Com os experimentos realizados no trabalho é possível determinar uma formulação para estimar o coeficiente de amortecimento partir de resultados experimentais de (SHENG *et al.*, 2012). A partir desta referência, é determinada uma tabela com os coeficientes de amortecimento do sistema coluna d'água oscilante em função da razão entre a área de seção transversal da coluna d'água e da turbina *Wells* (Tabela 3).

Tabela 3 - Resultados de amortecimentos experimentais para uma coluna d'água oscilante sob variação do diâmetro de topo

Altura de Onda (m)	Diâm. Orifício (m)	Área (%)	Amortecimento (kg/s)
0,04	0,008	0,50	14,0
0,04	0,012	1,22	7,0
0,04	0,014	1,70	5,0
0,04	0,016	2,28	3,5
0,04	0,022	4,26	2,0
0,02	0,008	0,50	10,0
0,02	0,012	1,22	4,5
0,02	0,014	1,70	3,0
0,06	0,008	0,50	15,0
0,06	0,012	1,22	7,5
0,06	0,014	1,70	5,0

Fonte: adaptado de Sheng *et al.* (2012)

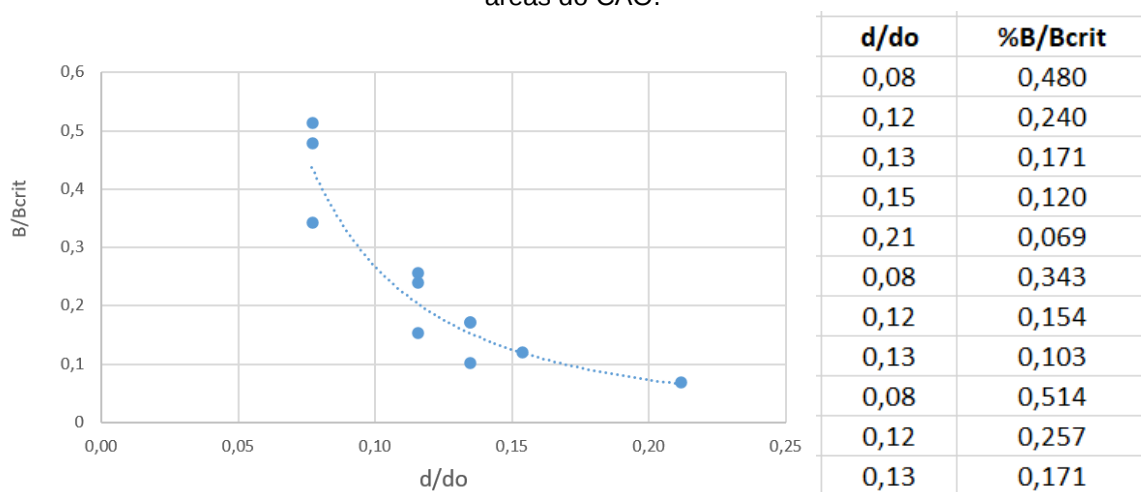
Visto que são amortecimentos dimensionalizados para o caso em questão, foi feita uma conversão para adimensionalizá-los e ter a possibilidade de obter uma equação a qual possa ser expandida para outros casos. Para isso, os resultados de amortecimento para cada ponto são divididos por um amortecimento crítico comum a todos os casos, o qual é calculado a partir do amortecimento crítico da equação fundamental de vibração amortecida, conforme a equação (32).

$$B_{crit} = 2(A_0\rho_{H2O}h_{coluna} + m_{adicional})\omega_n \quad (32)$$

Onde A_0 é a área da câmara, ω_n é frequência natural do sistema (rad/s), ρ_{H2O} é a massa específica da água, h_{coluna} hcoluna é a altura da coluna d'água em repouso, $m_{adicional}$ é a massa adicional de água sendo inserida na câmara.

Logo, todos os valores de amortecimento da coluna de água obtidos nessa publicação são organizados e colocados todos numa mesma curva, finalmente resultando na Figura 35:

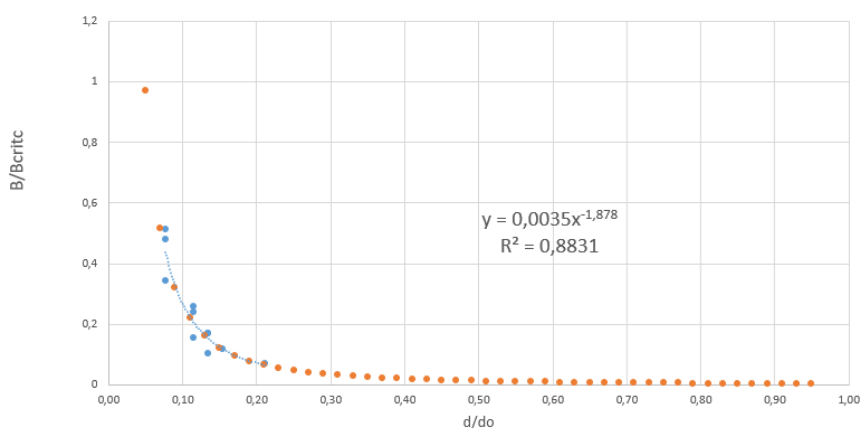
Figura 35 - Curva dos coeficientes de amortecimento experimentais em função da razão entre as áreas do CAO.



Fonte: Autor

Sobre a curva dos dados experimentais é determinada uma regressão exponencial - modelo que melhor se adequou ao caso - que depende do diâmetro da câmara e o diâmetro da turbina *Wells* (Figura 36), portanto determinando a Equação (33) a qual será usada para estimativa de um coeficiente de amortecimento em função da geometria.

Figura 36 - Regressão exponencial baseada em dados experimentais



Fonte: Autor

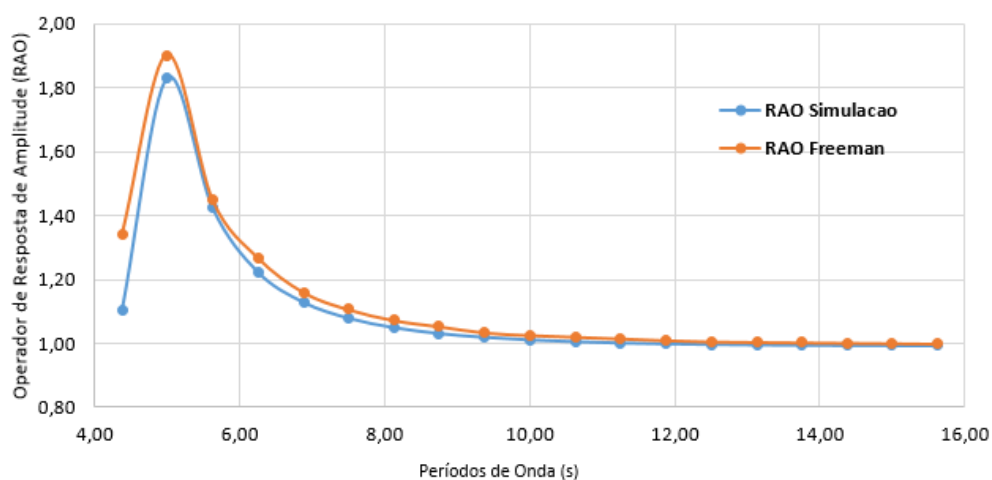
$$\frac{B}{B_{crit}} = 0,0035\left(\frac{d}{d_0}\right)^{-1,878} \quad (33)$$

5.2 VALIDAÇÃO PARA UM CAO FIXO EM MAIOR ESCALA

Para a fase de validação dos resultados da simulação da CAO utilizando o *WAMIT*, foram comparados os resultados de resposta da elevação da superfície livre da coluna d'água em função da altura de onda com os resultados de uma tese de doutorado de (FREEMAN, 2015).

Aplicando características estruturais já mostradas na Figura 13 numa simulação sem amortecimento no *software WAMIT*, a curva de RAO de elevações da coluna d'água em função da altura de onda incidente é comparada com aquela encontrada na tese citada. É possível visualizar a semelhança na Figura 37, portanto condizente com o resultado alcançado na simulação teste, que terá o código utilizado como base para simulações futuras neste trabalho.

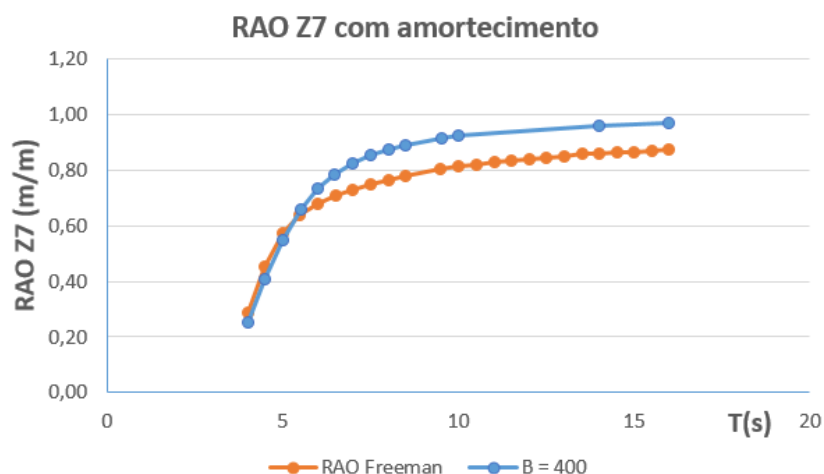
Figura 37 - Gráfico comparativo entre a curva de RAO da elevação da coluna de água oscilante de Freeman (2015) e os resultados obtidos no presente trabalho utilizando o *WAMIT* sem amortecimento



Fonte: adaptado de Freeman (2015)

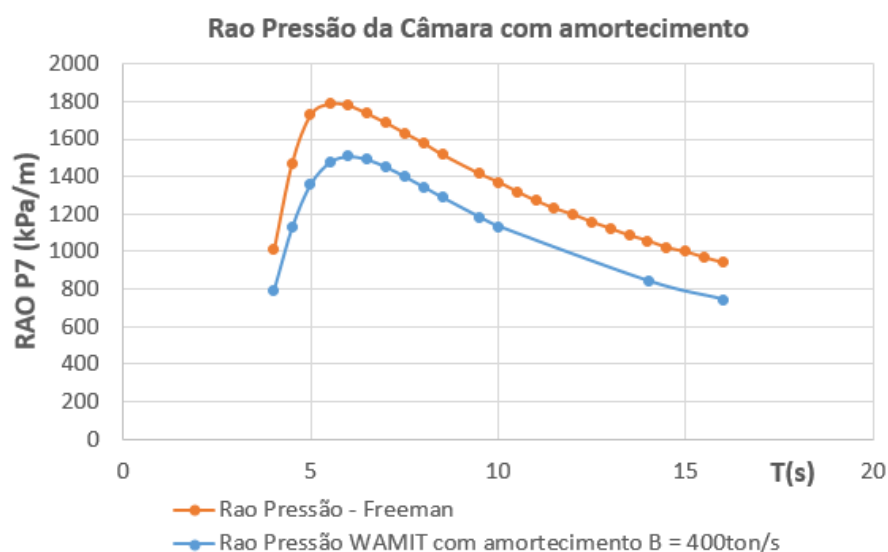
Adicionalmente foram comparadas as curvas de RAO da elevação da coluna de água (Rao Z_7) e a pressão na camara da OWC (Rao P_7), estas comparações encontram-se nas Figura 38 e Figura 39.

Figura 38 - Gráfico comparativo entre a curva de RAO da elevação da coluna de água oscilante de Freeman (2015) e os resultados obtidos no presente trabalho utilizando o WAMIT com amortecimento de 400ton/s



Fonte: adaptado de Freeman (2015)

Figura 39 - Gráfico comparativo entre a curva de RAO da pressão na câmara da coluna de água oscilante de Freeman (2015) e os resultados obtidos no presente trabalho utilizando o WAMIT com amortecimento de 400ton/s



Fonte: adaptado de Freeman (2015)

Apesar da diferença de posicionamento entre as curvas de ambos os gráficos, o fato de serem semelhantes foi interpretado como satisfatório para utilização do WAMIT, já que o caso não-amortecido foi tão semelhante, mas uma investigação muito mais minuciosa seria necessária para determinar quais são os fatores que na metodologia de Freeman utilizando o ANSYS AQWA diferem na reprodução computacional no WAMIT no momento da inclusão de um amortecimento no sistema.

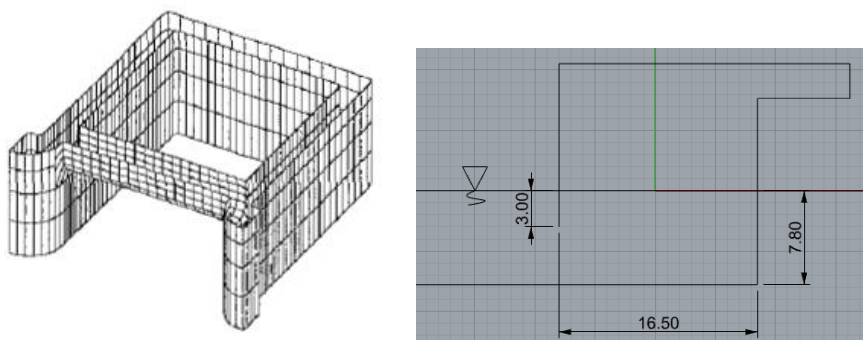
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES DO DISPOSITIVO CAO PARA O PORTO DE RECIFE

A priori, os dados de onda foram determinados a uma distância de aproximadamente 2 km do local de instalação do quebra-mar do Porto do Recife (Figura 44). Posteriormente foi reproduzido de um estudo já conhecido a fim de comparar a resposta da elevação de coluna d'água e validar, finalmente simular o contexto principal do trabalho, incluindo um fator de amortecimento que é intrínseco ao sistema. Finalmente, ao estimar a potência gerada, foi feito o cálculo de análise de viabilidade econômica.

6.1 MODELAGEM DA GEOMETRIA ESTRUTURAL PARA UM DISPOSITIVO CAO

A estrutura possui uma câmara que pode ser modelada por um formato quadrado com 12m de lado com calado (profundidade) de 7,8m (Figura 40) (BRITO-MELO; SARMENTO, 2002).

Figura 40 - Prévia da modelagem de uma estrutura para simulação de um CAO



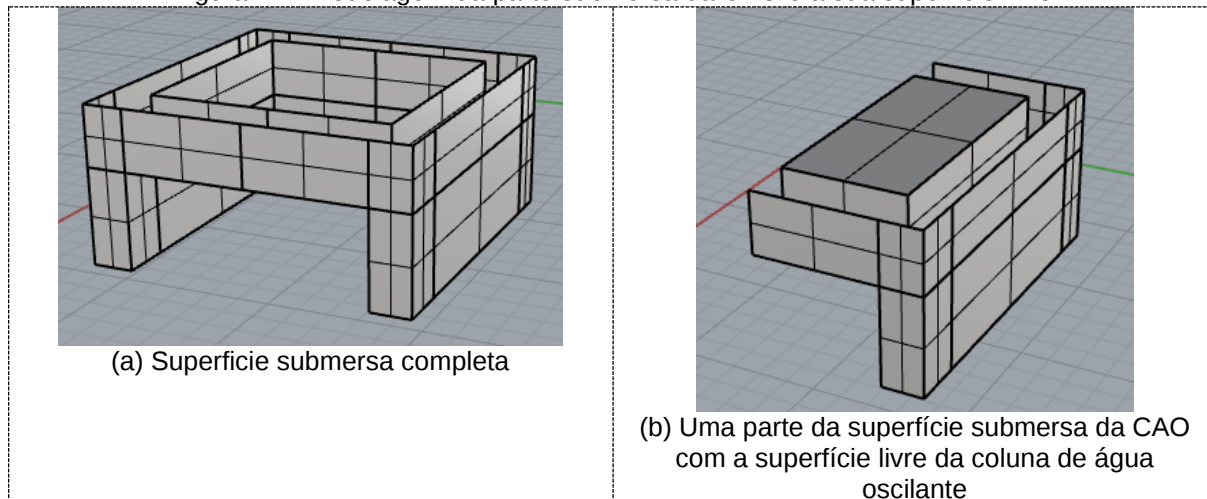
Fonte: (BRITO-MELO; SARMENTO, 2002))

6.1.1 Modelagem da geometria da CAO

Para a modelagem é necessário representar as paredes submersas em contato com água do exterior e interior da CAO com superfícies NURBs e também é necessário representar a superfície livre da coluna de água oscilante. Devido ao fato que o corpo apresenta simetria em relação a um dos eixos, aproveita-se esta

característica e somente se representa a metade. Para realizar esta tarefa utilizou-se o software comercial *Rhinoceros v7.0*, ver Figura 41.

Figura 41 - Modelagem da parte submersa da CAO e a sua superfície livre



Fonte: Autor

Finalmente foi exportada esta geometria no arquivo com extensão .gdf, o qual é aceito pelo software de análise hidrodinâmica *WAMIT*.

Foi modelada em três dimensões uma estrutura semelhante ao formato utilizado na planta de Pico, em Portugal. Este arquivo é uma das entradas necessárias para o *WAMIT* e deve estar em formato *B-Splines*.

6.1.2 Resultados da simulação hidrodinâmica

A elevação da coluna de água apresenta valores muito elevados devido à falta de amortecimento produzido pelos efeitos viscosos entre a estrutura e a água da coluna de água oscilante. Portanto, a resposta ilustrada na Figura 42 é superestimada.

Figura 42 – Resposta para elevação da coluna d'água sem amortecimento para um CAO no Porto do Recife



Um dos arquivos de configurações, que contém a descrição física do corpo a ser estudado como, por exemplo, massa, altura do centro gravitacional, inércias etc., também contém a opção de inserir amortecimentos externos.

Para melhorar a modelagem que representa o comportamento da coluna de água, o amortecimento precisa ser corrigido. Em vista que a teoria potencial não consegue representar efeitos viscosos, este amortecimento precisa ser inserido dentro do *WAMIT* de forma externa.

Calculou-se inicialmente o valor crítico de amortecimento. Para isto, percebe-se na Figura 42 um pico para o período de onda $T=6,5s$, ou seja, o período no qual o sistema tende a entrar em ressonância. Logo, calcula-se o amortecimento crítico conforme Equação (32). Os dados utilizados no cálculo encontram-se na Tabela 4, resultando em um amortecimento crítico de 5262,224 ton/s. O valor de massa adicional de água é fornecido pelo próprio *WAMIT* como resultado das simulações.

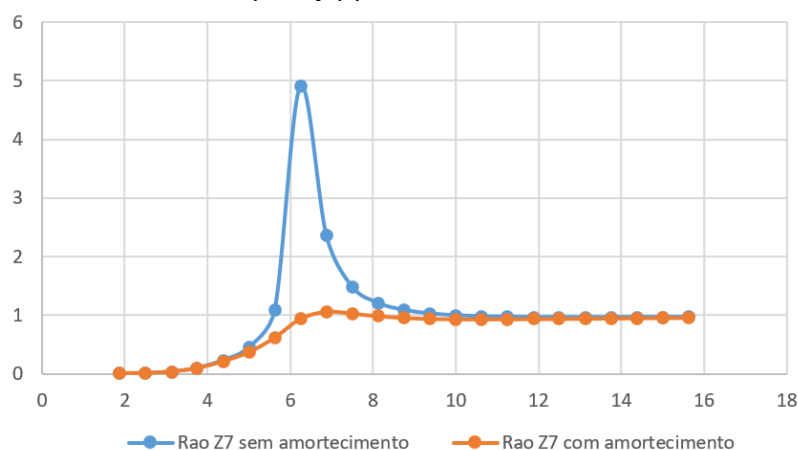
Tabela 4 – Dados para cálculo do amortecimento crítico

d_0	12	m
m	1151,28	ton
$m_{\text{adicional}}$	1466	ton
T_0	6,25	s
w_n	1,01	rad/s
B_{crit}	5262,2	ton/s

Fonte: Autor

Foi visto na equação (33) como obter o valor de amortecimento, dados o amortecimento crítico e a geometria da câmara. Com o valor anteriormente alcançado e os dados de geometria já definidos, chega-se a um valor de amortecimento igual a 409,841 ton/s na elevação vertical da coluna de água oscilante. O que resulta na curva de pico mais achatado da Figura 43, a qual será usada para estimar a elevação de coluna d'água.

Figura 43 – Resposta para elevação da coluna d'água sem amortecimento (azul) e com amortecimento (laranja) para um CAO no Porto do Recife

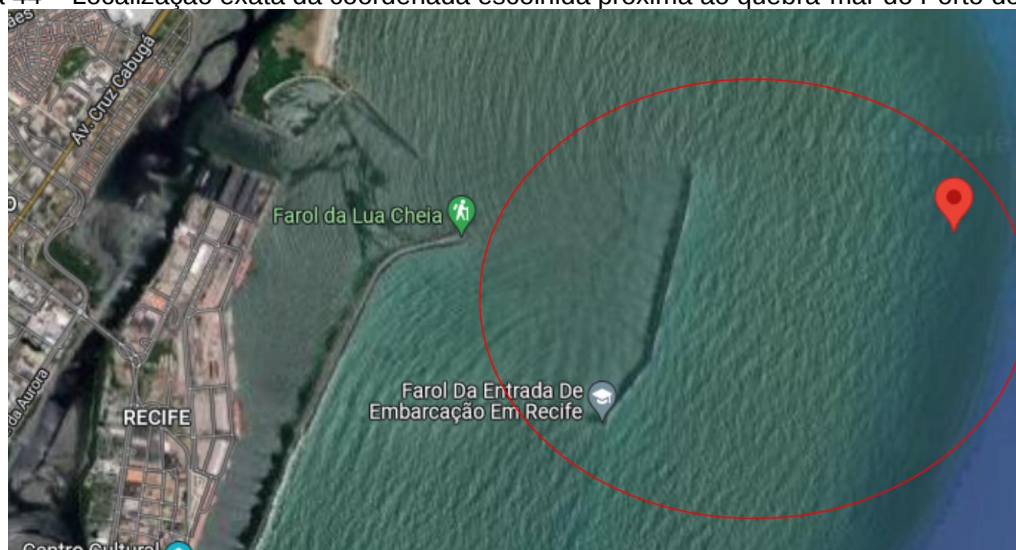


Fonte: Autor

6.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ONDAS MARÍTIMAS NO QUEBRA-MAR DO PORTO DO RECIFE

No primeiro passo, foram definidas as coordenadas de um ponto próximo ao quebra-mar do Porto do Recife e que ao mesmo tempo estivesse disponível como *DOW* no *software*. As coordenadas selecionadas foram: 8° 02' 49" S ; 34° 50' 24"W (Figura 44).

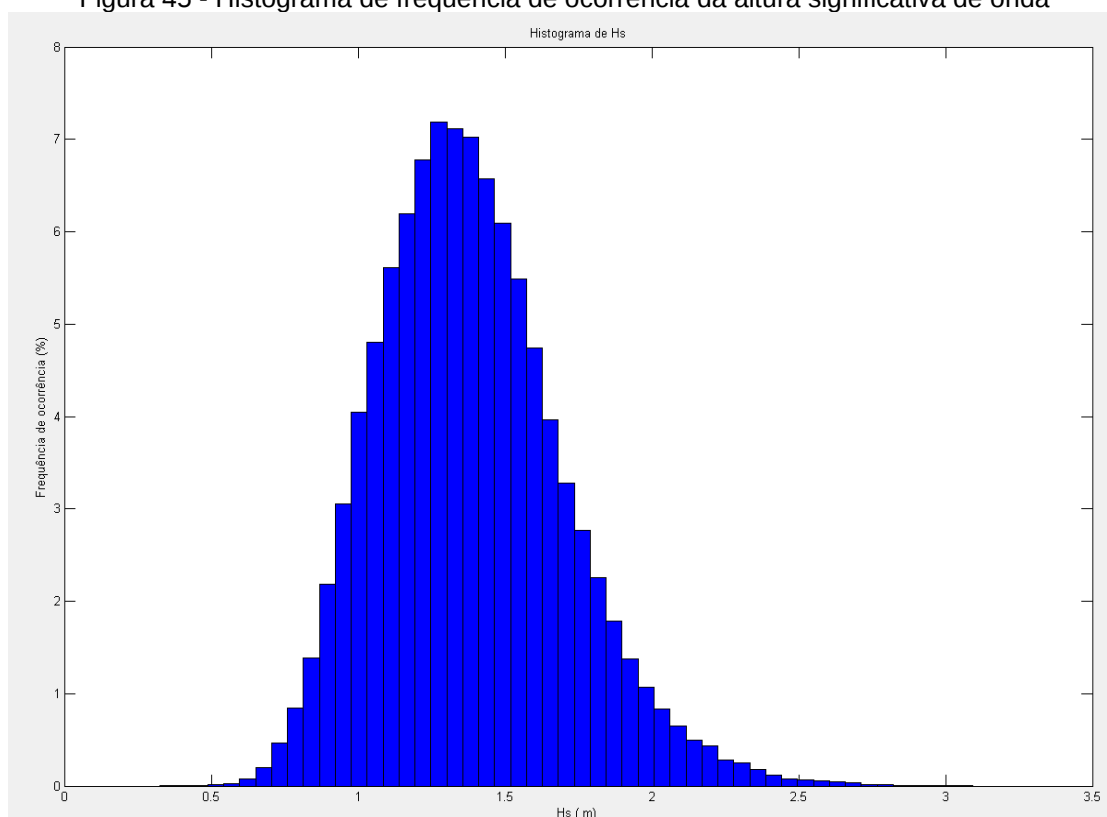
Figura 44 – Localização exata da coordenada escolhida próxima ao quebra-mar do Porto do Recife



Fonte: Autor

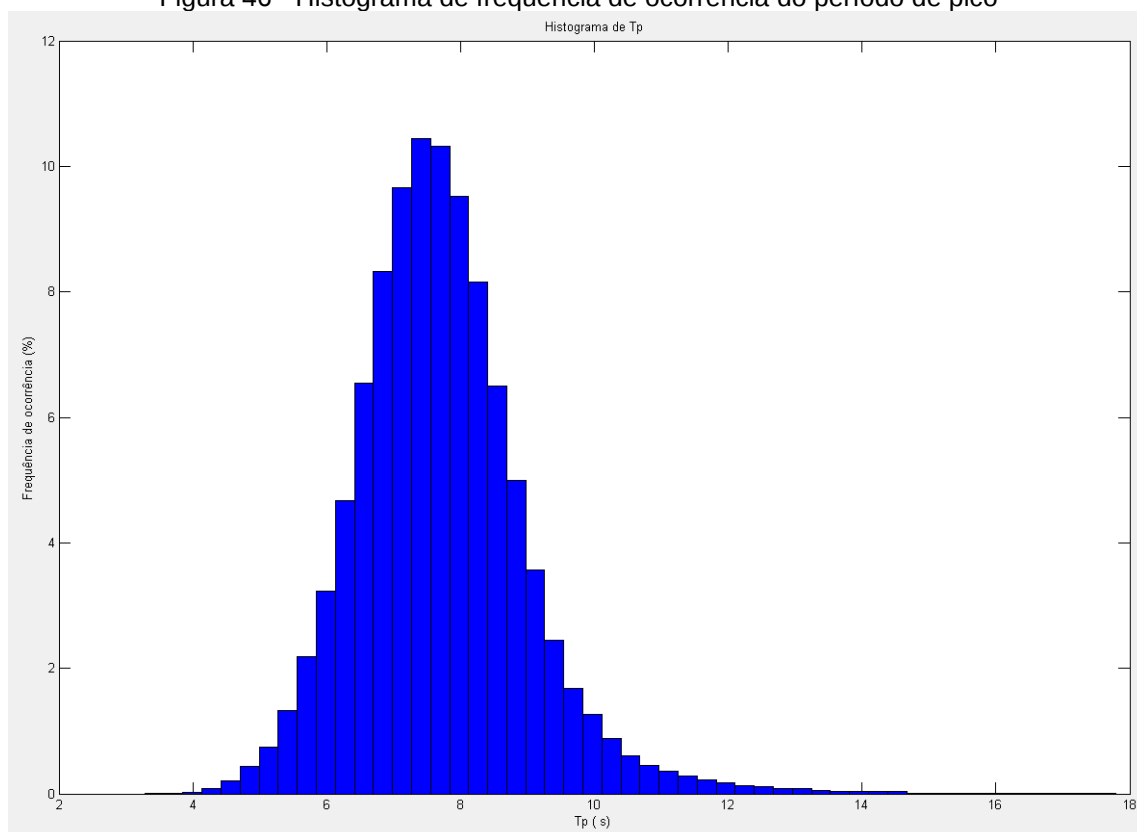
Enfim, os histogramas de frequências de probabilidade para H_s e T_p são obtidos.

Figura 45 - Histograma de frequência de ocorrência da altura significativa de onda



Fonte: Autor

Figura 46 - Histograma de frequência de ocorrência do período de pico



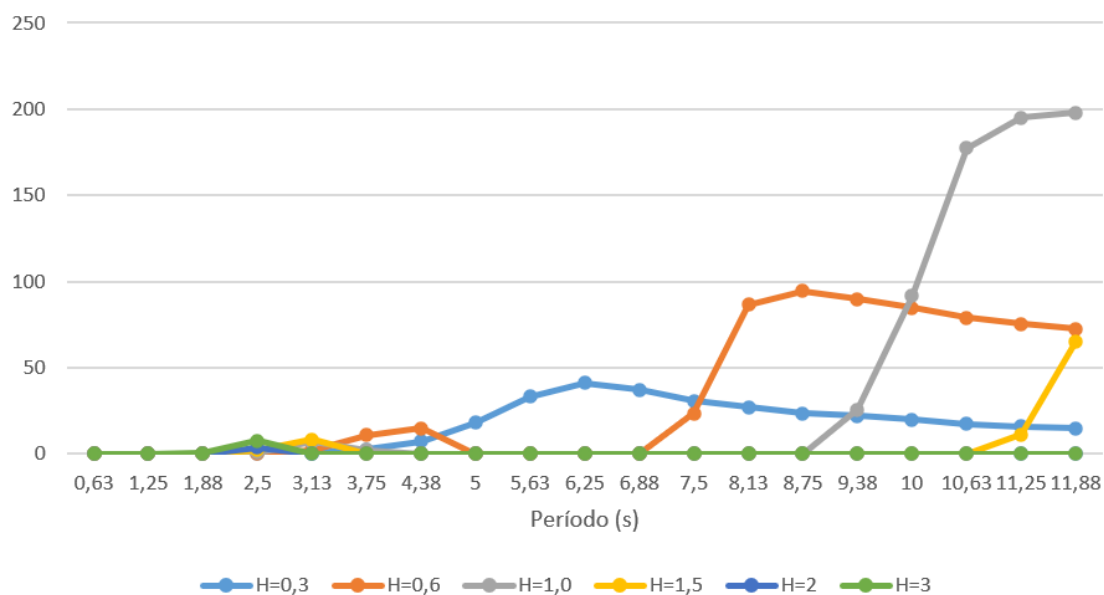
Fonte: Autor

Portanto, na Figura 45 assim como Figura 46 pode-se observar que a altura significativa e período de pico com maior propabilidade de ocorrência e que caracterizam a região escolhida são $H_s = 1,25\text{m}$ e $T_p = 7,6\text{s}$, pois coincidem com a condição a qual ocorre a condição de frequência natural do sistema, provocando o maior deslocamento da superfície livre da água, (Tabela 4).

6.3 DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA GERADA POR UMA TURBINA *WELLS* ACOPLADA A UM CAO PARA O PORTO DO RECIFE

O processo de cálculo da potência da turbina *Wells*, como já citado, ocorre conforme os dados de pressão na entrada da turbina, que inseridos na Equação (23) juntamente com a vazão mássica permitem o cálculo dos coeficientes de pressão, vazão e potência. Na Figura 47 é mostrado o comportamento para a rotação e potência em função do período de onda, para alturas de onda entre 0,3 e 3 metros.

Figura 47 – Potência de uma turbina *Wells* em função do período de onda incidente para alturas de onda diferentes

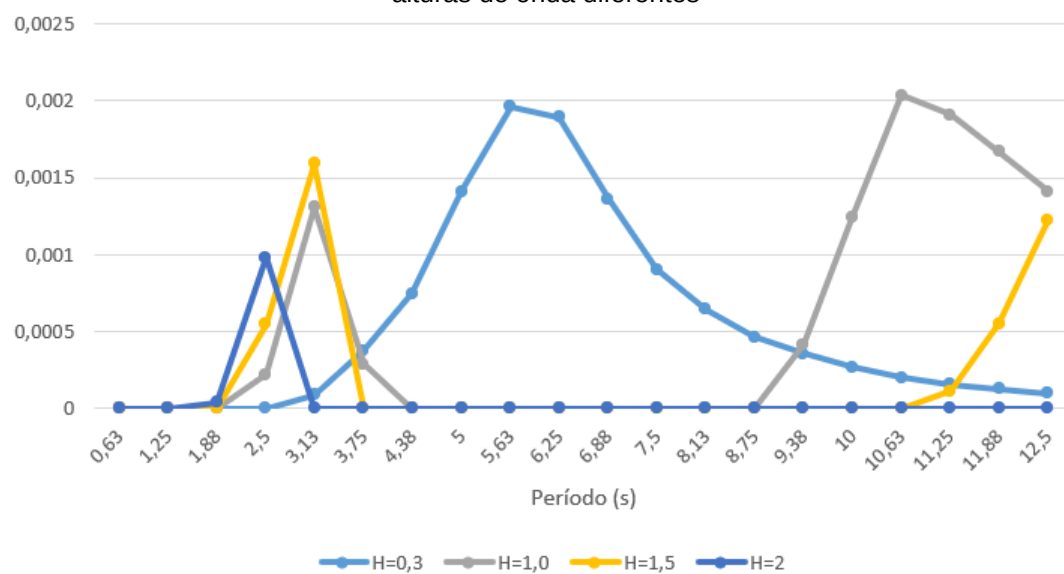


Fonte: autor

Percebe-se que a potência da turbina não possui uma tendência clara de comportamento em relação ao período e à altura de onda, tende a ter um melhor comportamento para ondas com 0,6m de altura, mas períodos muito altos.

A explicação desta grande oscilação ocorre pelas curvas experimentais intrínsecas de funcionamento da turbina *Wells*. Na Figura 26 foi visto que existe um coeficiente de potência máximo igual a $2,14 \cdot 10^{-3}$ para um determinado coeficiente de pressão da câmara que vale $6,72 \cdot 10^{-2}$, ou seja, se não houver um controle da pressão, não será atingido de maneira frequente o ponto de máximo coeficiente de potência da turbina. Na Figura 48 está o gráfico do coeficiente de potência em função do período de onda e variando conforme alturas diferentes de onda. Apenas alguns dos casos chegam próximo deste valor, demonstrando que um sistema de controle é extremamente necessário para otimizar a potência.

Figura 48 – Coeficiente de Potência da Turbina *Wells* em função do período de onda incidente para alturas de onda diferentes



Fonte: Autor

6.4 ELABORAÇÃO DA MATRIZ DE POTÊNCIA PARA O PORTO DO RECIFE

Basicamente os valores de resposta de elevação da coluna d'água (RAOs) foram calculados computacionalmente para cada período de onda. Posteriormente, para cada altura de onda multiplicada pelos RAOs, foi determinado o deslocamento próprio da coluna d'água dentro da câmara, que resulta em um fluxo de ar e um valor de pressão, propiciando cálculos de potência, já demonstrados nas equações (19), (20), (21).

6.4.1 Matriz de capacidade de potência do CAO

Com a simulação realizada no *WAMIT* levando em conta a estrutura citada anteriormente com a turbina *Wells* montada e sem um sistema de controle implementado, obtém-se a matriz de potência do dispositivo conversor de energia (Figura 49), mostrando que tal dispositivo pode produzir uma potência máxima de aproximadamente 212 kW (condição de mar com altura de 1,04 m e período de 12,5 s).

Figura 49 - Matriz de capacidade de potência simulada para um dispositivo de conversão de energia das ondas tipo CAO em quilowatts sem sistema de controle.

		Período (Ts) [s]																			
		0,63	1,25	1,88	2,5	3,13	3,75	4,38	5	5,63	6,25	6,88	7,5	8,13	8,75	9,38	10	10,63	11,25	11,88	12,5
Altura de Onda (Hs) [m]	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,89	2,23	2,50	1,75	0,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,92	2,81	7,31	15,11	17,32	14,82	12,20	9,97	8,24	7,32	6,25	5,01	3,52	1,80
	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	3,50	9,43	22,95	28,04	44,45	46,95	40,33	34,48	31,30	28,15	26,39	24,29	21,66	19,62
	0,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	1,93	8,78	19,50	2,45	0,00	0,00	7,76	60,31	80,03	75,86	70,74	65,03	62,11	58,91	54,99
	0,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,45	4,06	14,78	0,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,24	73,93	122,89	131,57	127,41	122,43	116,42
	1,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,98	7,62	0,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12,68	63,26	164,93	199,79	211,86
	1,36	0,00	0,00	0,00	0,00	1,76	10,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,88	57,15	150,80
	1,72	0,00	0,00	0,00	0,03	2,88	2,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2,12	0,00	0,00	0,00	0,16	4,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Autor

Como já detalhado na seção 4.5.2, tendo em mãos os valores de caracterização das ondas do mar foi possível primeiramente adquirir a matriz de probabilidades (Figura 50) relativas ao local de instalação (condições de mar) que, combinada com a matriz de capacidade de potência nominal (Equação (26)), proporciona uma potência instalada final.

Figura 50 - Matriz de probabilidades de onda para o quebra-mar do Porto de Recife

HS	TS														
	4,30	4,86	5,42	6,01	6,57	7,12	7,69	8,25	8,83	9,39	9,97	10,50	11,09	11,68	12,24
0,62	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
0,73	0,00%	0,00%	0,01%	0,02%	0,03%	0,05%	0,05%	0,04%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
0,85	0,00%	0,01%	0,02%	0,05%	0,10%	0,14%	0,15%	0,12%	0,07%	0,04%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
0,95	0,00%	0,02%	0,04%	0,10%	0,20%	0,30%	0,32%	0,25%	0,15%	0,07%	0,04%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%
1,06	0,00%	0,03%	0,06%	0,15%	0,32%	0,47%	0,50%	0,39%	0,24%	0,12%	0,06%	0,03%	0,02%	0,01%	0,01%
1,17	0,00%	0,03%	0,08%	0,20%	0,41%	0,60%	0,64%	0,51%	0,31%	0,15%	0,08%	0,04%	0,02%	0,01%	0,01%
1,27	0,00%	0,04%	0,10%	0,23%	0,47%	0,70%	0,74%	0,59%	0,36%	0,18%	0,09%	0,04%	0,02%	0,02%	0,01%
1,38	0,00%	0,04%	0,09%	0,23%	0,46%	0,68%	0,73%	0,57%	0,35%	0,17%	0,09%	0,04%	0,02%	0,02%	0,01%
1,49	0,00%	0,03%	0,08%	0,20%	0,40%	0,59%	0,63%	0,50%	0,30%	0,15%	0,08%	0,04%	0,02%	0,01%	0,01%
1,60	0,00%	0,02%	0,06%	0,15%	0,31%	0,46%	0,49%	0,39%	0,24%	0,12%	0,06%	0,03%	0,02%	0,01%	0,01%
1,71	0,00%	0,02%	0,04%	0,11%	0,22%	0,32%	0,34%	0,27%	0,16%	0,08%	0,04%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%
1,82	0,00%	0,01%	0,03%	0,07%	0,15%	0,22%	0,23%	0,19%	0,11%	0,06%	0,03%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
1,93	0,00%	0,01%	0,02%	0,04%	0,09%	0,13%	0,14%	0,11%	0,07%	0,03%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
2,03	0,00%	0,00%	0,01%	0,03%	0,05%	0,08%	0,09%	0,07%	0,04%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
2,14	0,00%	0,00%	0,01%	0,02%	0,03%	0,05%	0,05%	0,04%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2,25	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,02%	0,03%	0,03%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2,36	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,02%	0,02%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2,47	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Autor

Com a matriz da Figura 49, atinge-se uma potência real de 2,24 kW, o que é um valor baixíssimo que, de antemão, não é viável para execução. A partir disso, há indícios da necessidade de haver um sistema de controle relacionado ao fluxo e à pressão que chegam na turbina.

6.4.1.1 Dispositivo com um suposto sistema de controle

Visto o baixíssimo resultado de capacidade de potência, trabalhou-se com a possibilidade de haver um sistema de controle que, para valores fora do ponto ótimo de operação da turbina *Wells* utilizada, ele agiria sobre uma válvula na entrada da turbina para controlar a pressão e o fluxo de ar. Para o fluxo direcionado à turbina *Wells* foi utilizada nos cálculos a equação de continuidade, desconsiderando o efeito de compressibilidade do ar pelo fato de a velocidade de elevação da coluna d'água, e consequentemente da massa de ar acima da superfície livre, ser baixa por conta da grande área da câmara

Um sistema deste tipo caberia para um novo trabalho levando em conta as variáveis de entrada e saída, o desenvolvimento de um modelo matemático, posteriormente uma função transferência que represente o sistema e a técnica de controle, provavelmente por controlador proporcional, integral e derivativo.

Neste caso foi inserida uma condicional no excel para o coeficiente de operação $\frac{\phi^2}{\psi}$, isto é, esta deve ser tal que, quando excedido o seu valor máximo aceitável pela curva da turbina *Wells*, haverá um sistema de controle que irá ajustar as variáveis a fim de ajustar a razão para o valor ótimo de coeficiente de potência.

Tabela 5 - Comportamento dos coeficientes de pressão, fluxo e potência

Coef. Operação	Coef. Vazão	Coef. Pressão	Coef. Potência
$\frac{\phi^2}{\psi}$	ϕ	ψ	π
0,0045	0,0067	0,0099	0
0,0091	0,0135	0,0200	0,0002
0,0137	0,0202	0,0298	0,0005
0,0183	0,0271	0,0399	0,0009
0,0229	0,0338	0,0498	0,0013
0,0275	0,0406	0,0599	0,0019
0,0321	0,0473	0,0698	0,0021
0,0367	0,0542	0,0799	0,0008
0,0413	0,0609	0,0897	0,0002
0,0440	0,0649	0,0957	0

Fonte: Autor

A Tabela 5 mostra a correlação calculada pelo autor baseada nas curvas já apresentadas da turbina *Wells* tratada aqui neste trabalho. O coeficiente de operação possui um valor máximo de 0,0440, e o coeficiente de potência claramente tem um

pico de 0,0021 para um coeficiente de operação ótimo igual a 0,0321. Portanto, foi implementada uma condicional simples que, quando o coeficiente de operação para um determinado estado de mar estivesse acima do máximo (0,0440), seria considerado no cálculo da potência o valor ótimo de 0,0321, supostamente consequência do uso de um sistema de controle no sistema. Com isso, a matriz de capacidade de potência foi recalculada para uma potência nominal de 84 kW para uma condição de mar de H_s igual a 2,12 m e T_s de 6,88 segundos (Figura 51), esta finalmente sendo usada para fins de cálculo preliminar de viabilidade.

Figura 51 - Matriz de capacidade de potência simulada para um dispositivo de conversão de energia das ondas tipo CAO em quilowatts com sistema de controle.

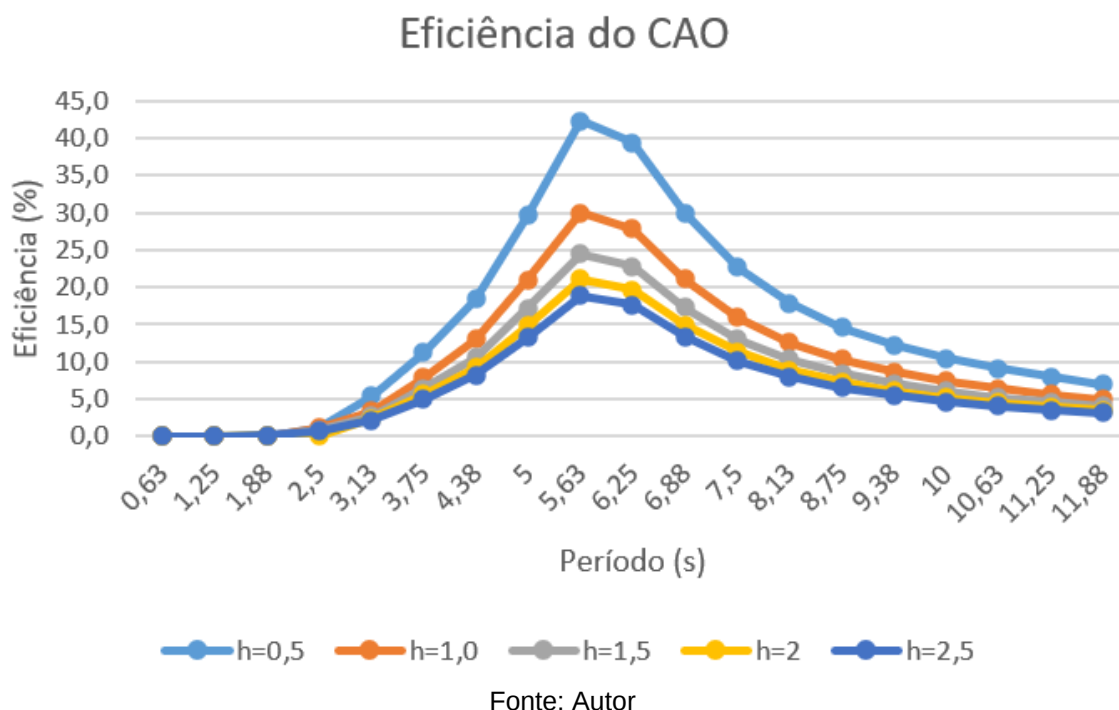
		Período (Ts) [s]																			
		0,63	1,25	1,88	2,5	3,13	3,75	4,38	5	5,63	6,25	6,88	7,5	8,13	8,75	9,38	10	10,63	11,25	11,88	12,5
Altura de Onda (H_s) [m]	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,04	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,17	0,39	0,65	0,65	0,59	0,47	0,38	0,32	0,27	0,25	0,22	0,20	0,18
	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,41	0,61	1,36	2,19	2,26	1,89	1,56	1,33	1,17	0,02	0,09	0,19	0,29	0,44
	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,33	0,20	1,77	3,27	5,24	5,42	4,53	3,73	3,19	2,81	2,53	2,30	2,12	1,97	1,84
	0,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	0,69	1,80	3,45	6,36	10,20	10,54	8,82	7,27	6,21	5,46	4,92	4,48	4,13	3,83	3,58
	0,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,03	3,09	5,92	10,92	17,52	18,10	15,14	12,48	10,67	9,38	8,45	7,70	7,10	6,58	6,14
	1,04	0,00	0,00	0,00	0,02	0,48	1,77	4,94	9,47	17,47	28,05	28,98	24,23	19,98	17,08	15,02	13,52	12,33	11,37	10,54	9,84
	1,36	0,00	0,00	0,00	0,04	0,72	2,64	7,39	14,17	26,13	41,94	43,33	36,24	29,88	25,54	22,46	20,22	18,43	17,00	15,76	14,71
	1,72	0,00	0,00	0,00	0,08	0,27	3,76	10,51	20,15	37,17	59,65	61,63	51,54	42,49	36,33	31,95	28,76	26,22	24,17	22,42	20,92
	2,12	0,00	0,00	0,00	0,13	1,29	5,14	14,38	27,57	50,86	81,63	84,33	70,52	58,15	49,71	43,72	39,35	35,88	33,08	30,67	28,63

Fonte: Autor

Levando em conta esse caso, o valor de potência gerada aplicado às condições do Porto do Recife é de 28,24 kW, portanto um fator de capacidade de 33,8% em relação à potência nominal (84 kW).

Quanto à eficiência do dispositivo, apesar da energia das ondas aumentar com a altura e o período, o próprio sistema tem uma limitação de geração. Para este caso, foram calculadas algumas curvas, e é possível notar que há um pico no período $T=5,63s$, e a eficiência diminui com o aumento da altura de onda, já que são ondas com mais energia por metro de comprimento. Logo, conclui-se um valor em torno de 25% em média, como mostrado na Figura 52.

Figura 52 – Gráficos de eficiência do CAO



Pela Figura 52 pode-se ter uma ideia de que períodos muito altos representam um fluxo de ar mais lento e baixa energia cinética a ser convertida, enquanto períodos muito baixos representam um fluxo curto e mais rápido, com alta energia cinética, porém uma baixa pressão na câmara. Logo, existe uma faixa considerada ideal para uma maior eficiência do CAO, com um aumento desta em função da altura de onda, que é proporcional a uma maior massa de ar sendo deslocada através da turbina.

6.5 DETERMINAÇÃO DA PRODUÇÃO ANUAL DE ENERGIA (PAE)

Utilizando a Equação (27) para o cálculo da produção anual de energia, considerando uma potência de 28,24 kW de um dispositivo e uma disponibilidade de 85%. Sendo esta disponibilidade baseada no relatório desenvolvido pela *Ocean Energy Systems*, que estima que projetos de conversão da energia das ondas em pleno funcionamento comercial podem chegar a 85% no mínimo de disponibilidade de funcionamento no ano (OCEAN ENERGY SYSTEMS - OES, 2015).

Obtém-se o valor de 210,3 MWh/ano que, levando em conta o consumo médio mensal de energia elétrica nas residências brasileiras de 152 kWh (1824 kWh/ano) (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2021), a usina com um dispositivo poderia abastecer em torno de 115 residências.

Segundo (PORTO DO RECIFE, 2021), houve um consumo de 811 MWh no ano para o porto. Conforme trabalhos anteriores para usinas de Pico e Islay (FALCÃO *et al.*, 2020; HEATH, 2002) houve alguns desvios na prática em relação ao que era previsto após o cálculo teórico, tais como a potência real de ondas, necessidade de otimização de aspectos técnicos detalhados da turbina *Wells* e influência da geometria da câmara na eficiência pneumática. Com isso, baseado nos resultados de (FALCÃO *et al.*, 2020; HEATH, 2002) considerou-se um fator de segurança de 100%, isto é, uma estrutura para oito dispositivos para serem capazes de suprir o dobro do consumo, com um fator de capacidade de 33,48%, com excedente de produção que pode ser comercializado no Ambiente de Contratação Livre (ACL) de energia elétrica.

Tabela 6 – Resumo de dados de produção para uma planta com dois dispositivos CAO no Porto de Recife

ENERGIA GERADA			
N Dispositivos	8	PAE (Por Dispositivo)	210,3 MWh/ano
Eficiência Elétrica	95%	PAE TOTAL	1682,1 MWh/ano
Disponibilidade	85%		
POR DISPOSITIVO		TOTAL	
Potência Real	28,24 kW	Potência Real Planta	225,90 kW
Potência Nominal	84 kW	Potência Nominal Planta	675 kW
		Fator de Capacidade	33,48 %

Fonte: Autor

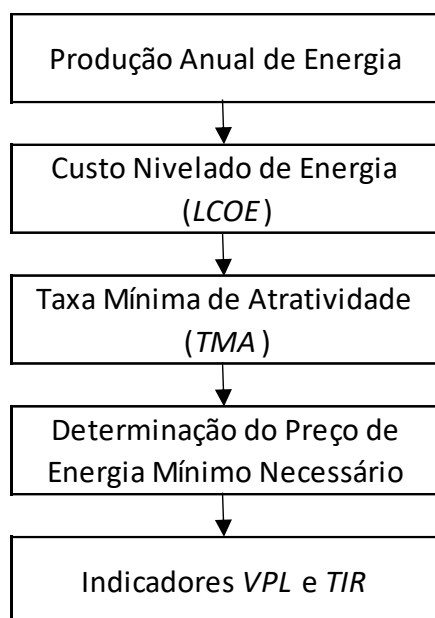
6.6 ANÁLISE PRELIMINAR DE VIABILIDADE ECONÔMICA

O processo de análise econômica de um projeto é um complexo sistema de tomada de decisões que leva em conta diversos fatores como rentabilidade, segurança da aplicação, planos de expansão do projeto, cenário local da economia, estabilidade política etc. (RYBA; LENZI, 2012).

Para este caso serão calculados os custos totais do projeto desde a implantação até a desativação, sem levar em conta a depreciação, inflação e variação cambial, além de estimar um fluxo de caixa como uma série de parcelas constantes. Após isso, foi realizado o cálculo do *LCOE* para compará-lo com outras alternativas. Em seguida, foi determinada uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA) em comparação com títulos públicos brasileiros para simular um critério mínimo de exigência para investidores; isso permitiu determinar uma taxa interna de retorno (TIR) e qual o preço

necessário da energia que gere uma receita para que o projeto atenda às expectativas de investidores, resultando em um valor presente líquido (VPL).

Figura 53 – Fluxograma de Método para análise de viabilidade econômica de projeto



Fonte: Autor

6.6.1 Custo Nivelado de Energia (LCOE)

Para a instalação de dois dispositivos CAO, totalizando uma capacidade de 188 kW até seu descomissionamento após 20 anos, utilizando as cotações do dólar igual a R\$ 5,30 e euro igual a R\$ 6,23 (2022), estima-se um custo de capital inicial de 42 milhões de reais, um custo de operação e manutenção anual de 5 milhões e um custo de descomissionamento de 1,9 milhão (Tabela 7) conforme as estimativas já abordadas na seção 4.7.

Tabela 7 - Resumo de custos para uma usina de um dispositivo CAO no Porto do Recife

CUSTOS INICIAIS	TOTAL	R\$	42.080.263,26
Custos Preliminares	USD	BRL	
Custos Pré-Operacionais da Planta	\$ 721.028,54	R\$	3.821.451,24
Custos com Licenças	\$ 8.358,42	R\$	44.299,60
Custos com Capital (CaPex)	USD	BRL	
Custo Unitário de Dispositivo	\$ 1.858.799,04	R\$	9.851.634,91
Custo de Construção Estrutural	\$ 3.588.278,77	R\$	19.017.877,51
Custo com subestação e equipamentos elétricos	\$ 1.763.207,55	R\$	9.345.000,00
CUSTO ANUAL DE OPERAÇÃO E MANUT.	TOTAL	R\$	5.004.657,64
Custos OpEx	USD	BRL	
Opex	\$ 944.275,03	R\$	5.004.657,64
CUSTO DE DESCOMISSIONAMENTO	TOTAL	R\$	1.910.725,62
Custos com Capital (CaPex)	USD	BRL	
Descomissionamento	\$ 360.514,27	R\$	1.910.725,62

Fonte: Autor

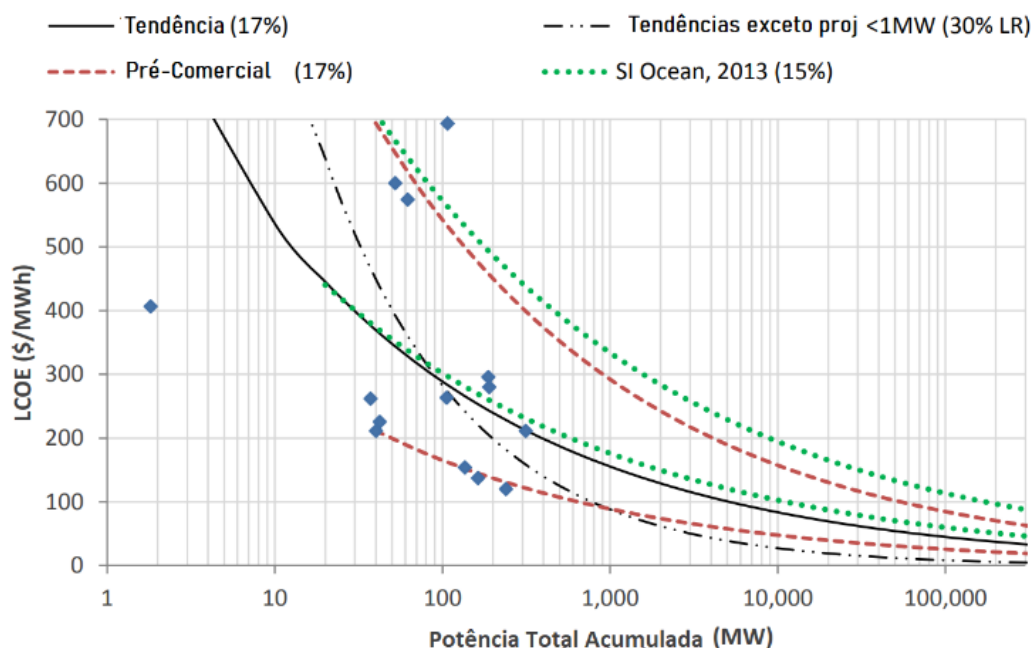
É sabido que os custos anuais e o custo de descomissionamento da planta experimentam efeito de uma taxa de desconto, que será considerado 14% e será explicado no próximo tópico o porquê deste valor. Todavia, para fins de uma melhor organização de conteúdo, já será utilizado este número a partir daqui.

O valor obtido para o *LCOE* é feito conforme a Equação (14) e pode ser melhor elucidado observando posteriormente a Tabela 10 com os devidos custos e parcelas anuais, resultando em um valor de 6,55 R\$/kWh. Este é um valor bastante elevado comparado a outros projetos de fontes renováveis no Brasil, como solar e eólica, que custam no corrente ano menos do que 0,5 R\$/kWh (IRENA, 2022).

Analisando a uma perspectiva mundial, o custo nivelado de energia tende a reduzir conforme a maturidade da tecnologia. No caso do CAO, existem projetos que estão em andamento e alguns dos maiores custos são com montagem da estrutura e aquisição dos dispositivos, além dos custos operacionais.

A Figura 54 mostra uma curva logarítmica média projetada pela *OES (Ocean Energy Systems)* para o custo nivelado de energia em função da potência instalada de tecnologias marítimas de geração de energia. Pelo fato de haver relativamente pouca potência instalada, o relatório estima que a taxa de aprendizado das energias renováveis varia entre 10 e 30%.

Figura 54 - Possível curva de aprendizado para tecnologias de conversão energética das ondas do mar baseado em projetos em andamento



Fonte: Ocean Energy Systems – OES (2015)

Portanto, considerando uma taxa de 17% para a energia das ondas baseado em projetos já existentes ou planejados, percebe-se na linha contínua em preto que ao atingir uma potência total acumulada em torno de 100 GW, o *LCOE* da energia das ondas atingiria um valor de aproximadamente 100 \$/MWh, que seriam no ano de 2022 cerca de 0,5 R\$/kWh, um valor mais competitivo com outras energias renováveis da atualidade.

6.6.2 Taxa Mínima Atrativa (TMA)

Primeiramente o investidor deve determinar uma taxa mínima de atrativa para realizar seus investimentos no projeto e, para este caso, utiliza-se como uma referência os valores correntes de títulos públicos do Brasil, já que esta é considerada uma opção de investimento do tipo Renda Fixa mais rentável do que a caderneta de poupança (opção mais básica de investimento) e com baixo risco. Baseado em opções de títulos públicos do ano de 2022 com taxa de rentabilidade prefixada para os próximos 10 anos (máximo período disponível) de aproximadamente 12% (TESOURO DIRETO, 2022), considerada uma taxa de juros atrativa mínima de 14% ao ano e foi utilizada como taxa de desconto para o investimento. Como já citado, foi desconsiderado o efeito da inflação, que tende a diminuir o ganho real.

6.6.3 Taxa Interna de Retorno (TIR)

Já foi visto que, para garantir a viabilidade de um projeto, a taxa interna de retorno (TIR) deve ser menor do que a taxa mínima de atratividade TMA, o que torna claro que todo o valor de receitas cobrirá todas as despesas durante a vida útil do projeto e gerará lucro no fechamento geral. Estimando uma TIR de 13% (aproximadamente a rentabilidade de títulos públicos) e levando em conta o investimento inicial (CAPEX), determina-se uma série uniforme de receita anual que caracterize esta condição. Para esse cálculo, todos os custos são trazidos a valor presente com a taxa de desconto igual à TIR e então calculada a série uniforme para valor total conforme formulação já mostrada, resultando em R\$ 11.018.547 de receitas anuais para que todo o valor custeado na vida útil do projeto seja retornado. O preço de energia suficiente para atingir esta condição é calculado dividindo a receita anual pelo PAE, resultando R\$ 6,55 reais por kWh gerado. No ano de 2022, o preço de energia para o consumidor cativo em Pernambuco está em torno de 0,7 R\$/kWh, ou seja, um valor nove vezes maior.

Tabela 8 – Resumo dos dados para estimativa de preço de energia necessário para fornecer receita de retorno

DADOS FINANCEIROS	
Preço de Energia (R\$)	R\$ 0,70
Taxa Interna de Retorno (%)	13
Receita Anual Mínima Atrativa	R\$ 11.018.547,24
Preço Mínimo Aceitável	R\$ 6,55
Renda Extra Necessária	R\$ 5,85

Fonte: Autor

6.6.4 Valor Presente Líquido (VPL)

Com uma TMA de 14% fixada, é feita uma verificação de como o VPL varia em função do preço de energia. Como pode ser constatado na Tabela 9, é a partir de um preço de energia em torno de 6,80 R\$/kWh que o VPL passa a ser positivo, ou seja, demonstra viabilidade, mas ainda assim com um valor presente líquido baixo para o volume de investimento e com um preço bastante alto a ser cobrado pela energia para gerar receita suficiente. Então foi definido um valor de 7,50 R\$/kWh para um VPL considerável, de aproximadamente 8,1 milhões de reais, sem aumentar mais ainda o

preço para uma análise de fluxo de caixa. A tabela inclui também a variação do *PAYBACK* que é a quantidade de anos para ter de volta o dinheiro investido inicialmente em *CAPEX*. Para o preço escolhido, o tempo do retorno do capital inicial é de 3,34 anos.

Tabela 9 – Variação do VPL e *PAYBACK* em função do preço de energia

Preço Energia (R\$/kWh)	VPL (R\$)	Payback (Anos)
R\$ 6,55	R\$ 2.394.864	3,82
R\$ 6,80	R\$ 390.286	3,68
R\$ 7,00	R\$ 2.618.406	3,57
R\$ 7,50	R\$ 8.188.706	3,34
R\$ 8,00	R\$ 13.759.006	3,13

Fonte: Autor

Na Tabela 10 é discriminado um fluxo de caixa simplificado para o caso dos parâmetros encontrados anteriormente. Estima-se para isso um montante final em torno de 167 milhões de reais adquiridos, que trazidos ao valor presente com a taxa de desconto de 14% (TMA) resulta em 55,9 milhões de reais, acima do custo inicialmente investido de 42,08 milhões.

Tabela 10 – Fluxo de caixa simplificado para o projeto CAO no Porto do Recife

Ano	CAPEX	CUSTO O&M	DESCOMISSON.	RECEITA ANUAL	FLUXO CAIXA	VP FLUXO CAIXA
0	R\$ 42.080.263,26					
1		R\$ 5.004.657,64		R\$ 12.615.559,54	R\$ 7.610.901,90	R\$ 6.676.229,74
2		R\$ 5.004.657,64		R\$ 12.615.559,54	R\$ 7.610.901,90	R\$ 5.856.341,87
3		R\$ 5.004.657,64		R\$ 12.615.559,54	R\$ 7.610.901,90	R\$ 5.137.141,99
4		R\$ 5.004.657,64		R\$ 12.615.559,54	R\$ 7.610.901,90	R\$ 4.506.264,91
5		R\$ 5.004.657,64		R\$ 12.615.559,54	R\$ 7.610.901,90	R\$ 3.952.863,95
6		R\$ 5.004.657,64		R\$ 12.615.559,54	R\$ 7.610.901,90	R\$ 3.467.424,52
7		R\$ 5.004.657,64		R\$ 12.615.559,54	R\$ 7.610.901,90	R\$ 3.041.600,46
8		R\$ 5.004.657,64		R\$ 12.615.559,54	R\$ 7.610.901,90	R\$ 2.668.070,58
9		R\$ 5.004.657,64		R\$ 12.615.559,54	R\$ 7.610.901,90	R\$ 2.340.412,79
10		R\$ 5.004.657,64		R\$ 12.615.559,54	R\$ 7.610.901,90	R\$ 2.052.993,67
11		R\$ 5.004.657,64		R\$ 12.615.559,54	R\$ 7.610.901,90	R\$ 1.800.871,64
12		R\$ 5.004.657,64		R\$ 12.615.559,54	R\$ 7.610.901,90	R\$ 1.579.711,97
13		R\$ 5.004.657,64		R\$ 12.615.559,54	R\$ 7.610.901,90	R\$ 1.385.712,25
14		R\$ 5.004.657,64		R\$ 12.615.559,54	R\$ 7.610.901,90	R\$ 1.215.537,06
15		R\$ 5.004.657,64		R\$ 12.615.559,54	R\$ 7.610.901,90	R\$ 1.066.260,58
16		R\$ 5.004.657,64		R\$ 12.615.559,54	R\$ 7.610.901,90	R\$ 935.316,30
17		R\$ 5.004.657,64		R\$ 12.615.559,54	R\$ 7.610.901,90	R\$ 820.452,89
18		R\$ 5.004.657,64		R\$ 12.615.559,54	R\$ 7.610.901,90	R\$ 719.695,52
19		R\$ 5.004.657,64		R\$ 12.615.559,54	R\$ 7.610.901,90	R\$ 631.311,86
20		R\$ 5.004.657,64	R\$ 1.910.725,62	R\$ 12.615.559,54	R\$ 5.700.176,28	R\$ 414.754,65
TOTAL	R\$ 42.080.263,26	R\$ 100.093.152,86	R\$ 1.910.725,62	R\$ 252.311.190,82	R\$ 150.307.312,34	R\$ 50.268.969,20

Fonte: Autor

7 CONCLUSÕES

O modelo de dispositivo Coluna D'água Oscilante tem demonstrado bastante potencial de evolução, principalmente instalado em quebra-mares portuários proporcionando geração de energia elétrica com o aproveitamento de uma região que, a princípio, teria a função apenas de barreira para as ondas do mar incidentes em uma região portuária.

A validação computacional do modelo reproduzido no *WAMIT* se comportou adequadamente para a resposta em relação aos resultados fornecidos na literatura tanto no caso não-amortecido quanto no amortecido (SHENG *et al.*, 2012).

Posteriormente, as simulações realizadas no presente trabalho foram coerentes com os resultados de RAOs alcançados em uma tese (FREEMAN, 2015). Para o caso amortecido, os valores de amortecimento foram determinados de forma heurística, em vista que esta informação não estava disponível. Não foi possível fazer comparações no relacionado a produção de energia gerada, devido a que no trabalho de Freeman foram utilizados métodos de engenharia de controle e automação para poder otimizar a geração de energia da OWC.

A equação para uma estimativa do amortecimento foi uma opção prática de ajuste, mas que evidencia a forte ligação deste coeficiente com as dimensões tanto da câmara quanto da turbina a ser instalada. Quanto maior a razão entre o diâmetro efetivo da câmara e o da turbina, maior será o efeito de amortecimento no deslocamento da superfície livre da coluna d'água com uma função do tipo potência. O coeficiente de amortecimento é de fundamental importância para acoplar a turbina e a geometria da câmara para um CAO fornecer uma potência otimizada. Com base nisso, as características mais adequadas da turbina para um CAO específico trabalhando sob uma determinada condição de onda, podem ser determinadas.

A turbina da *Wells* proporciona uma potência nominal de 84 kW para uma condição de mar de altura de onda igual a 2,12 m e período de 6,88 segundos, com eficiência de 25%.

Este trabalho não considerou um estudo detalhado sobre o comportamento termodinâmico do ar dentro da câmara e sua relação com fatores de compressibilidade, perda de carga, como desenvolvido e sugerido em um trabalho desenvolvido por (MOÑINO *et al.*, 2020), o que fica como sugestão para trabalhos futuros.

Na tese de Freeman foi testado um controlador que garantiu que a turbina sempre operasse em sua eficiência máxima. Como a eficiência da turbina tem um efeito grande na potência mecânica total convertida, descobriu-se que esse controlador leva a grandes conversões de energia. Com isso, ficam as sugestões de trabalhos futuros focados na otimização da conversão de energia, possivelmente com o dispositivo modelado considerando atuação de válvula *bypass* e/ou de fechamento na entrada da turbina, que pode ter um grande efeito na pressão da câmara e, portanto, na resposta geral e no nível de conversão de energia.

Com as informações obtidas na bibliografia sobre características técnico-econômicas de modelos Coluna D'água Oscilante, com disponibilidade operacional de 85% e uma potência instalada de 225 kW, além de uma Taxa Mínima de Atratividade de 14% para investimento, para um projeto a ser executado no Porto do Recife, calcula-se um *LCOE* em torno de 6,76 R\$/kWh, que para ser custeado necessitaria de um preço de energia de 7,5 R\$/kWh, equivalente a 7500 R\$/MWh. Dada a potência e comparando com o gráfico da Figura 54 faz sentido, pois a potência instalada seria muito baixa, uma fase embrionária de instalação de energia das ondas no Brasil, o que confere um *LCOE* muito alto. Isso indica que um projeto deste tipo custa em torno de dez vezes mais do que outras opções crescentes no país, tais como solar fotovoltaica e eólica. Isso já dá indícios do quanto esta possibilidade ainda é inviável para fins lucrativos imediatos, pois requer uma aceitação de risco alto por investidores privados que porventura se interessem.

Uma alternativa para fomentar esses projetos no Brasil é o que ocorre na Europa - epicentro de investimentos em tecnologia de conversão de energia das ondas do mar - firmando parcerias público-privadas, por um lado beneficiando empresas interessadas em testar suas tecnologias visando expandir seu portfólio no mercado, enquanto o país reproduz pesquisas para ampliar sua matriz energética e produzir valor socioeconômico em seu território a longo prazo.

Os principais desafios para uma usina do tipo CAO são: concorrência com outras energias renováveis viáveis e crescentes; pulverização de tecnologias diferentes de conversão da energias das ondas; complexidade de construção do projeto e a carência de uma maior potência instalada para conclusões mais assertivas.

Apesar disso, o modelo segue em evolução. Usinas que já foram construídas e testadas, como são os casos de Islay na Escócia, Pico de Portugal e Mutriku na Espanha, geraram informações que permitiram a construção de protótipos comerciais

que já estão em fase de teste. Os pontos que mantêm vivas as pesquisas e investimentos no modelo Coluna D'água Oscilante são: a disponibilidade abundante de recurso (ondas); baixo impacto ambiental; local instalado de bom acesso – por ser instalado em zonas costeiras, ao contrário de tecnologias *offshore*.

No futuro a energia das ondas poderá continuar a reduzir custos a um ritmo elevado com o aumento da capacidade instalada. No entanto, é difícil fornecer uma faixa estreita de estimativas de *LCOE* para o setor, principalmente por conta da diversidade de tecnologias e incertezas envolvidas. Um esforço colaborativo aprofundado pode ajudar o setor a alavancar, compartilhando informações que não sejam comercialmente sensíveis para construir conhecimento, ajudar a reduzir incertezas e custos além de melhorar aspectos de confiabilidade, disponibilidade e desempenho. Isto poderia, em última análise, propiciar o entendimento de quais são os verdadeiros geradores de custos em comum e avançar no caminho da redução de custos operacionais e de capital.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMUNDARAIN, M. *et al.* Wave energy plants: Control strategies for avoiding the stalling behaviour in the *Wells* turbine. **Renewable Energy - Vol. 35**, 2021.

BARBOSA, H. DE P. Utilização da busca harmônica no ajuste da curva de Weibull em energia eólica. 2016.

BBC. **Scotland's first wave firm, Wavegen, in trouble**. Disponível em: <<https://www.bbc.com/news/uk-scotland-highlands-islands-21657133>>. Acesso em: 26 fev. 2022.

BRITO-MELO, A.; SARMENTO, A. J. N. A. **Numerical modelling of OWC wave-power plants of the oscillating water column type**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.witpress.com>.

BRUSCHI, D. L. *et al.* Analysis of the degradation in the *Wells* turbine blades of the Pico oscillating-water-column wave energy plant. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 115, n. August, p. 109368, 2019.

BULL, D. *et al.* SANDIA REPORT Reference Model 6 (RM6): Oscillating Wave Energy Converter. 2014.

CASTRO-SANTOS, L. *et al.* The Levelized Cost of Energy (LCOE) of wave energy using GIS based analysis: The case study of Portugal. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 65, p. 21–25, 2015.

CHEN, F. *et al.* Study on force and wave energy conversion efficiency of buoys in low wave energy density seas. **Energy Conversion and Management**, v. 182, p. 191–200, 15 fev. 2019.

CHANG, G. *et al.* A comprehensive evaluation of factors affecting the levelized cost of wave energy conversion projects. **Renewable Energy**, v. 127, p. 344–354, 1 nov. 2018.

CORDEIRO, M. G. Modelagem e análise de desempenho de sistema para geração de energia elétrica através de ondas marítimas. 2015.

DALTON, G. *et al.* Economic and socio-economic assessment methods for ocean renewable energy: Public and private perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 850–878, 2015.

DE OLIVEIRA, L. *et al.* Economic feasibility study of ocean wave electricity generation in Brazil. **Renewable Energy**, v. 178, p. 1279–1290, 2021.

DELMONTE, N. *et al.* Review of oscillating water column converters. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 52, n. 2, p. 1698–1710, 2016a.

ESPINDOLA, R. L. Mapeamento de sites com potencial para geração de energia ondomotriz por meio de análise de decisão multicritério. 8 nov. 2017.

ESPINDOLA, R. L.; ARAÚJO, A. M. Estimativa do Potencial de Energia das Ondas a partir de Dados de Vento para o Arquipélago de Fernando de Noronha. **VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM 2012)**, n. 2008, p. 10, 2012.

F. ARENA, V. FIAMMA, R. IANNOLO, V. LAFACE, G. MALARA, A. ROMOLO, F. M. S. Speciale Resonant Wave Energy Converters : Small-scale field experiments and first full-scale prototype. p. 58–67, 2015.

FALCÃO, A. F. D. O.; JUSTINO, P. A. P. OWC wave energy devices with air flow control. **Ocean Engineering**, v. 26, n. 12, p. 1275–1295, 1999.

FALCÃO, A. F. O. *et al.* The Pico OWC wave power plant: Its lifetime from conception to closure 1986–2018. **Applied Ocean Research**, v. 98, n. July 2019, p. 102104, 2020.

FALCÃO, A. F. O.; HENRIQUES, J. C. C. Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review. **Renewable Energy**, v. 85, p. 1391–1424, 2016.

FALNES, J.; KURNIAWAN, A. **Ocean Waves and Oscillating Systems**. [s.l: s.n.].

FRANGOUL, A. **U.S. announces millions in funding for projects focused on wave energy**. Disponível em: <<https://www.cnbc.com/2021/07/07/us-announces-millions-in-funding-for-projects-focused-on-wave-energy.html>>. Acesso em: 24 ago. 2021.

FREEMAN, K. **Numerical modelling and control of an oscillating water column wave energy converter**. [s.l: s.n.].

GARANOVIC, A. **Spanish Mutriku plant sets record for continuous wave power production - Offshore Energy**. Disponível em: <<https://www.offshore-energy.biz/spanish-mutriku-plant-marks-a-decade-of-continuous-wave-power-production/>>. Acesso em: 25 ago. 2021.

HARRISON, G. P.; WALLACE, A. R. Sensitivity of wave energy to climate change. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 20, n. 4, p. 870–877, dez. 2005.

HEATH, T. V. A review of oscillating water columns. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 370, n. 1959, p. 235–245, 2012.

HENNESSEY, J. Some Aspects of Wind Power Statistics in: Journal of Applied Meteorology and Climatology Volume 16 Issue 2 (1977). **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, p. 119–128, 1977.

HENRIQUES, J. C. C. *et al.* Wave energy resource assessment for a breakwater-integrated oscillating water column plant at Porto, Portugal. **Energy**, v. 63, p. 52–60, 2013.

INOUE, M. *et al.* Studies on the Wells Turbine for Wave Power Generator (Turbine Characteristics and Design Parameter for Irregular Wave). **JSME international journal. Ser. 2, Fluids engineering, heat transfer, power, combustion, thermophysical properties**, v. 31, n. 4, p. 676–682, 15 nov. 1988.

IRENA. **Renewable Power Generation Costs in 2021**. [s.l: s.n.].

IRENA. **Investment Trends**. Disponível em: <<https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Finance-and-Investment/Investment-Trends>>. Acesso em: 24 ago. 2021.

IRENA. **Ocean energy**. Disponível em: <<https://www.irena.org/ocean>>. Acesso em: 24 ago. 2021.

JUSTUS, C. *et al.* Methods for Estimating Wind Speed Frequency Distributions in: Journal of Applied Meteorology and Climatology Volume 17 Issue 3 (1978). **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, p. 350–353, 1978.

LI, Y.; LENCE, B. J.; CALISAL, S. M. An integrated model for estimating energy cost of a tidal current turbine farm. **Energy Conversion and Management**, v. 52, p. 1677–1687, 2011.

LÓPEZ, I. *et al.* Optimisation of turbine-induced damping for an OWC wave energy converter using a RANS-VOF numerical model. **Applied Energy**, v. 127, p. 105–114, 15 ago. 2014.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL - BEN 2020**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>>. Acesso em: 24 ago. 2021.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **PNE 2050 - Plano Nacional de Energia**. . Brasília: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes>>.

dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>. Acesso em: 24 ago. 2021.

MISHRA, S.K., MOHANTA, D.K., APPASANI, B., KABALCI, E. **OWC-Based Ocean Wave Energy Plants: Modeling and Control**. Springer Nature. [s.l: s.n.].

MOÑINO, A. *et al.* Thermodynamics of the OWC chamber: Experimental turbine performance under stationary flow. **Renewable Energy**, v. 155, p. 317–329, 1 ago. 2020.

OCEAN ENERGY SYSTEMS - OES. **International Levelised Cost of Energy For Ocean Energy Technologies**. [s.l: s.n.].

OLIVEIRA, P. *et al.* Experimental evaluation of the effect of wave focusing walls on the performance of the Sea-wave Slot-cone Generator. **Energy Conversion and Management**, v. 110, p. 165–175, 15 fev. 2016.

PATEL, J. J. Current status of *Wells* Turbine for Wave Energy Conversion. **International Journal for Scientific Research & Development**, v. 2, n. 11, p. 91–96, 2015.

PECHER, A.; KOFOED, J. P. **Handbook of Ocean Wave Energy**. Aalborg: [s.n.].

Projected Costs of Generating Electricity 2010. International Energy Agency. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.oecd-ilibrary.org/energy/projected-costs-of-generating-electricity-2015_cost_electricity-2015-en>.

PORTO DO RECIFE. Relatório de Sustentabilidade - 2020. Disponível em: <https://www.portodorecife.pe.gov.br/arquivos/arquivos/zuwo-relatorio_de_sustentabilidade_2020.pdf>. Acesso em: 25 out. 2022.

QUEEN'S UNIVERSITY BELFORT. Islay LIMPET Wave Power Plant. . Belfast: [s.n.]. Disponível em: <cordis.europa.eu/documents/documentlibrary/66628981EN6.pdf>.

RAGHUNATHAN, S. The *wells* air turbine for wave energy conversion. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 31, n. 4, p. 335–386, 1995.

RYBA, A.; LENZI, E. K.; LENZI, M. K. **Elementos de Engenharia Econômica**. [s.l: s.n.].

SHEHATA, A. S. *et al.* *Wells* turbine for wave energy conversion: a review. **International Journal of Energy Research**, v. 41, n. 1, p. 6–38, 1 jan. 2017.

SHENG, W. *et al.* **EXPERIMENTAL STUDIES OF A FLOATING CYLINDRICAL OWC WEC**. [s.l: s.n.]. Disponível em:

<<http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/pdfaccess.ashx?url=/data/conferences/asmep/75842/>>.

SHENG, W.; LEWIS, A.; ALCORN, R. **Numerical Studies of a Floating Cylindrical OWC WEC**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.asme.org/about-asme/terms-of-use>>.

SI OCEAN. Ocean Energy: Cost of Energy and Cost Reduction Opportunities. n. May, p. 29, 2013.

SMC-Brasil. Disponível em: <<https://smcbrasil.ufsc.br/smc-brasil/>>. Acesso em: 3 mar. 2022.

STEWART, R. **Introduction to Physical Oceanography**. 11. ed. [s.l.: s.n.].

Utility-Scale Energy Technology Capacity Factors | Energy Analysis | NREL. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/analysis/tech-cap-factor.html>>. Acesso em: 11 maio. 2022

UK RESEARCH AND INNOVATION. Projects to unlock the potential of marine wave energy. Disponível em: <<https://www.ukri.org/news/projects-to-unlock-the-potential-of-marine-wave-energy/>>. Acesso em: 24 ago. 2021.

VALIZADEH, R.; ABBASPOUR, M.; RAHNI, M. T. A low cost Hydrokinetic *Wells* turbine system for oceanic surface waves energy harvesting. **Renewable Energy**, v. 156, p. 610–623, 2020.

VAZQUEZ, A.; IGLESIAS, G. LCOE (levelised cost of energy) mapping: A new geospatial tool for tidal stream energy. **Energy**, v. 91, p. 192–201, 2015.

WAMIT, INC. WAMIT User Manual. . Boston: [s.n.].