

Antônio Carlos Barbosa Zancanella

**ESTUDO COMPARATIVO E MODELAGEM DINÂMICA
DE CONVERSORES DE ENERGIA A PARTIR DE ONDAS
OCEÂNICAS**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do Grau
de Mestre Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Jonny Carlos da
Silva

Coorientador: Prof. Dr. Giuliano
Gonçalves de Souza

Florianópolis
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Zancanella, Antônio Carlos Barbosa
Estudo comparativo e modelagem dinâmica de conversores
de energia a partir de ondas oceânicas / Antônio Carlos
Barbosa Zancanella ; orientador, Jonny Carlos da Silva ;
coorientador, Giuliano Gonçalves de Souza. - Florianópolis,
SC, 2016.
145 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Modelagem dinâmica. 3. Energia
das ondas oceânicas. 4. Estudo comparativo. I. Silva, Jonny
Carlos da. II. Souza, Giuliano Gonçalves de. III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós
Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Antônio Carlos Barbosa Zancanella

**ESTUDO COMPARATIVO E MODELAGEM DINÂMICA
DE CONVERSORES DE ENERGIA A PARTIR DE ONDAS
OCEÂNICAS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 26 de Agosto 2016.

Jonny Carlos da Silva, Dr.Eng. -
Coordenador do Curso e Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Banca Examinadora:

Victor Juliano De Negri, Dr.Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Acires Dias, Dr.Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Rodrigo de Souza Vieira, Dr. Eng
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedicatória.
Este trabalho é dedicado a memória do
pai, Antônio Carlos Barbosa e meu
primo Leonardo Almeida Zancanella.

AGRADECIMENTOS

- A minha mãe Dorinalva Zancanella por ser tudo para mim;
- Aos meus amigos Giuliano, Luiz Rafael, Davi, Renato, Felipe, Debora, Rivana e Nathalia;
- Ao meu orientador pela dedicação e resiliência.

*Quem diz que não vale a pena investir
tempo em educação não sabe o custo da
ignorância.*
(Lacerde de Paula Nunes)

RESUMO

Atualmente existem diversos conceitos de projetos de conversão de energia a partir de ondas oceânicas, no entanto, as tecnologias não estão suficientemente maduras para que se possam indicar quais são mais adequadas para uma dada localização. Assim, o trabalho tem como principais objetivos a realização de um estudo comparativo entre diferentes concepções de projetos existentes até o presente momento e a modelagem dinâmica de dois conversores selecionados. Para avaliação do desempenho dos conversores analisados utilizou-se o método das matrizes de potência e oceânica combinada. O desempenho é avaliado na costa de Florianópolis/SC, a comparação entre os conceitos de projeto é realizada através do método da matriz de *Pugh*. Para modelagem dinâmica, utilizou-se o software AMESim como plataforma. Entre as principais conclusões, o estudo aponta: a região escolhida apresenta um potencial energético para geração de energia a partir de ondas oceânicas, sendo esta energia próxima à obtida considerando mares europeus. Com a modelagem dinâmica, observa-se que os projetos apresentam potência e rendimento variáveis com as condições oceânicas, os sistemas modelados são adequados para transmissão de potência em conversor de energia das ondas, pois permitem que sejam alcançadas condições de regime permanente de geração de energia elétrica.

Palavras-chave: Modelagem dinâmica; Energia das ondas oceânicas; Estudo comparativo.

ABSTRACT

Currently there are several concepts of energy generation projects from ocean waves, the technologies are not mature enough, so that one cannot indicate which technologies are most appropriate for a given location. Thus, the work is focused on the main objectives to conduct a comparative study of different conceptions of existing projects and dynamic modeling of two selected models. To evaluate the performance of the converters analyzed is used the method of matrices of power and ocean matrices combined, performance is evaluated on the coast of Florianópolis/SC, and the comparison between the design concepts is performed by Pugh's matrix. For dynamic modeling, the software AMESim is used. The main conclusions of the study were: Florianópolis has energy potential for power generation from ocean waves, the energy estimate is closed off obtained considering European seas. In the dynamic simulation is observed that the projects have power and performance variables with ocean conditions, the modeled systems are suitable for power transmission, in both models steady state conditions of power generation were reached.

Keywords: Dynamic modeling; Energy of ocean waves; Comparative study.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Formas de energia utilizadas no Brasil. Fonte BEN, 2015.	1
Figura 1.2: Oferta interna total de energia elétrica e consumo final.	2
Figura 2.1: (a) Interação das ondas com o fundo do mar com à aproximação da costa, (b) parâmetros de uma onda mecânica.	9
Figura 2.2: Potência das ondas ao longo do globo em kW/m.	13
Figura 2.3: Potência das ondas ao longo do litoral brasileiro (kW/m). Fonte: Carvalho, 2010.	14
Figura 2.4: Altura significativa das ondas em Pecém-CE. Fonte: Beserra, 2007.	16
Figura 2.5: Período de ondas em Pecém-CE. Fonte: Beserra, 2007.	16
Figura 2.6: Dispositivos de conversão de energia das ondas oceânicas.	19
Figura 2.7: Princípio de funcionamento de um dispositivo CAO.	20
Figura 2.8: Dispositivo OWC e turbina Wells.	21
Figura 2.9: Dispositivo CAO construído na Escócia. Antonio, 2014.	22
Figura 2.10: Dispositivo CAO de estrutura flutuante. Fonte: Antonio, 2014.	22
Figura 2.11: Dispositivo CAO construído na Austrália. Fonte: Antonio, 2014.	23
Figura 2.12: OE Bouy. Fonte: Babarit <i>et al.</i> , 2012.	23
Figura 2.13: Projeto Oyster, (a) conversor, (b) esquema de funcionamento. Fonte: Whitaker, 2007.	25
Figura 2.14: Protótipo Wave Star Energy. Fonte: Wave Star Energy, 2015.	25
Figura 2.15: Circuitos hidráulicos utilizados pela Wave Star Energy.	27
Figura 2.16: Projeto Pelamis P750. Fonte Henderson, 2006.	28
Figura 2.17: Circuito hidráulico utilizado no projeto Pelamis P750.	28
Figura 2.18: Conversor hiperbárico brasileiro, (a) detalhe dos braços, (b) câmara hiperbárica e turbina Pelton. Fonte: Siffert, 2010.	29
Figura 2.19: Esquema de funcionamento de um conversor hiperbárico.	29
Figura 2.20: (a) Esquema de funcionamento, (b) projeto Wave Dragon.	30
Figura 2.21: Conversor SSG. Fonte: Vicinanza <i>et al.</i> , 2012.	31
Figura 2.22: Rendimento por altura significativa de onda para os conversores CAO-Açores, Corpos oscilantes pontual, Pelamis e Wave Dragon.	35
Figura 3.1: Esquema da modelagem dinâmica (a) via fluxo de sinal, (b) via multi-porta. Fonte: Silva, J.C., 2005.	41
Figura 3.2: Flutuador submetido a uma onda oceânica.	42
Figura 3.3: Sistema massa-mola amortecido e forçado. Fonte: Modificado de Clemente, 2011.	45
Figura 3.4: Esquema de funcionamento da transmissão hidrostática.	46
Figura 3.5: Mecanismo do sistema de conversão de energia.	48
Figura 3.6: Circuito hidráulico simplificado. Fonte: Lasa, 2012.	48
Figura 3.7: Sistema transmissão de potência hidráulico. Fonte: YANG, 2011.	50
Figura 3.8: Conversor com transmissão de potência mecânica.	51
Figura 3.9: Potência instantânea. Fonte: Chandrasekaran e Raghavi (2015).	52
Figura 3.10: Potência variando com o ângulo do flutuador.	52

Figura 4.1: Pontos <i>offshore</i> selecionados para caracterização do clima de ondas do litoral de Santa Catarina. Fonte: Contestabile <i>et al.</i> , 2015.	56
Figura 4.2: Matriz de potência oceânica para o ponto P4.	58
Figura 4.3: Pontos <i>nearshore</i> selecionados para caracterização do clima de ondas no litoral de Santa Catarina. Fonte: Contestabile <i>et al.</i> , 2015.	59
Figura 4.4: Matriz de potência para o ponto S5. Fonte: Contestabile <i>et al.</i> , 2015.	60
Figura 4.5: Matriz de potência para o ponto S6. Fonte: Contestabile <i>et al.</i> , 2015.	61
Figura 4.6: Matrizes de potência combinadas para estimativa da energia gerada.	62
Figura 5.1: Sistema mecânico utilizado no modelo CO-THL.	81
Figura 5.2: Sistema hidráulico utilizado no modelo CO-THL.	82
Figura 5.3: (a). Modelo em AMESIM, (b) Desenho esquemático da modelagem do flutuador e braço mecânico para o projeto CO-THL.	83
Figura 5.4: Dimensões do braço mecânico.	84
Figura 5.5: Projeto CO-TH.	94
Figura 5.6: Transmissão hidrostática utilizada no projeto CO-TH.	94
Figura 5.7: Modelo CO-TH, (a) Sistema Pinhão e Cremalheira, (b) modelo em AMESIM.	95
Figura 5.8: Pressão no motor e atuador hidráulico do modelo CO-TLH.	99
Figura 5.9: Rotação no motor hidráulico do modelo CO-TLH.	100
Figura 5.10: Variação da rotação do motor com a altura da onda.	100
Figura 5.11: Aumento da pressão com a altura da onda oceânica.	101
Figura 5.12: Potência gerada pelo modelo CO-TLH.	102
Figura 5.13: Análise de sensibilidade da Potência gerada pelo modelo CO-THL.	102
Figura 5.14: Análise de sensibilidade do rendimento do modelo CO-THL.	103
Figura 5.15: Variação de pressão no motor com a variação do diâmetro do pistão e volume deslocado pelo motor.	105
Figura 5.16: Pressão no motor hidráulico do modelo CO-TH com acumulador.	106
Figura 5.17: Pressão no motor hidráulico do modelo CO-TH sem acumulador.	106
Figura 5.18: Potência gerada pelo modelo CO-TH com acumulador.	107
Figura 5.19: Análise de sensibilidade da Potência gerada pelo modelo CO-TH.	107
Figura 5.20: Análise de sensibilidade do rendimento do modelo CO-TH.	108
Figura 8.1: Conversor Sueco. Fonte: Walters <i>et al.</i> , 2007.	124
Figura 8.2: Arquimedes Wave Swing (AWS), (a) princípio de funcionamento, (b) protótipo instalado em Portugal. Fonte Gardner, 2005	125
Figura 8.3: Pontoon. Fonte: Babarit <i>et al.</i> , 2012.	126
Figura 8.4: Wavebob Fonte: Weber <i>et al.</i> , 2009.	127
Figura 8.5: Langlee. Fonte: Pecher <i>et al.</i> , 2010.	127
Figura 8.6: CETO. Fonte: Antonio, 2014.	128

Figura 8.7: Princípio de funcionamento. Fonte: CETO ENERGY, 2015.	129
Figura 8.8: Protótipo Oceanec. Fonte: Salcedo <i>et al.</i> , 2009.	130
Figura 8.9: Projeto Aquabuoy. Fonte: Rosa, 2013.	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Clima de ondas no litoral norte do Rio Grande do Sul. Fonte: Modificado de Strauch, 1990.	15
Tabela 2.2: Distribuição de potência das ondas no Brasil. Fonte: Flemming (2012).	17
Tabela 2.3: Clima de ondas da costa brasileira. Fonte: Homsí (1978).	18
Tabela 2.4: Classificação dos conversores de energia das ondas.	19
Tabela 3.1: Parâmetros de projeto. Fonte: Chandrasekaran e Raghavi (2015). .	52
Tabela 4.1: Dados oceânicos dos pontos <i>offshore</i>	57
Tabela 4.2: Potência média, latitude e longitude dos pontos <i>nearshore</i> selecionados. Fonte: Contestabile <i>et al.</i> , 2015	60
Tabela 4.3: Classificação com relação à profundidade de atuação.	64
Tabela 4.4: Classificação dos conversores selecionados.	64
Tabela 4.5: Dimensão característica dos conversores selecionados.	65
Tabela 4.6: Massa dos conversores selecionados.	65
Tabela 4.7: Energia gerada pelos conversores <i>offshore</i> (GWh).	66
Tabela 4.8: Energia gerada pelos conversores <i>nearshore</i> em S5.	67
Tabela 4.9: Energia gerada pelos conversores <i>nearshore</i> em S6.	68
Tabela 4.10: Energia gerada por conversores <i>onshore</i> em S5.	68
Tabela 4.11: Energia gerada por conversores <i>onshore</i> em S5.	68
Tabela 4.12: Rendimentos dos conversores <i>offshore</i>	69
Tabela 4.13: Rendimentos dos conversores <i>onshore</i> em S5.	70
Tabela 4.14: Rendimentos dos conversores <i>onshore</i> em S6.	70
Tabela 4.15: Extensão e quantidade de conversores para atender a demanda extra de energia elétrica para Florianópolis até 2030.	72
Tabela 4.16: Extensão e quantidade de conversores para atender a demanda extra de energia elétrica no Brasil até 2024.	72
Tabela 4.17: Matriz de <i>Pugh</i> para os projetos <i>offshore</i>	74
Tabela 4.18: Matriz de <i>Pugh</i> para os projetos <i>nearshore</i>	76
Tabela 5.1: Parâmetros utilizados no modelo CO-THL.	93
Tabela 5.2: Parâmetros utilizados no modelo CO-TH.	98
Tabela 9.1: Matriz de Potência do Projeto Aquabuoy (kW).	132
Tabela 9.2: Matriz de Potência do Projeto Archimedes Wave Swing (kW). Fonte: Diaconu <i>et al.</i> , 2013.	133
Tabela 9.3: Matriz de potência para um conversor do tipo CAO genérico utilizando uma turbina do tipo Wells (kW). Fonte: Veigas <i>et al.</i> (2015).	134
Tabela 9.4: Matriz de Potência para o Projeto CETO (kW).	134
Tabela 9.5: Matriz de Potência do Projeto Langlee (kW).	135
Tabela 9.6: Matriz de Potência do Projeto Oceantec (kW).	135
Tabela 9.7: Matriz de Potência do Projeto OE Buoy (kW).	136
Tabela 9.8: Matriz de Potência do Projeto Oyster (kW).	136
Tabela 9.9: Matriz de Potência do Projeto Pelamis P750 (kW).	137
Tabela 9.10: Matriz de Potência do Projeto Pontoon (kW).	137
Tabela 9.11: Matriz de Potência do Projeto Seabased (kW).	138

Tabela 9.12: Matriz de potência para o conversor SSG (kW). Fonte: Silva D, <i>et al</i> , 2013.....	139
Tabela 9.13: Matriz de Potência do projeto Wave Dragon (kW). Fonte: Modificado de Veigas <i>et al</i> . (2015).	140
Tabela 9.14: Matriz de Potência do Projeto Wavebob (kW).	141
Tabela 9.15: Matriz de Potência do Projeto Wavestar (kW).	142
Tabela 10.1: Itens, submodelos e parâmetros comuns entre os projetos CO-TLH e CO-TH.	143
Tabela 10.2: Itens, submodelos e parâmetros do projeto CO-THL.	144
Tabela 10.3: Itens, parâmetros e submodelos do projeto CO-TH parte 1.	145

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAO	Coluna de água oscilante
CO-TLH	Corpo oscilante com transmissão de potência via sistema hidráulica linear
CO-TH	Corpo oscilante com transmissão de potência via sistema hidráulica

LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto latino		
A	[m]	Amplitude de onda
A_p	[m ²]	Área da coroa do pistão
A_c	[m ²]	Área da coroa do atuador
$B(\omega)$	[kg/s]	Coefficiente de amortecimento potencial
C_d	Adimensional	Coefficiente de descarga
d_h	[m]	Diâmetro da haste do atuador
E	[Pa]	Módulo de elasticidade
F_1	[N]	Força hidrodinâmica sobre o flutuador
F_2	[N]	Força sobre o atuador hidráulico
$F_h(t)$	[N]	Força hidrodinâmica
$F_R(t)$	[N]	Força de radiação
$F_e(t)$	[N]	Força de excitação
$F_p(t)$	[N]	Força vertical devido ao sistema de conversão de energia
$F_s(t)$	[N]	Força de restauração hidrostática
g	[m/s ²]	Aceleração da gravidade
H	[m]	Altura total da onda
h_τ	[kg/s]	Memoria fluida
H_s	[m]	Altura significativa de onda
H_z	[m]	Altura média de onda
I	[kg.m ²]	Momento de inércia do eixo do motor hidráulico
K	Adimensional	Relação de transmissão

L_1	[m]	Distância da rotula do flutuador até o pivô
L_2	[m]	Distância da rotula do atuador até a junta com a estrutura fixa
$m(\omega)$	[kg]	Massa adicionada
M	[kg]	Massa do flutuador hidráulico
M_p	[kg]	Soma das massas acopladas (pistão, haste, massas externas do atuador)
n	[RPM]	Rotação
p	[Pa]	Pressão
p_a	[Pa]	Pressão de abertura da válvula
p	[Pa]	Pressão na câmara do atuador
P_{real}	[W]	Potência para um estado oceânico real
P_{onda}	[W]	Potência de uma onda monocromática
p_{max}	[Pa]	Pressão máxima
p_{min}	[Pa]	Pressão mínima
p_t	[Pa]	Pressão de trabalho
Q	[m ³ /s]	Vazão volumétrica
Q_p	[m ³ /s]	Vazão fornecida pelo atuador
Q_m	[m ³ /s]	Vazão no motor hidráulico
Q_r	[m ³ /s]	Vazão real no motor ou bomba
Q_t	[m ³ /s]	Vazão teórica no motor ou bomba
R	[m]	Raio da engrenagem
S	Adimensional	Coefficiente de segurança
S_m	[kg/s ²]	Coefficiente de flutuação
T	[s]	Período da onda
T	[N.m]	Torque

T_p	[N.m]	Torque no pinhão
T_r	[N.m]	Torque real no motor ou bomba
T_t	[N.m]	Torque teórico no motor ou bomba
T_p	[s]	Período de pico
T_z	[s]	Período médio
T_c	[N.m]	Torque consumido pelo sistema dissipativo acoplado ao motor hidráulico;
T_e	[s]	Período significativo de onda
V	[s]	Velocidade vertical
V_d	[m ³ /rot]	Deslocamento volumétrico no motor hidráulico
V_1	[m ³]	Volume da câmara hidráulica do atuador na entrada
V_2	[m ³]	Volume da câmara hidráulica do atuador na entrada
v_m	[m/s]	Velocidade média de subida do atuador

	Alfabeto Grego	
ω	[rad/s]	Velocidade angular
α	[rad/s ²]	Aceleração angular
ρ	[kg/m ³]	Densidade
φ	Adimensional	Constante do atuador
θ	[rad]	Deslocamento angular da engrenagem
ε	[m]	Comprimento livre para flambagem
η_m	Adimensional	Rendimento mecânico
η_v	Adimensional	Rendimento volumétrico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Apresentação do problema	1
1.2 Objetivos Gerais	6
1.3 Objetivos Específicos.....	6
1.4 Estrutura do Trabalho.....	7
2 ESTADO DA ARTE.....	8
2.1 Princípios e Potencial energético das ondas.....	8
2.2 Clima de Ondas Brasileiro.....	12
2.3 Classificação dos Conversores de Energia a Partir de Ondas Oceânicas 18	
2.3.1 Coluna de Água Oscilante (CAO).....	20
2.3.2 Conversores do Tipo Corpo Oscilante	24
2.3.3 Conversores do Tipo Galgamento	30
2.4 Estudos Comparativos	32
2.5 Principais conclusões do capítulo.....	38
3 MODELAGEM DINÂMICA E ESTUDOS DE CASO	39
3.1 Processo de projeto.....	39
3.2 Aspectos da modelagem dinâmica	40
3.3 Teoria Linear das Ondas Oceânicas	42
3.4 Modelos e Protótipos	46
3.5 Principais conclusões do capítulo.....	53
4 ESTUDO DE CONVERSORES.....	55
4.1 Caracterização do clima de ondas de Santa Catarina.....	55
4.2 Metodologia para avaliação de conversores.....	61
4.3 Resultados e discussão da avaliação de conversores	66
5 MODELAGEM DINÂMICA DE CONVERSORES DE ENERGIA A PARTIR DE ONDAS OCEÂNICAS.....	79
5.1 Metodologia da Modelagem dinâmica.....	79
5.1.1 Projeto CO-THL.....	81
5.1.2 Modelo CO-TH	93
5.2 Resultado das simulações do modelo CO-THL	99
5.3 Resultados das simulações dinâmicas do modelo CO-TH	105
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	110
6.1 Estudo de conversores.....	110
6.2 Modelagem dinâmica	111
6.3 Recomendações.....	112
7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113

8 ANEXO A: CONVERSORES DO TIPO CORPO OSCILANTE	
124	
9 ANEXO B: MATRIZES DE POTÊNCIA	132
10 APÊNDICE A	143

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do problema

A energia elétrica assumiu um papel muito relevante para a sustentabilidade da vida da sociedade moderna, uma vez que todos os setores de atividade dependem da eletricidade. De acordo com Silva (2012), a crescente demanda de energia elétrica mundial, as questões ambientais e o futuro esgotamento das reservas de petróleo, despertaram o mundo para a busca por fontes de produção de energia que causem o menor impacto ambiental possível.

Na Figura 1.1, são mostradas as porcentagens que cada tipo de energia contribui para o cenário nacional. Observa-se que grande parte da energia é proveniente da fonte hidráulica (65,2%). Além disso, algumas fontes de energias não renováveis são utilizadas no país, como carvão mineral, gás natural, nuclear e derivados do petróleo, mas em pequenas porcentagens. Diante do contexto mundial, em que pelo menos 85% da energia é proveniente de fontes não renováveis, pode-se considerar o Brasil como um país essencialmente limpo em termos energéticos (SIFERT, 2010).

Nota-se, também, que a biomassa e eólica juntas somam 9,4% da matriz nacional, considerando também a energia hidráulica, chega-se a uma quantidade de 74,6% da energia nacional como sendo proveniente de fontes renováveis (BEN, 2015).

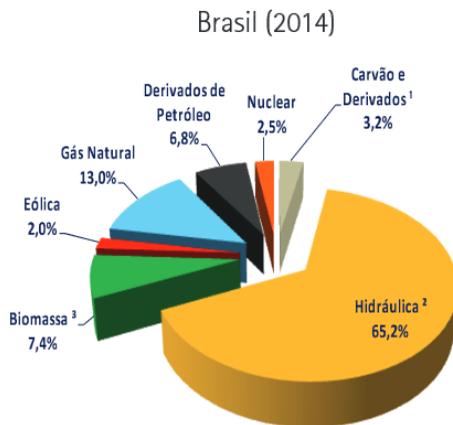


Figura 1.1: Formas de energia utilizadas no Brasil. Fonte BEN, 2015.

Apesar da matriz energética nacional ser em grande parte composta por energias renováveis, o país ainda é extremamente dependente do recurso hidráulico como fonte principal de energia.

O Brasil passa por um momento crítico em que surgem significativas restrições às hidrelétricas de grande porte devido aos danos ambientais, causados principalmente pelas grandes áreas de alagamentos necessárias para este tipo de instalação. Além disso, os rios de grande potencial já foram explorados no país, portanto, desenvolver novas fontes de energia que sejam de preferência renováveis é um dos desafios que o país deve enfrentar para atender ao aumento de demanda previsto para os próximos anos (SIFFERT, 2010).

Na Figura 1.2, é mostrada a oferta interna de energia elétrica e o consumo final de energia. Se o aumento do consumo seguir a mesma média durante os próximos anos e não for ampliada a matriz energética, em cerca de seis anos o consumo de energia irá superar a geração de energia do país. Com a previsão do aumento populacional brasileiro e o crescimento industrial, surge a necessidade de ampliar a matriz energética nacional, com isso, fontes renováveis estão ganhando relevância (SILVA, J.S., 2012).

Valores em TWh	2014	2013
Oferta Interna de Energia Elétrica ¹ ...	624,3	611,2
Consumo final ²	531,1	516,2

Figura 1.2: Oferta interna total de energia elétrica e consumo final.

Fonte: BEN, 2015.

Estima-se que em 2040, o consumo de energia do mundo será 30% maior do que é hoje, isso mostra a importância do investimento em novas formas de geração de energia, que seja preferencialmente renovável, tanto a nível nacional como mundial (LÓPES *et al.*, 2013). Além disso, o consumo de energia cresceu treze vezes no século passado e triplicou desde 1960, crescendo desproporcionalmente mais rápido que a população.

Como exemplo cita-se o Estados Unidos, maior consumidor de energia do globo com cerca de 23% da demanda energética anual (HEIN, 2005). As nações desenvolvidas utilizam menor quantidade de energia renováveis do que as ditas em desenvolvimento. O consumo de energia per capita é muito menor nos países em desenvolvimento, já que muitos não têm acesso a este bem (GOLDENBERG, 2006).

Com isso, a energia de fontes oceânicas vem ganhando mais espaço entre as renováveis, apesar de ainda estar anos atrás de outras fontes que tiveram um desenvolvimento mais acelerado ao longo do século passado, como a energia hidrelétrica, eólica, solar e de biomassa. O desenvolvimento mais lento se deve principalmente às grandes dificuldades técnicas para exploração dos recursos presentes no ambiente marinho (SIFERT, 2010). Uma forma de aumentar a produção de energia e melhorar a viabilidade econômica é aproveitar a sinergia entre a energia eólica e a de ondas em aplicações oceânicas, pois nesse caso uma plataforma construída poderá ser utilizada para ambos os tipos de energias. Além disso, períodos em que uma forma de energia estiver em baixa a outra poderá suprir a demanda, diminuindo assim a sazonalidade na geração de energia elétrica pela combinação de ambos os tipos de energias em um único parque energético (MAIDER *et al.*, 2014).

Um estudo realizado por Silva, J.S. (2012) sugere que empreendimentos de geração de energia a partir de ondas do mar atingirão a viabilidade econômica quando os seus custos se tornarem pelo menos igual ao dobro dos custos relacionados à geração de energia eólica. No estudo a forma proposta para minimizar a sazonalidade da energia das ondas foi utilizar um módulo combinado com energia eólica e solar, assim a baixa demanda de uma é compensada pela alta de outra.

A comunidade científica e os grupos de pesquisa têm estudado a utilização de fontes renováveis para a produção de energia elétrica como uma alternativa para suprir parte da demanda energética mundial. Neste contexto, a energia das ondas do mar, que possui um potencial teórico mundial estimado de 32.000 TWh/ano, apresenta-se como uma boa alternativa para ilhas ou países com grandes faixas costeiras (ROSA *apud* MORK *et al.*, 2010).

As atividades relacionadas à pesquisa e desenvolvimento de energia elétrica utilizando ondas do mar tiveram grande destaque na década de 90, quando a Comissão Europeia incluiu a energia das ondas nos programas de pesquisa e desenvolvimento. Atualmente, além dos países da Europa, outras nações como o Estados Unidos, a Austrália, o Japão e o Brasil desenvolvem pesquisas nessa área (ROSA, 2013).

A energia das ondas oceânicas contribuiria em mais de 10% da eletricidade mundial produzida se a tecnologia que está sendo desenvolvida atualmente fosse largamente utilizada, o que corresponderia à cerca de 2.000 TWh anualmente, ou seja, à soma da produção de todas as hidrelétricas de todo mundo (PONTES, 2001). O Conselho Mundial de Energia estima que a energia de ondas e mares pode fornecer cerca de quinze por cento da potência necessária no globo (MARTINS, 2009).

Há alguns séculos, estuda-se a energia de fontes oceânicas, mas apenas nos anos 1970 os avanços foram significativos. A mais antiga patente de ondas data de 1799 na França, em 1980 mais de 1000 patentes já haviam sido registradas. Foi por volta de 1940 que se iniciou o desenvolvimento de tecnologias modernas para a exploração desse recurso, influenciado pelas diversas crises do petróleo, pelo aquecimento global e pela necessidade de mais segurança no fornecimento de energia (FALCÃO, 2010). Atualmente, a maior parte das patentes referentes à geração de energia a partir de ondas no mar encontra-se na Europa (COSTA, 2004).

Energia das ondas oceânicas é um recurso abundante e mais previsível que energia solar e eólica, e possui maior concentração de energia por unidade de área que as outras duas (DIACONU *et al.*, 2013; SILVA, D., *et al.*, 2013).

Atividades *offshore* são comuns no país, que acumula experiência com tecnologia de ponta há mais de 20 anos na indústria do petróleo, sendo este o exemplo mais próximo de atividades no mar. No Brasil, a Agência Nacional do Petróleo (ANP) estabelece regras e delimita áreas para a indústria de petróleo *offshore* e o IBAMA concede licenças ambientais para a ocupação e exploração dessas áreas (BESERRA, 2007).

Ao contrário das tecnologias de combustíveis fósseis, a energia das ondas não produz gases de efeito estufa, ou qualquer outro tipo de poluente atmosférico no seu processo de geração de energia (BESERRA, 2007).

Quando empresas ou o próprio país não investe em inovação e tecnologia, a economia fica enfraquecida, pois as empresas locais passam a ampliar sua defasagem tecnológica entre os locais mais desenvolvidos, afastando-se assim da fronteira do conhecimento. Além disso novas tecnologias levam a mais oportunidades de investimentos e mais empregos (RIBEIRO *et al.*, 2012).

Segundo Beserra (2007), as principais vantagens estratégicas da geração de energia utilizando ondas oceânicas são:

1. Recurso renovável e autossustentável;
2. Recurso bem caracterizado, de fácil estimativa de potencial do recurso;
3. Abundante, apesar de pequenas sazonalidades;
4. Energia limpa, livre de poluições;
5. É a mais consistente das fontes de energia renováveis;
6. Previsível, ondas são fenômenos mais regulares que ventos e sol;
7. Concentração de energia, as ondas contem cerca de mil vezes mais energia cinética que o vento;
8. As usinas podem ser construídas em módulos;
9. Localização flexível; *onshore*, *nearshore* e *offshore*;

10. Proteção da costa;
11. Harmonia com a vida marinha, pode funcionar como recife artificial;
12. Pode gerar independência energética local ou regional;
13. Uso compartilhado com outras atividades diluindo assim os custos.

Cedo ou tarde, o mundo enfrentará uma crise do Petróleo irreversível, pois ele é um recurso não renovável e, portanto, finito, sendo assim, investimento em pesquisa e desenvolvimento de novas fontes de energia, que sejam preferencialmente renováveis e com o mínimo de impacto ao meio ambiente, tornou-se algo essencial para humanidade (LÓPES *et al.*, 2013). Nesse contexto, energia das ondas é uma excelente opção, não apenas para geração de energia, mas também para dessalinização de água do mar, pelo processo de osmose reversa que necessita de água pressurizada, que pode ser fornecida pela maioria dos sistemas de geração de energia por meio de ondas oceânicas (POLINDER *et al.*, 2005).

O Brasil é o oitavo maior consumidor de energia total do mundo e possui a terceira maior indústria energética das Américas, atrás apenas dos USA e Canadá. A fim de satisfazer o aumento da demanda energética de uma população crescente e mais próspera, o Brasil precisa adicionar 6.000 MW de capacidade a cada ano. O potencial energético das ondas e do vento no país é muito grande, podendo ser um fator chave para suprir a demanda energética futura. Grande parte da população brasileira mora próximo à costa, sendo assim, a exploração desse recurso é algo promissor (CONTESTABILE *et al.*, 2015).

Atualmente existem diversos projetos (mais de 100) de energia a partir de ondas oceânicas, cada tecnologia apresentará um rendimento diferente se instalado em pontos distintos do globo. Além disso, os projetos não estão suficientemente maduros para que possa ser decidido quais concepções são melhores na atualidade. Como o clima de ondas varia consideravelmente ao longo do globo, acredita-se que sempre haverá diferentes concepções de projetos, sendo algumas mais indicadas para uma dada região (BABARIT, 2015).

Existem muitos projetos de energia de ondas sendo desenvolvidos atualmente, e uma maneira eficaz de reduzir os custos do projeto e prever o comportamento do sistema, é utilizar simulações computacionais. Modelos computacionais tornam o projeto mais seguro e otimizado, reduzindo assim a necessidade de testes em protótipos (IONUT, 2013).

Alguns trabalhos onde pode-se encontrar modelos dinâmicos e estudos de protótipos são: Ahn (2012), Chandrasekaran e Raghavi (2015), Foster *et al.* (2010), Gao *et al.* (2016), Lasa (2012), Rosa (2010), Teixeira *et al.* (2012) e Yang (2011). No entanto, poucas informações sobre a influência dos parâmetros de projeto no comportamento dinâmico são encontradas. Também não foram encontradas informações sobre análise de sensibilidade na potência e rendimento dos conversores quando é variada as condições de onda oceânica.

Sendo assim surgem questionamentos como:

- O Brasil possui potencial energético para geração de energia a partir de ondas oceânicas? Quais são as regiões mais indicadas?
- O quanto a energia das ondas pode contribuir para o cenário nacional?
- Quais concepções de projeto são mais indicadas para o Brasil?
- Quais critérios devem ser utilizados para avaliação dos conceitos de projeto?
- Qual o comportamento dinâmico do sistema quando são variadas as condições oceânicas?
- É possível gerar uma potência constante mesmo que o recurso oceânico forneça potência variável?

1.2 Objetivos Gerais

- Estabelecer uma metodologia para comparação e análise dinâmica de sistemas técnicos para geração de energia elétrica por ondas oceânicas.

1.3 Objetivos Específicos

- Modelar o comportamento dinâmico dos conversores selecionados quando são variadas as condições oceânicas;
- Estabelecer critérios para avaliação dos projetos de geração de energia a partir de ondas oceânicas;
- Analisar quais os tipos de sistemas de geração de energia por meio de ondas oceânicas são mais adequados para o litoral brasileiro.

1.4 Estrutura do Trabalho

O estudo foi dividido em seis capítulos fundamentais e dois anexos. No capítulo 1, pode-se encontrar as principais motivações do trabalho, objetivos gerais e específicos.

No capítulo 2, tem-se um breve estudo sobre energia das ondas, conversores utilizados para geração de energia das ondas e estudos comparativos entre os conversores.

O principal foco do capítulo 3 é a modelagem dinâmica. Neste capítulo, pode-se encontrar fundamentos do processo de projeto, aspectos da modelagem dinâmica, teoria linear das ondas oceânica e estudos de caso. O principal objetivo desse capítulo é fornecer embasamento teórico para modelagem dinâmica dos sistemas técnicos selecionados.

Os principais resultados e discussões encontram-se nos capítulos 5 e 6. Por último, o capítulo 7, refere-se às conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2 ESTADO DA ARTE

Este capítulo tem como tema os princípios gerais das ondas oceânicas, potencial energético brasileiro, descrição dos principais projetos atuais e comparações entre as concepções utilizadas.

2.1 Princípios e Potencial energético das ondas

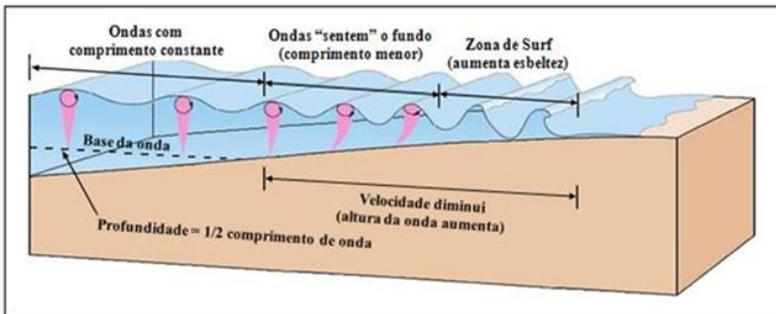
Por meio do aquecimento não uniforme da terra pela radiação solar, surgem gradientes de temperatura, esta diferença de temperatura ao longo do globo que causa uma variação de densidade da massa de ar presente na atmosfera, gerando assim ventos que transferem energia para a água através de tensões cisalhantes sob a superfície do mar, causando a formação e o crescimento das ondas (BROOKE, 2003).

As ondas e marés são as maiores forças geológicas operando na linha da costa. Juntas elas erodem até as rochas mais resistentes. As ondas e marés criam correntes que transportam os sedimentos produzidos pela erosão do continente e depositam-no em praias e águas ao longo da costa. As ondas são mutáveis, mudam de forma, período e amplitude ao longo do tempo. Quando o clima está calmo, elas percorrem regularmente a costa com período bem definido. Uma onda é dita regular se possuir período e amplitude bem definidos, é dita irregular caso contrário. Se ocorrem tempestades, conseqüentemente ventos intensos, as ondas tornam-se irregulares, movendo-se em uma confusão de formas e tamanhos (PRESS, F. *et al.*, 2006). Uma onda de período e amplitude constante é dita onda monocromática.

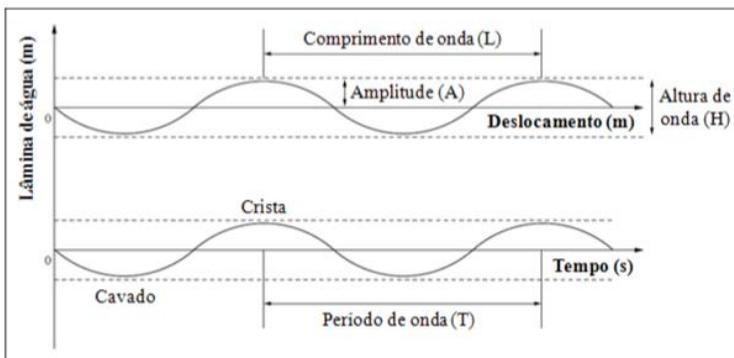
A altura das ondas aumenta à medida que: a velocidade do vento aumenta, o vento sopra por mais tempo e aumenta a área na qual o vento atua. Tempestades formam ondas irregulares, que se propagam a partir do local de origem. À medida que as ondas se deslocam a partir do centro da tempestade, em círculos que aumentam progressivamente, elas tornam-se mais regulares, transformando-se em ondas mais baixas, largas e arredondadas, denominadas ondulações, que podem viajar centenas de quilômetros. Tempestades provenientes de diversas localizações, cada uma produzindo seu próprio padrão de ondulações, explicam os frequentes intervalos irregulares entre ondas que se aproximam da costa. Descreve-se a forma de uma onda em termos de três parâmetros básicos, comprimento de onda, altura da onda e período. O período da maioria das ondas varia de poucos segundos até 15 a 20 s, com comprimentos de onda de 6 a 600 m.

Consequentemente, velocidades que variam de cerca de 3 a 30 m/s (PRESS, F. *et al.*, 2006).

Uma vez criadas, as ondas podem viajar centenas de quilômetros sem perda de energia considerável, as perdas de energia começam a ocorrer quando as ondas se aproximam da costa, à medida que a profundidade do mar diminui (cerca de metade do comprimento de onda) a onda vai perdendo energia devido ao atrito com o fundo do mar. Quanto mais próxima de águas rasas, menor se torna seu comprimento de onda e maior se torna sua amplitude até que finalmente arrebenta em uma região próxima à costa conhecida como *Zona de Surf* (Figura 2.1a), os parâmetros de onda são mostrados de forma esquemática na Figura 2.1b. Como consequência do atrito com o fundo do mar em águas rasas, a potência das ondas diminui nas proximidades da costa (CRUZ, 2004; PRESS, F. *et al.*, 2006).



(a)



(b)

Figura 2.1: (a) Interação das ondas com o fundo do mar com à aproximação da costa, (b) parâmetros de uma onda mecânica.

Fonte: Adaptado de Silva, J.S., 2012.

Ao chegar à costa, a onda arrebenta, mudando progressivamente seu regime de laminar para turbulento, grande parte da energia do movimento oscilatório é dissipada, convertendo-se em turbulência no fluido (SAINCHER; BANERJEE, 2016).

Por serem geradas por ventos, as ondas variam ao longo do ano de acordo com o clima, o que é chamado de clima de ondas. No entanto, devido à característica que as ondas possuem de percorrer milhares de quilômetros sem perda significativa de energia, o clima de ondas não necessariamente coincide com o clima de determinada região, podendo refletir o clima de uma outra localização no extremo oposto de uma bacia oceânica. Quase sempre há ondas de tempestades distantes, mas seu efeito é sobreposto por ondas esbeltas geradas em ventos locais (WRIGHT, 1999).

A forma que a onda apresenta quando arrebenta depende do regime de ondas *offshore* e da inclinação do fundo do oceano. A energia dissipada dependerá da rugosidade do fundo do oceano e da inclinação do fundo do mar de águas profundas para águas rasas. Reduções de profundidades muito acentuadas refletem grande parte das ondas incidentes, possuindo uma *Zona de Surf* reduzida e alta taxa de erosão. Baixas inclinações do assoalho oceânico possuem a característica dissipava e zona de surf extensa, sofrendo pouca erosão devido às ondas incidentes. Variações no clima de ondas, ventos e marés podem alterar toda dinâmica da praia, podendo oscilar entre comportamentos refletivo e dissipativo (CALLIRI *et al.*, 2003).

Uma onda no mar transporta energia cinética e energia potencial, a energia total de uma onda pode ser calculada como função de seu período e amplitude. Segundo Cornett (2008), a potência por unidade de largura de uma onda oceânica regular, monocromática e propagando-se em águas profundas é dada por:

$$P_{onda} = \frac{\rho g^2 T H^2}{32\pi} \quad (2.1)$$

Em que:

- P_{onda} é a potência total da onda monocromática por unidade de largura (W/m);

- ρ é a densidade da água do mar (kg/m^3);
- g é o valor da gravidade local (m/s^2);
- H é a altura total da onda, considerada como sendo o dobro da amplitude (m);
- T é o período da onda (s).

Uma descrição simplificada de uma onda oceânica é feita quando se considera uma onda regular e monocromática. O mar real é em geral modelado matematicamente como um processo estocástico, resultado da superposição de várias componentes monocromáticas de frequências, fases e direções diferentes. Os espectros mais comuns para modelagem do comportamento de ondas oceânicas são os de Jonswap e Pierson-Moskowitz, maiores detalhes sobre espectros de frequência de ondas oceânicas podem ser encontrados no trabalho de Carter (1982).

Para descrição do mar real, utilizam-se parâmetros estatísticos, como a altura de onda significativa (H_s), período significativo (T_e), período de pico (T_p) e período médio (T_z). A altura significativa corresponde à média da terça maior parte da distribuição de frequências da altura de onda, isso aproxima-se da altura que um observador irá relatar em uma inspeção visual do estado do mar, uma vez que tal observador tende a ignorar as ondas menores. De maneira análoga, período significativo (ou período energético) corresponde à frequência média associada à altura significativa. Já o período de pico é o maior período que a distribuição espectral possui, ponto de máximo da distribuição, está associado a um maior nível energético em um gráfico espectral. Por fim, período médio é a média dos períodos de todas ondas registradas (BROOKE, 2003).

Segundo Brooke (2003), em águas profundas, a potência por unidade de largura (W/m) pode ser calculada em termos de altura significativa e período significativo para cada condição oceânica por:

$$P_{real} = \frac{\rho g^2 T_e H_s^2}{64\pi} \quad (2.2)$$

Substituindo-se a densidade da água do mar por 1025 kg/m^3 e a aceleração da gravidade por $9,81 \text{ m/s}^2$ na equação, tem-se:

$$P_{real} = 490,6 T_e H_s^2 \quad (2.3)$$

Nota-se a grande importância da altura significativa da onda na potência gerada, pois o termo altura possui expoente dois, logo, pequenas variações na altura podem significar grandes variações de potência.

Os instrumentos de medição não fornecem diretamente o período significativo, é necessário obtê-lo através de relações matemáticas. Segundo Cornett (2008) assumindo-se que a distribuição de ondas segue o espectro de Jonswap, pode-se relacionar o período significativo com o período médio e período de pico através da seguinte relação:

$$T_e = 1,14 T_z = 0,9 T_p \quad (2.4)$$

Segundo Diaconu *et al.* (2013), a altura significativa (H_s) pode ser obtida através da média de altura das ondas (H_z):

$$H_s = 1,56 H_z \quad (2.5)$$

2.2 Clima de Ondas Brasileiro

Uma estimativa do potencial energético do globo pode ser observada na Figura 2.2. As regiões em vermelho possuem maior potencial energético, potência maior que 120 kW/m. Em contraste ondulações no extremo inferior da escala, representadas na cor azul escura, apresentam menor potencial energético, cerca de 10-20 kW/m. Observa-se que o Brasil possui uma baixa potência de ondas oceânicas, situando-se em uma faixa de 10-20 kW/m.

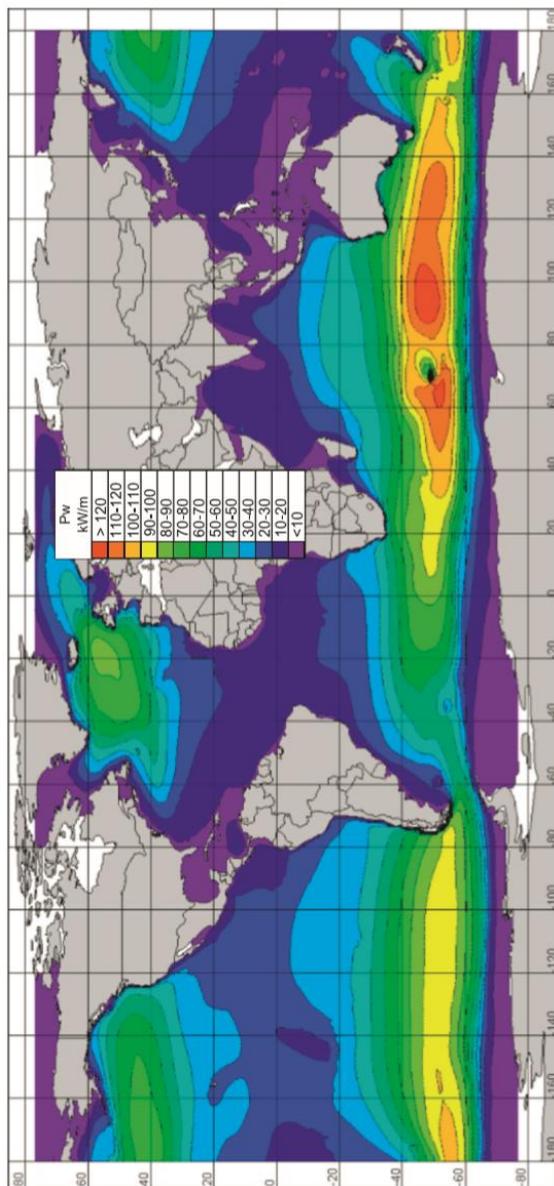


Figura 2.2: Potência das ondas ao longo do globo em kW/m .
Fonte: Lopez *et al.*, 2013.

A regularidade da potência das ondas ao longo do ano é um fator que deve ser considerado quando se trata de gerar energia através de ondas marinhas. Pode-se dizer que quanto mais próximo do equador o regime de ondas se apresenta de forma mais regular. No entanto, ao afastar-se do equador maiores variações são encontradas. Ao se tratar do litoral brasileiro, observa-se um clima de ondas relativamente constante ao longo do ano, o que favorece a exploração dessa fonte de energia (BESERRA, 2007).

Uma melhor estimativa da potência das ondas ao longo do litoral Brasileiro pode ser encontrada na Figura 2.3. Nota-se que a maior potência pode ser extraída das ondas na região sul do país, nas regiões sul de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. No entanto a parte da região nordeste do país, que se estende de Sergipe ao Leste do Rio Grande do Norte é uma região onde ocorre a quebra da plataforma continental, em que são observadas águas profundas muito próximas da costa, sendo assim essa região é mais adequada para utilização de conversores para águas profundas (CARVALHO, 2010).

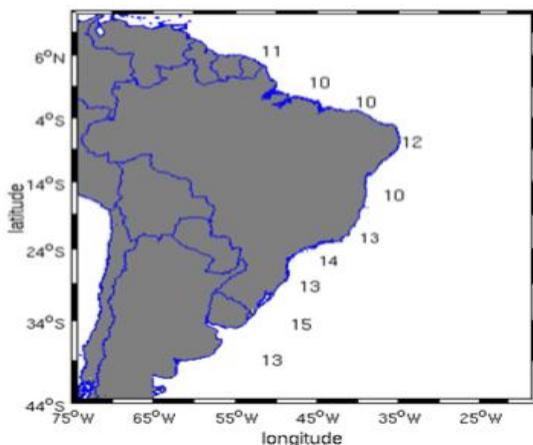


Figura 2.3: Potência das ondas ao longo do litoral brasileiro (kW/m). Fonte: Carvalho, 2010.

As ondas são formadas pelo atrito do vento com a superfície oceânica, gerando energia cinética, que pode ser usada para a produção de energia elétrica. Já as marés resultam da combinação de forças gravitacionais do sol e da lua e do movimento de rotação da Terra, o que leva à subida e descida dos níveis de água dos oceanos e dos mares fornecendo um potencial energético a ser explorado (MARTINS, 2009).

O litoral brasileiro é caracterizado por um clima de ondas de baixa potência, não afetado por tempestades violentas. O maior fenômeno meteorológico do país é o anticiclone do Atlântico Sul, praticamente permanente ao longo do ano. Por estar mais próximo do anticiclone, o litoral sul do país possui uma maior potência de ondas quando comparado com o restante do país (HOMSI, 1978).

Assis (2010) realizou um estudo sobre avaliação e aproveitamento de energia das ondas oceânicas no litoral norte do Rio Grande do Sul, os dados utilizados possuem a origem em um monitoramento do clima ondulatório feito por Strauch (1990). O local da coleta de dados foi mais especificamente nas proximidades da Lagoa dos Patos, no período de outubro de 1996 a julho de 1999. Para a coleta de dados foi utilizado um ondógrafo direcional (boia) do tipo Waverider nas coordenadas 32°11'S e 51°58'W e na batimetria (profundidade) de 15m. Os dados coletados foram enviados via rádio para uma antena e repassados para um receptor que transcodificava o sinal e o enviava para um computador destinado à aquisição de dados. As informações coletadas receberam um tratamento estatístico fornecendo informações de altura significativa da onda, período e potência por unidade de comprimento, como mostrados na Tabela 2.1. Nesta tabela, foram grifados de vermelho os meses de maior e menor potência oceânica.

Tabela 2.1: Clima de ondas no litoral norte do Rio Grande do Sul. Fonte: Modificado de Strauch, 1990.

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Hs(m)	1,2	1,7	1,7	2	2,06	1,7	1,3	1,7	1,5	1,6	1,7	1,6	1,66
Te(s)	5,3	5,9	6,2	6,2	6,7	6,5	6	6,3	5,9	5,6	5,6	5,6	5,99
P(kW/m)	3,9	8,7	9	12	14	9,4	5,2	9,3	6,1	7,3	7,9	7	8,3

Um estudo do clima de ondas no litoral norte do Ceará foi realizado por Beserra (2007). A pesquisa foi realizada no porto de Pecém, a 60 Km da cidade de Fortaleza, em uma profundidade média de 17 m. Os dados foram coletados por meio de um ondógrafo Waverider Direcional, fundeado a 3 Km da costa nas coordenadas de latitude 03°30'11''S e longitude 38°47'20'' W. O tempo total de medição consecutiva de ondas foi de 22 meses (1997-1998), foram realizadas 8 medições diárias, durante vinte minutos cada registro. A Figura 2.4 mostra a média anual de altura das ondas registradas no litoral norte de Pecém, observa-se que uma maior altura nos meses de Julho e Agosto, a média anual foi de 140 cm. O período médio das ondas ao longo do ano foi de 7,53 s, com períodos curtos entre o intervalo de 7-9 s (Figura 2.5).

No período analisado, o sítio apresentou potências médias mensais variando de 6 kW/m a 11 kW/m e uma potência média anual da ordem de 7,7 kW/m. Supondo-se que as características do clima de ondas sejam constantes para toda a faixa dos 573 km do litoral cearense, os recursos da região são da ordem de 4,41GW (BESERRA, 2007).

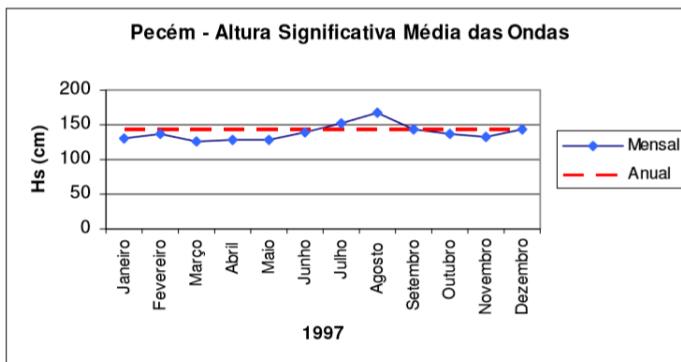


Figura 2.4: Altura significativa das ondas em Pecém-CE. Fonte: Beserra, 2007.

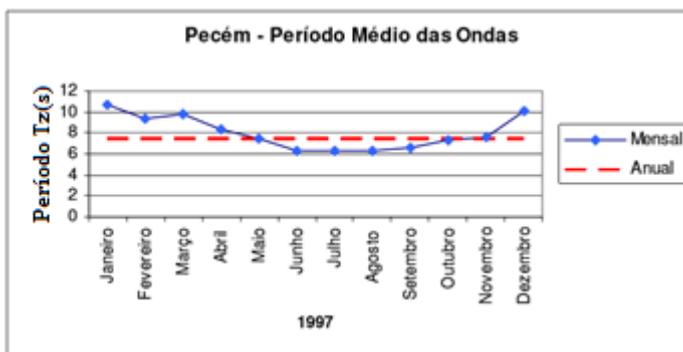


Figura 2.5: Período de ondas em Pecém-CE. Fonte: Beserra, 2007.

Fleming (2012) realizou um estudo da potência de ondas ao longo do litoral Brasileiro, seus dados foram obtidos de estudos de Souza (2011) e Carvalho (2010). A Tabela 2.2 mostra a potência média por estados brasileiros. Observa-se que os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, localizados na região sul do país, possuem maiores potência de onda, seguidos pelos estados do Sudeste, Rio de Janeiro e Espírito Santo.

As menores potências de ondas foram obtidas nos estados do Piauí e Ceará.

Tabela 2.2: Distribuição de potência das ondas no Brasil. Fonte: Flemming (2012).

	Extensão do litoral (km)	Potencial local (kW/m) Carvalho, 2010	Potencial total (GW)	Potencial local (kW/m) Souza, 2011	Potencial total (GW)
Rio Grande do Sul	610	15,14	9,24	30,00	18,30
Santa Catarina	561	15,14	8,49	30,00	16,83
Paraná	100	12,73	1,27	25,00	2,50
São Paulo	700	12,73	8,91	25,00	17,50
Rio de Janeiro	850	13,90	11,82	25,00	21,25
Espírito Santo	410	13,10	5,37	25,00	10,25
Bahia	1181	9,80	11,57	15,00	17,72
Sergipe	163	12,20	1,99	20,00	3,26
Alagoas	228	12,20	2,78	20,00	4,56
Pernambuco	187	12,20	2,28	20,00	3,74
Paraíba	138	12,20	1,68	20,00	2,76
Rio Grande do Norte	400	12,20	4,88	20,00	8,00
Ceará	573	7,50	4,30	15,00	8,60
Piauí	66	7,50	0,50	15,00	0,99
Maranhão	640	8,30	5,31	15,00	9,60
Pará	650	11,10	7,22	20,00	13,00
Amapá	300	11,10	3,33	20,00	6,00
Total	7757		90,94		164,85

Homsí (1978) mapeou o clima de ondas ao longo da costa Brasileira, o estudo foi financiado pela Petrobrás e o Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (INPH). O período médio e a altura significativa ao longo do ano em várias cidades são mostrados na Tabela 2.3. O período em que foram analisados os dados foi de 1 ano para cada município, os dados foram coletados através de medições diretas, as profundidades das medições (batimetria) foram diferentes para cada região. Em Maceió não foi medido o período de ondas ao longo do ano. O limite inferior para altura de onda ao longo do ano ficou próximo de 1 m para quase todos os estados, valor próximo da média anual. Já o limite superior de altura, com poucos dias de duração, foi em média 3 m para todo litoral brasileiro, podendo chegar até 4 m no sul do país. A condição dominante para a altura significativa de ondas ao longo do litoral brasileiro foi cerca de 1,2 m, praticamente constante ao longo do ano.

Tabela 2.3: Clima de ondas da costa brasileira. Fonte: Homsí (1978).

Estado/Município	Hs(m)	Tz(s)	Profundidade local (m)
RS/Tramandaí	1,5	8,5	17,5
PR/Paranaguá	1	5,5	10
SP/Santos	1	12	10 e 15
RJ/Angra dos Reis	1	9	14,5
RJ/Macaé	1,5	8	17
ES/Vitória (Tubarão)	0,6	10,5	9
ES/Aracruz (Portocel)	1	7,5	16
ES/Linhares (Rio Doce)	1,5	6,5	22 e 53
SE/Aracaju	1,5	7	20
AL/Maceió	1	Não medido	10
PE/Suape	1,5	6,5	17
PE/Recife	1,5	6,5	10
RN/Natal	1,5	7,5	14

Em 1996, uma campanha foi realizada pela Universidade Federal de Santa Catarina para levantar dados oceanográficos e meteorológicos. Medições de altura de ondas, período e direção foram realizadas pelo Laboratório de Hidráulica Marítima na ilha de São Francisco do Sul. As medições foram realizadas a 1,5 km da costa a uma profundidade de aproximadamente 20 m. O sistema de medição utilizado foi um sistema de boia do tipo Waverider, as medições foram efetuadas de Janeiro a Setembro de 1996. Nesse período, a altura significativa máxima foi de 3,44 m, o período de pico observado foi de 16,67s. Os valores médios para toda campanha foram de 1,02 m para altura significativa e 8,91 s para período. Nesse estudo foi observado que a maior parte das ondas tem origem leste e sudeste (ALVES;MELO, 2001).

2.3 Classificação dos Conversores de Energia a Partir de Ondas Oceânicas

As tecnologias existentes para geração de energia a partir de ondas oceânicas podem ser classificadas em três categorias de acordo com o princípio de funcionamento como mostra a Tabela 2.4. Mais de 1000 dispositivos para conversão de energia a partir de ondas oceânicas foram patenteados em todo mundo podendo ser classificados como coluna de água oscilante (CAO), corpos oscilantes e dispositivos de galgamento (VICINANZA *et al.*, 2012).

Tabela 2.4: Classificação dos conversores de energia das ondas.

Fonte: Adaptado de Antonio, 2014.

Classificação	Transmissão de potência	Características
Coluna de água oscilante (CAO)	Turbina a ar	Estrutura fixa ou flutuante
Corpo oscilante	Motor hidráulico, turbina hidráulica ou gerador elétrico	Flutuante ou submerso
Galgamento	Turbina hidráulica	Estrutura fixa ou flutuante

A tecnologia de coluna de água oscilante (CAO) utiliza a variação de pressão produzida no ar pela passagem da onda para gerar energia através de uma turbina, e pode ser de estrutura fixa ou móvel. Corpos oscilantes utilizam como princípio de funcionamento o deslocamento de um mecanismo de acordo com as ondas (submerso ou flutuante) para gerar energia. O movimento do dispositivo pode ser linear ou rotacional e por sua vez acionará a parte do sistema responsável pela conversão de energia que pode ser um sistema hidráulico (motor hidráulico ou turbina hidráulica) ou um sistema elétrico. Por último tem-se os dispositivos de galgamento, cujo princípio de funcionamento é baseado em armazenar água a uma altura maior que o nível do mar e utilizar a energia potencial para gerar potência em uma turbina hidráulica (SIRFFERT, 2010). Na Figura 2.6, tem-se o funcionamento esquemático dos principais dispositivos de conversão de energia a partir de ondas oceânicas.

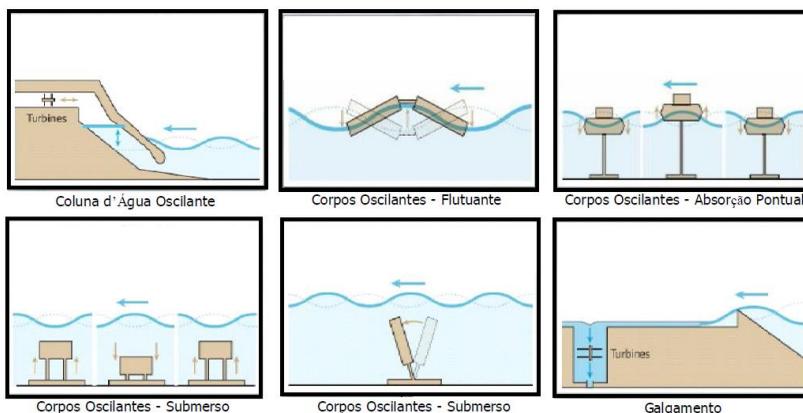


Figura 2.6: Dispositivos de conversão de energia das ondas oceânicas.

Fonte: Souza, R.A., 2011.

Segundo Silva (2012) dispositivos de conversão de potência de ondas também podem ser classificados quanto à localização relativa à costa, podendo ser:

- Costeiros (*Onshore*), fixos ou incorporados à costa;
- Próximos à costa (*Nearshore*), profundidades normalmente inferiores a 20 m e dispositivos apoiados ao fundo do mar;
- Afastados da costa (*Offshore*), profundidades de aproximadamente 50 m, dispositivos geralmente flutuantes.

2.3.1 Coluna de Água Oscilante (CAO)

O pesquisador da marinha Japonesa Yoshio Masuda (1925-2009), é lembrado como o pai da energia das ondas moderna, e seus estudos nos anos quarenta serviram de base para este campo de pesquisa. Ele desenvolveu um dispositivo que gera energia através das ondas oceânicas. O princípio de funcionamento é basicamente utilizar a variação do nível de uma coluna de água para movimentar o ar através de um canal. O fluxo de ar aciona uma turbina gerando assim energia elétrica. Este tipo de dispositivo ficou conhecido como Coluna de Água Oscilante (CAO). Para direcionar o ar sempre em um mesmo percurso utilizam-se válvulas que podem ser abertas apenas em um sentido, semelhantes a portas. A Figura 2.7 mostra o esquema de funcionamento do dispositivo de Masuda.

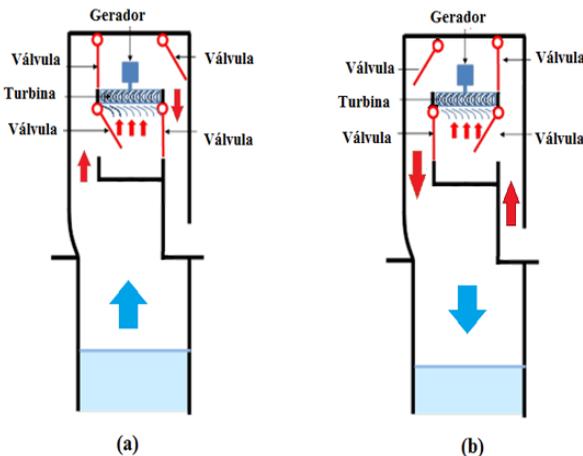


Figura 2.7: Princípio de funcionamento de um dispositivo CAO.

Fonte: Modificado de Antonio, 2014.

Na Figura 2.7(a), o fluxo de ar é movido para fora da câmara devido ao movimento ascendente da coluna de ar, impulsionada pela passagem da onda. Na Figura 2.7(b), a coluna de ar desce e assim o fluxo de ar é no sentido de entrar na câmara. Devido às válvulas direcionais o ar sempre passa pela turbina em uma única direção, girando a turbina sempre no mesmo sentido. Esse tipo de projeto é comercializado no Japão desde 1965, porém, já foi utilizado em vários países, como Japão, Noruega, Índia e Escócia. Este tipo de dispositivo de conversão de energia pode ser utilizado para geração de energia em embarcações (ANTONIO, 2014).

Uma turbina de fluxo axial foi desenvolvida em 1976 por Alan A. Wells para aplicação em dispositivos do tipo CAO com a vantagem de não utilizar válvulas de retificação. O seu rotor é semelhante ao do rotor de uma turbina a vapor de uma fase convencional de fluxo axial e de tipo impulso. A Figura 2.8 mostra o esquema de funcionamento de protótipos modernos do tipo CAO utilizando a turbina de Wells. Em (a) é mostrado o dispositivo de conversão de energia, as ondas incidentes fazem variar o nível da água forçando a passagem de ar pela turbina de Wells. Em (b) é mostrado o desenho da turbina Wells (ANTONIO, 2014).

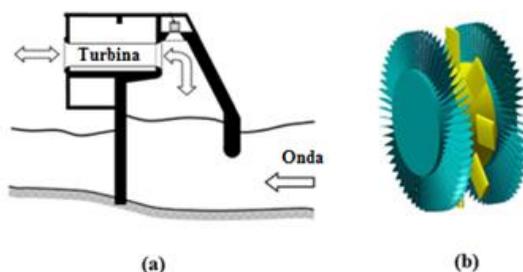


Figura 2.8: Dispositivo OWC e turbina Wells.
Fonte: Modificado de Antonio, 2014.

A maioria dos dispositivos CAO, utilizam turbinas do tipo Wells com diâmetro entre 2 a 3,5 m, trabalhando com pressões da ordem de 1 bar. Esse tipo de turbina possui grande massa, podendo armazenar energia para compensar flutuações de pressão atuando também como um volante de inércia (POLINDER *et al.*, 2005).

Dispositivos em escala real foram construídos na Noruega na cidade de Bergen (1985, 500 kW), Japão, na cidade de Sakata (1990, 60 kW), Índia, na cidade de Vizhinjam (1990, 125 kW), Portugal, na cidade

de Pico (1999, 400kW), na Escócia, na ilha de Isley (2000, 500 kW), China, em Guangdong (2001, 100kW) e na Austrália, na cidade de Kembla (2005, 500 kW).

Em todos os projetos CAO a estrutura é fixada em uma rocha na região de quebra-mar ou em alguma estrutura fixa ao fundo do mar. A variação da altura da coluna de água devido à passagem da onda atua sobre uma turbina de Wells que, por sua vez, aciona um gerador elétrico. A área ocupada por estes dispositivos é em torno de 80m² a 250m². Na Figura 2.9 é mostrado o dispositivo construído na Escócia. Nota-se que o dispositivo é ancorado em rochas, observa-se a presença de uma tubulação onde está localizado a turbina a ar do dispositivo.



Figura 2.9: Dispositivo CAO construído na Escócia. Antonio, 2014.

Uma variação do conversor CAO é o tipo com estrutura móvel, a Figura 2.10 mostra o princípio de funcionamento do sistema, em que o movimento das ondas altera a posição de todo o sistema. A coluna de água é alterada fazendo com que o fluxo de ar passe pela turbina. A onda incidente deve encontrar a face oposta à abertura da coluna da água para maximizar a produção de energia (MASUDA *et al.*, 1986).

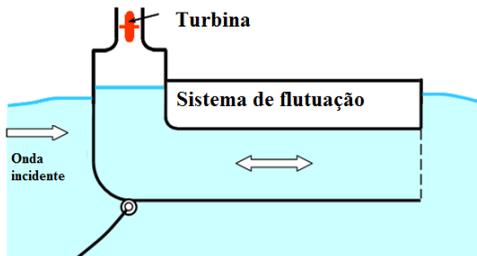


Figura 2.10: Dispositivo CAO de estrutura flutuante. Fonte: Antonio, 2014.

Observa-se na Figura 2.11 o dispositivo do tipo CAO construído na Austrália na cidade de Kembla. Este conversor utiliza uma turbina de

Wells e está ancorado ao fundo do mar. O uso do dispositivo acoplado à quebra mar possui as vantagens de possuir fácil acesso para construção e manutenção, além da redução do custo devido a linhas de transmissão de energia (ANTONIO, 2014).



Figura 2.11: Dispositivo CAO construído na Austrália. Fonte: Antonio, 2014.

OE Bouy é um conversor do tipo CAO flutuante e utiliza turbina Wells para geração de energia (Figura 2.12). O projeto foi desenvolvido na Irlanda em 2011, os testes foram realizados em um protótipo em escala de 1:4 na costa da cidade de Galway na Irlanda. O comprimento do protótipo testado foi de 6 m, testado em condições de potência média oceânica de 3,4 kW/m. Os testes resultaram em uma potência gerada pelo protótipo de 1,45 kW, fornecendo assim um rendimento médio de 7,1%. O projeto em escala 1:1, quando construído possuirá 24 m de comprimento, estima-se que pode capturar cerca de 48,4 kW de potência para uma fonte de 38,9 kW/m, com rendimento de 5,2% (LAVELLE *et al.*, 2011).



Figura 2.12: OE Bouy. Fonte: Babarit *et al.*, 2012.

2.3.2 Conversores do Tipo Corpo Oscilante

São geralmente dispositivos *offshore*, consistem basicamente em dispositivos oscilantes que se movem de acordo com a passagem da onda, podendo ser flutuantes ou submersos. Operam em regimes de onda mais poderosos disponíveis em águas profundas (normalmente mais de 50m de profundidade da água). Corpos oscilantes podem produzir energia através da reação contra o fundo do mar (ou uma estrutura fixa, como um quebramar) ou contra outro corpo oscilante. Estes conversores de energia das ondas são, em geral, mais complexos em termos de fabricação e projeto em comparação com os sistemas CAO. Isto, juntamente com problemas adicionais associados com amarração, acesso para manutenção e a necessidade de longos cabos elétricos submarinos, tem dificultado o seu desenvolvimento, e por isto só recentemente alguns sistemas têm alcançado a fase de demonstração em grande escala (ANTONIO, 2014).

O mais simples de todos os conversores do tipo corpos oscilantes consiste basicamente em uma boia reagindo ao movimento das ondas produzindo um deslocamento relativo entre o flutuador e a estrutura de referência. Estes tipos de dispositivos podem acionar uma turbina hidráulica, um motor hidráulico ou ainda um gerador elétrico linear. Na maioria dos casos são concebidos como absorvedores pontuais, pois as dimensões dos flutuadores são muito menores que o comprimento da frente de onda. Estes sistemas podem ser submersos ou flutuantes (ANTONIO, 2014).

Um projeto de captação de energia através de ondas oceânicas do tipo corpo oscilante submerso, foi projetado pela Europe Marine Energy (EMEC) em Orkney na Escócia em 2009, nomeado de Oyster. O projeto foi concebido para ser utilizado em profundidades de aproximadamente 10-15 m, o maior projeto Oyster construído foi instalado na Escócia em 2009 e foi testado no mar em 2010 (Figura 2.13a). Este tipo de conversor é projetado para ser instalado perto da costa (*nearshore*), onde a ação das ondas faz com que o conversor se movimente para frente e para trás, acionando um atuador hidráulico, que por sua vez movimentará o fluido hidráulico em uma linha pressurizada, que por fim, irá atuar em uma turbina do tipo Pelton gerando energia elétrica (Figura 2.13b). A vazão é regulada utilizando válvulas de retenção e acumuladores, e a potência média de cada unidade é de 350kW (WHITTAKER, 2007).

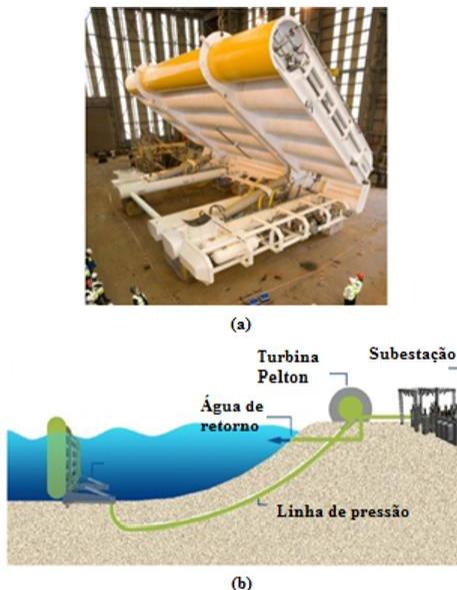


Figura 2.13: Projeto Oyster, (a) conversor, (b) esquema de funcionamento.
Fonte: Whitaker, 2007.

Outra concepção de projeto é o Wave Star Energy, classificado como um conversor do tipo corpo flutuante pontual, podendo ser instalado em alto mar ou próximo à costa. Em 2005 um conversor foi testado em uma escala 1:10 na Dinamarca, na cidade de Nissun Bredning, com capacidade de aproximadamente 5,5kW de potência. Nos seis primeiros meses passou por 15 grandes tempestades sem grandes avarias. O protótipo em escala 1:10 é mostrado na Figura 2.14.



Figura 2.14: Protótipo Wave Star Energy. Fonte: Wave Star Energy, 2015.

As ondas fazem o flutuador subir e descer movimentando o fluido hidráulico em um circuito fechado que por fim acionará o motor hidráulico gerando energia. Em setembro de 2009, foi instalado a 300 m da costa de Honstholm na Dinamarca um protótipo com capacidade de 600kW, com dois braços que na escala 1:2. O protótipo pesa 1000 toneladas, possui 6 m de altura, os braços têm 25 m de comprimento e os flutuadores 5 m de diâmetro (WAVE STAR ENERGY, 2015).

Segundo a Wave Star Energy (2015), o conceito deste conversor é diferente dos seus concorrentes. O equipamento não funciona como uma barreira para as ondas. Em condições severas de mar os flutuadores são automaticamente levantados, garantindo a integridade do equipamento.

Do ponto de vista de projetos hidráulicos para transmissão de potência, existem várias propostas de projetos, na Figura 2.15 são mostrados de maneira simplificada os componentes de um circuito hidráulico de uma unidade de conversora de energia do tipo WaveStar. Na Figura 2.15 (a) é mostrado o flutuador submetido a ondas do mar, em que a caixa representa o sistema de conversão de energia que gera potência para rede elétrica. Já na Figura 2.15 (b), é mostrado um sistema de conversão simples, com um cilindro simétrico acionando um motor hidráulico de deslocamento variável, que por sua vez está acoplado a um gerador elétrico. Na Figura 2.15 (c), é mostrado um circuito onde são utilizadas válvulas de retenção e um acumulador hidráulico. O objetivo do acumulador hidráulico é tornar a pressão na entrada do motor hidráulico mais constante o possível, as válvulas são usadas para direcionar o fluido hidráulico em apenas um sentido (HANSEN *et al.*, 2013)

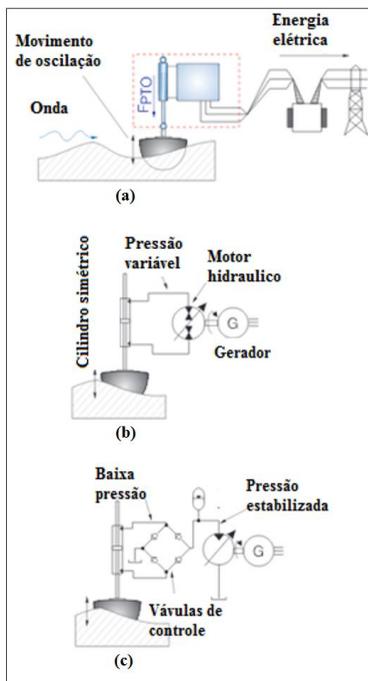


Figura 2.15: Circuitos hidráulicos utilizados pela Wave Star Energy.

Fonte: Hansen *et al*, 2013.

Um exemplo bem-sucedido de projeto da classe corpo oscilante flutuante utilizando mecanismo de rotação é o realizado pela empresa escocesa Pelamis Wave Power, onde várias seções cilíndricas são conectadas por juntas de rotação que acionam pistões hidráulicos. O fluido movimentado pelos pistões hidráulicos aciona um motor hidráulico acoplado a um gerador elétrico que gera potência elétrica. O projeto Pelamis foi concebido para atuar em uma região com 50-70 m de profundidade onde as ondas de águas profundas (*offshore*), com mais energia, podem ser aproveitadas. A tecnologia hidráulica utilizada no Pelamis é do tipo circuito fechado, permitindo assim que o projeto funcione por muito tempo sem manutenção, pois os custos envolvidos em manutenção em atividades *offshore* são elevados. Na Figura 2.16 é ilustrado o princípio de funcionamento do Pelamis, onde observa-se que as juntas rotacionais são movidas de acordo com o movimento das ondas, O movimento relativo das juntas aciona atuadores hidráulicos que movimentam o fluido de trabalho em um circuito fechado gerando energia

através de um motor hidráulico acoplado a um gerador, como mostrado na Figura 2.17 (HENDERSON, 2006).

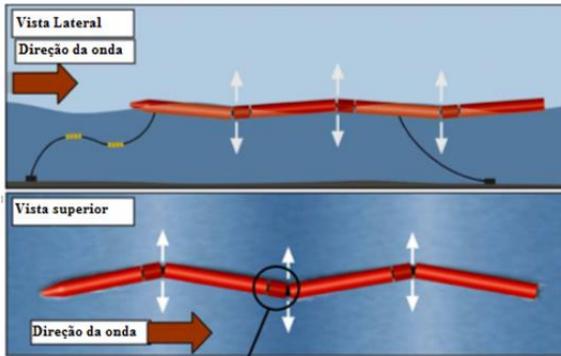


Figura 2.16: Projeto Pelamis P750. Fonte Henderson, 2006.

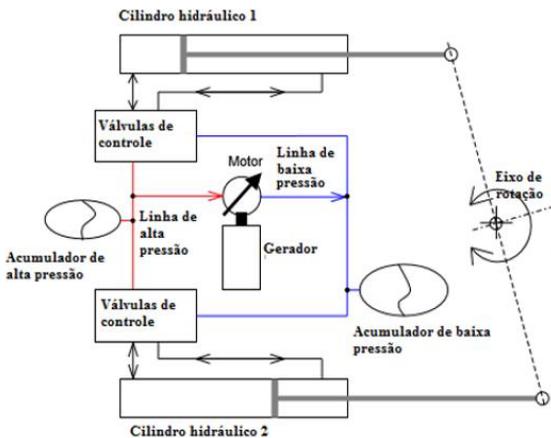


Figura 2.17: Circuito hidráulico utilizado no projeto Pelamis P750.

Fonte Henderson, 2006.

No Brasil foi feito um projeto de captação de energia das ondas oceânicas pela COPPE/UFRJ, financiado pela Tractebel Energia S.A. A usina-piloto entrou em operação em 2012 no porto de Pecém, a 60 km de Fortaleza. Os principais constituintes deste projeto são: bomba alternada acionada por um braço mecânico, boia de flutuação que move o braço mecânico, câmara hiperbárica, válvulas reguladoras de pressão e vazão e,

por fim, uma turbina do tipo Pelton que aciona o gerador elétrico (Figura 2.18). Na Figura 2.18 (a) observa-se os braços de acionamento e suas respectivas boias de flutuação, na Figura 2.18 (b) é mostrada a turbina Pelton utilizada para geração de energia (SIFFERT, 2010).



Figura 2.18: Conversor hiperbárico brasileiro, (a) detalhe dos braços, (b) câmara hiperbárica e turbina Pelton. Fonte: Siffert, 2010.

Ao se movimentar com a passagem da onda o flutuador aciona uma bomba hidráulica, que aspira água tratada e armazenada em um reservatório na própria instalação. Em seguida, as bombas enviam a água para o acumulador hidropneumático, interligado à câmara hiperbárica, que é previamente pressurizada com gás (Figura 2.19). Dessa forma, o acumulador contém certa proporção de água e gás pressurizados, separados por um pistão. A água é liberada na forma de um jato de água sob alta pressão para acionar o conjunto composto por uma turbina hidráulica do tipo Pelton e por um gerador elétrico (ROSA, 2013). Ressalta-se que para o funcionamento adequado deve-se utilizar válvulas de retenção logo após o atuador hidráulico (não mostrado na figura).

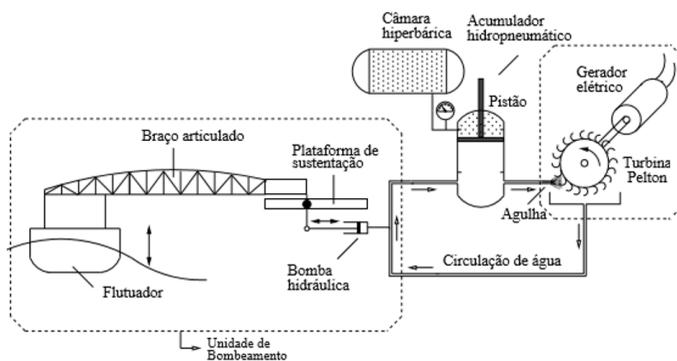


Figura 2.19: Esquema de funcionamento de um conversor hiperbárico. Fonte: Rosa, 2013.

No anexo A pode-se encontrar mais exemplos de conversores do tipo corpo oscilante.

2.3.3 Conversores do Tipo Galgamento

Uma maneira diferente de converter a energia das ondas é capturar a água que está perto da crista da onda e introduzi-la em um reservatório onde é armazenada a um nível mais elevado do que o nível médio da superfície livre do mar circundante. A energia potencial da água armazenada é convertida em energia útil através de turbinas hidráulicas convencionais, conversores que utilizam este princípio de funcionamento são conhecidos como sendo do tipo Galgamento (ANTONIO, 2014).

Um conversor de galgamento é Wave Dragon, um conversor *offshore* desenvolvido na Dinamarca, cuja estrutura flutuante consiste em dois refletores de onda focando as ondas na entrada do reservatório, quando a água chega ao reservatório ela escoa passando por uma turbina de baixa pressão do tipo Kaplan (Figura 2.20a).

Na Figura 2.20 (b), é mostrado o protótipo do Wave Dragon com 57 m de largura, 237 toneladas, gerando de 4-10 MW dependendo das condições do mar, o protótipo Wave Dragon foi implantado em Nissum Bredning, Dinamarca, foi conectado à rede em maio de 2003 e foi testado por vários anos (KOFOED, 2006). Na parte inferior da plataforma, existem câmaras abertas que são utilizadas para o controle da altura de flutuação do protótipo. Esse controle de altura é feito por meio da variação da pressão do ar no interior dessas câmaras, de acordo com o regime das ondas predominantes no local (COSTA, 2004).

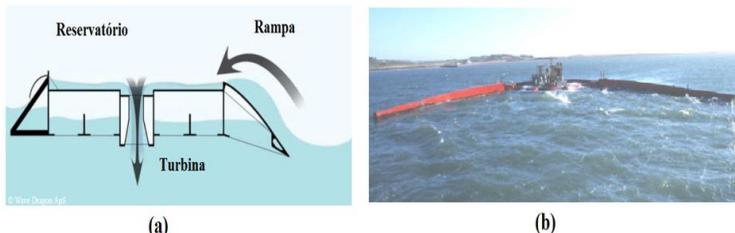


Figura 2.20: (a) Esquema de funcionamento, (b) projeto Wave Dragon.
Fonte: Kofoed, 2006.

A água armazenada no reservatório do conversor possui a função de compensar flutuações de oscilações das ondas e manter o regime de rotação da turbina o mais constante possível (POLINDER *et al.*, 2005).

SSG é um conversor de energia a partir de ondas oceânicas do tipo Galgamento. Esse projeto possui reservatórios dispostos como andares de um prédio que são preenchidos com água através das ondas incidentes. A energia das ondas é armazenada na forma de energia potencial e através do escoamento para os reservatórios inferiores aciona uma turbina de eixo vertical com múltiplos estágios gerando energia elétrica (Figura 2.21). Esse tipo de projeto é concebido para ser ancorado à costa. As vantagens deste tipo de projeto são: estrutura pode ser compartilhada com outros projetos, a fácil instalação e manutenção e não é necessário um sistema para amarração como nos utilizados em sistemas *offshore*. No entanto, por atuar em águas rasas, o regime de ondas utilizado é menos energético e, com isso, os impactos ambientais podem ser significativos.

Estudos experimentais foram realizados em um modelo em escala 1:60 pela Universidade de Aalborg na Dinamarca. Os resultados mostraram que o ângulo ótimo para rampa externa é em torno de 35 graus, a variação do ângulo de incidência da onda reduz o rendimento do hidráulico do sistema, a variação da maré reduz o rendimento do sistema e o número de reservatórios aumenta o rendimento do sistema. Para que os reservatórios não sejam preenchidos com sedimentos são necessários pelo menos 15 m de profundidade para a soleira do projeto. Considerando as perdas de potência da onda ao gerador elétrico o rendimento do conversor é de 25 a 35 % (VICINANZA *et al.*, 2012).

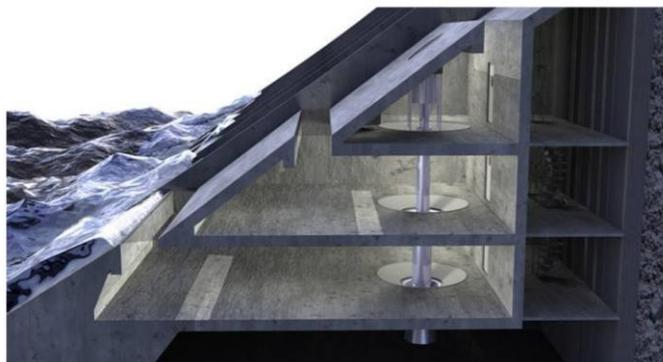


Figura 2.21: Conversor SSG. Fonte: Vicinanza *et al.*, 2012.

2.4 Estudos Comparativos

Das tecnologias disponíveis para aproveitamento de energia de fontes oceânicas, a energia das correntes oceânicas não é viável tecnologicamente para o litoral brasileiro, pois com a tecnologia atual são necessários de cerca de 2 m/s de velocidade de corrente (LEWIS; ESTEFEN *et al.*, 2011). O Brasil possui velocidade máxima na superfície entre 0,4 e 0,7 m/s (SILVEIRA; LIMAB *et al.*, 2008). Daí o porquê de esta alternativa não ter sido explorada também. A instalação de uma usina de geração de energia através de correntes de maré resulta em grandes impactos ambientais à vida marinha em seu entorno (SIFFERT, 2010). A tecnologia mais indicada para o litoral brasileiro devido a suas características oceânicas é a energia das ondas, mesmo que a média nacional de potência seja pequena, ela é relativamente constante ao longo do ano, o que minimiza a sazonalidade do recurso, tornando viável sua exploração (FLEMING, 2012).

Projetos de captação de energia de ondas ainda não estão suficientemente maduros para decidir quais as concepções de projetos são as melhores atualmente, existem mais de 70 concepções competindo atualmente. Um aspecto importante é que diferentes tecnologias terão diferentes desempenhos em pontos diferentes do globo (O'CONNOR *et al.*, 2013). Como o clima de ondas e a altura de onda média variam muito ao redor do globo, é pouco provável que os dispositivos convirjam para uma única forma, apesar de alguns dispositivos poderem ser utilizados em climas de ondas distintos (FLEMING, 2012).

O'Connor *et al.* (2013) realizaram um estudo visando obter uma escala apropriada para cada unidade de geração de energia a partir de ondas oceânicas. Foram selecionados os conversores Pelamis e Wave Star Energy. Através de leis de semelhança dinâmica, foi variada a potência de acordo com a escala do dispositivo. Fixou-se a capacidade da usina como sendo de 100MW, podendo ser constituída de unidades individuais de 0,25 MW, 0,5MW e 1MW. Os resultados mostraram que independentemente da localização, utilizar projetos individuais de menor capacidade gera um maior montante de energia para usina de ondas, pois projetos de menor capacidade adaptam-se melhor às mudanças no clima de ondas gerando uma maior potência.

Segundo O'Connor *et al.* (2013), outra vantagem oferecida pelo projeto Wave Star Energy em relação ao projeto Pelamis é o fator manutenibilidade. Entende-se por manutenibilidade a capacidade de um ítem ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é

executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos (ABNT, 1994).

Um bom rendimento na extração de energia está associado a condições de ressonância com as ondas, o que tem implicações sobre as dimensões dos sistemas. Daqui resulta na prática que os sistemas deverão ser modulares, com potências por unidade que não excedam alguns megawatts, o que aponta para a fabricação em série (SOUZA, R.A, 2011).

Martins (2009) levantou os impactos gerados por dispositivos de geração de energia a partir de ondas oceânicas. Os sistemas de Coluna de Água Oscilante (CAO), quanto aos danos ambientais, são ruidosos, devido ao uso de uma turbina a ar, causam poluição visual por serem dispositivos instalados próximos à costa. Em termos de rendimento, devido à dissipação de energia das ondas nas proximidades da costa, estes dispositivos não aproveitam ao máximo a potência das ondas oceânicas. Além disso, a localização deve ser bem analisada, para evitar a implementação em zonas de lazer ou em zonas protegidas. Como vantagem, tem-se que este é o mais antigo e bem desenvolvido, apresenta facilidades de manutenção e não necessita de longos cabos para transmissão de energia.

Ruído e vibração são características negativas de equipamentos conversores de energia de ondas oceânicas, esses efeitos são mais evidentes em dispositivos do tipo CAO. Teme-se que a vibração da infraestrutura possa vir a afetar o sistema sonar dos animais marinhos. O uso de silenciadores pode reduzir os ruídos a níveis aceitáveis, mas nesse caso pode ocorrer uma redução do rendimento da turbina (BESERRA, 2007).

Dispositivos *offshore* como WaveDragon e Pelamis, possuem como desvantagens necessitarem de grandes investimentos em transmissão de energia. Além disso, a implementação destes dispositivos pode gerar conflitos de uso com atividades de navegação e os custos são elevados devido à ausência de experiência, que se espera que diminuam com a maturidade dos sistemas. Embora possua elevado custo para implementação, estes dispositivos operam em regiões *offshore*, o que lhes permite aproveitar maior potência das ondas (MARTINS, 2009).

Para profundidades inferiores a 50 m os cabos devem ser enterrados, afim de evitar danos pela ação do ambiente (correnteza, ondas e animais marinhos) e humana (pesca). Para definir a profundidade de enterramento necessária, é necessário fazer estudos batimétricos da zona de aplicação dos cabos, dependendo das características do fundo. Para zonas mais duras (rochosas), os cabos terão de ser revestidos com tubos metálicos (CENTER, 2004).

Visto ser um dispositivo submerso, o dispositivo AWS não cria impactos visuais, e não sofre danos nefastos, resultantes de tempestades, uma vez que nas profundidades onde é implementado, os efeitos das tempestades já não se fazem sentir com tanta intensidade (DE SOUSA PRADO *et al.*, 2006). Detalhes sobre o conversor AWS encontram-se no anexo A.

Não se espera que as usinas de ondas tenham impacto visual comparável às turbinas eólicas, devido à sua altura limitada. Contudo, as áreas costeiras são consideradas importantes para o propósito de recreação, podendo fazer da intrusão visual uma questão política altamente apelativa, especialmente para as concepções *onshore* e *nearshore* (BESERRA, 2007).

As características físicas e geológicas da costa são determinadas pelo balanço de sedimentos. Os sedimentos são introduzidos principalmente por rios e retirados por correntes oceânicas e de marés. Os elementos climáticos e oceanógrafos regionais controlam a energia dos agentes de dinâmica costeira. A ocupação desordenada da costa, muitas vezes, a desencadeadora de desequilíbrio no balanço de sedimentos e de alteração no clima das ondas incidentes (MACHADO, 2001).

Os impactos ambientais gerados por dispositivos de geração de energia através das ondas oceânicas são certamente específicos para cada local, pelo que a definição da sua tolerabilidade irá variar também de local para local (CRUZ;SARMENTO, 2004; PONTES *et al.*, 2005). Alguns estudos foram feitos comparando esses sistemas a plataformas petrolíferas, navios ancorados e sistemas eólicos. Na análise desses estudos, os responsáveis concluíram que os impactos do aproveitamento da energia das ondas são bastante reduzidos, tendo maior relevância na fase de implementação (PONTES *et al.*, 2005; BESERRA, 2007; SARMENTO, 2006).

A superfície dos aparatos de conversão de energia das ondas pode tornar-se um bom ambiente de vida para pequenos peixes, mexilhões, etc., atraindo colônias de pássaros. As taxas mais altas de incrustações estão nas altas e médias latitudes, onde os mariscos normalmente são dominantes. Em certos períodos do ano eles podem formar verdadeiros cobertores de até 15 cm de espessura (BESERRA, 2007).

O rendimento dos aparatos de conversão de energia das ondas, por exemplo, pode variar consideravelmente com as condições oceânicas. Assim, conhecendo o clima de ondas de uma região, pode-se indicar o aparato que apresente a maior produção de energia e que seja mais adequado àquele contexto ou, talvez, a localização mais adequada para determinado princípio de conversão (SANDERS *et al.*, 2003). O gráfico

da Figura 2.22 mostra o rendimento de alguns aparatos conhecidos para diversas condições de altura significativa de ondas oceânicas

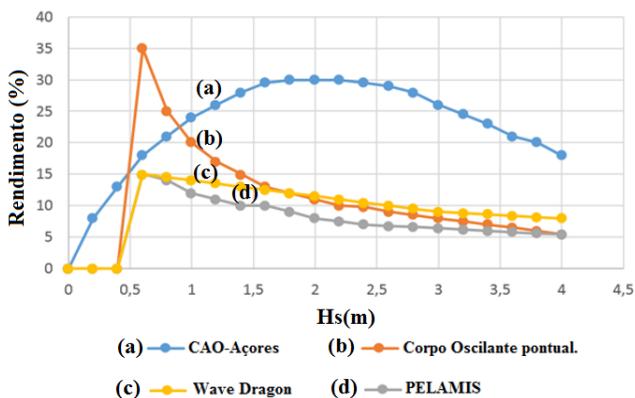


Figura 2.22: Rendimento por altura significativa de onda para os conversores CAO-Açores, Corpos oscilantes pontual, Pelamis e Wave Dragon.

Fonte: Adaptado de Sanders *et al.*, 2003.

Dispositivos instalados na costa (*onshore*) possuem a vantagem de serem localizados e mantidos próximos à costa, diminuindo assim os custos de distribuição e fabricação. Como desvantagens pode-se destacar: o planejamento de proteção e conservação das costas e nível de energia reduzido das ondas nas proximidades da costa devido à perda de potência com o fundo do mar. Dispositivos do tipo *nearshore* possuem ainda vantagem referente aos custos de fabricação e distribuição por estarem próximos à costa e atuarem em um regime de ondas mais energéticas. No entanto ainda apresentam problemas referentes a impactos ambientais. Dispositivos de alto mar do tipo *offshore* possuem a vantagem de pouca interação com ambiente marinho, proporcionando um melhor aproveitamento de potência das ondas. No entanto apresentam dificuldades na distribuição de energia e manutenção (SOUZA, R.A, 2011).

Existem diversos tipos de tecnologias para conversão de energia a partir de ondas oceânicas, dificilmente um único projeto atenderá todas as condições de clima de ondas do mundo, sendo assim alguns projetos serão mais adequados que outros para uma região específica. Uma forma eficiente de selecionar um conversor para atuar em uma região é utilizar os dados sobre a potência que o dispositivo desenvolve em um dado clima de ondas, esses dados geralmente são fornecidos pelo desenvolvedor do projeto na forma de matriz de potência (Tabelas 9.1 a 9.15 do Anexo B).

Essas matrizes fornecem a potência gerada por cada dispositivo para uma dada condição oceânica em termos de altura significativa e período (BABARIT *et al.*, 2012; DIACONU *et al.*, 2013; VEIGAS *et al.*, 2015).

Diaconu *et al.* (2013) realizaram um estudo sobre seleção de um dispositivo para geração de energia a partir de ondas oceânicas para atuar na costa ocidental do Mar Negro. O local selecionado para instalação do dispositivo foi a plataforma de Gloria, cujo clima de ondas mais comum possui período significativo de 3-9 s e altura significativa de ondas de 0-2,5 m. Através das matrizes de potência dos dispositivos e as condições oceânicas foi selecionado o dispositivo com base na quantidade de potência e área ocupada pelo conversor. O dispositivo recomendado de acordo com as condições locais de ondas foi o Oceantec, apesar do dispositivo Wave dragon gerar maior quantidade de energia. No entanto, para seleção, foi considerado como um fator decisivo o projeto Oceantec ocupar um menor espaço e possuir menor massa.

Veigas *et al.* (2015) fizeram um levantamento da energia gerada por conversores de energia a partir de ondas oceânicas na costa da Galícia, localizada na Espanha. No estudo foram considerados 4 dispositivos: Wave Dragon, Pelamis, AWS e um dispositivo do tipo CAO. Para levantamento das condições oceânicas foram utilizados dados coletados por medições através de boias no período de 1997-2012, os dados foram compilados em matrizes de potência para os locais analisados. Para a estimativa da potência gerada pelos dispositivos, utilizaram-se as matrizes de potência para cada dispositivo. Combinando os dados das matrizes de potência dos conversores e dos estados oceânicos foi possível estimar a quantidade de energia em GWh no ano. Os resultados mostraram que o Wave Dragon é o dispositivo mais adequado para o mar da Galícia, pois gera o maior montante de energia ocupando uma menor área.

Babarit *et al.* (2012) realizaram um estudo comparativo entre diferentes tecnologias para conversão de energia a partir de ondas oceânicas, os resultados foram representados em forma de matrizes de potência para cada dispositivo. Os oito dispositivos avaliados foram Seabased, Ceto, Wavebob, Wavestar, Pontoon, Oyster, Langlee e OE buoy. Os parâmetros de projeto utilizados na simulação foram obtidos dos fabricantes de cada dispositivo, os parâmetros hidrodinâmicos foram obtidos através de simulações utilizando o software WAMIT, para modelagem dinâmica foi utilizado o software Fortran90. As matrizes de potência foram obtidas através de simulações dinâmicas de cada dispositivo em diversas condições oceânicas, para cada altura significativa de onda e período é possível estimar a potência capturada

por cada dispositivo, assim, conhecendo o clima de onda de uma região é possível estimar qual dispositivo irá gerar uma maior quantidade de potência.

Uma forma de estimar o custo do equipamento é considerar a quantidade de massa utilizada no projeto, dessa forma o cálculo da energia absorvida por unidade de massa fornece uma noção comparativa do custo benefício associado a cada projeto (BABARIT *et al.*, 2012).

Silva D. *et al.* (2013) fizeram uma estimativa da potência gerada por alguns projetos de geração de energia a partir de ondas oceânicas em diferentes pontos da costa de Portugal. A partir do levantamento do clima de onda de algumas das regiões foi possível estimar a potência gerada pelos conversores selecionados. Os sistemas avaliados foram Aquabuoy, Pelamis, Wave Dragon, Oyster e SSG. No estudo Aquabuoy e Pelamis foram designados para atuar em condições *offshore*, Wave Dragon e Oyster e SSG foram designados para operação *nearshore*, o único dispositivo analisado na condição *onshore* foi o SSG. Através das matrizes de potência de cada dispositivo e as condições oceânicas locais, foi possível estimar a potência gerada por cada sistema em diferentes localizações e assim selecionar o melhor posicionamento para cada conversor de acordo com a potência gerada.

Babarit (2015) propôs um método de quantificar o rendimento de projetos de conversão de energia por meio de ondas em termos de potência capturada por dimensão característica do dispositivo.

$$\eta = \frac{P}{J \cdot L} \quad (2.6)$$

Onde:

- P é a potência capturada pelo dispositivo (W);
- J é a potência da onda por unidade de largura da frente de onda (W/m);
- L é a dimensão característica do conversor de energia (m).

Para efeito de comparação entre conversores devem ser levados em conta a dimensão ocupada, a dimensão característica está relacionada à extensão da frente de onda que o dispositivo utiliza para geração de energia, quando maior a extensão utilizada maior será a quantidade de energia disponível para geração de energia. O diâmetro característico para corpos flutuantes é dado por:

$$L = \sqrt{4A_S/\pi} \quad (2.7)$$

Onde A_S é a área da seção de corte paralela à superfície da água, observa-se que para flutuadores cilíndricos e esféricos o diâmetro característico torna-se o próprio diâmetro da esfera ou cilindro.

2.5 Principais conclusões do capítulo

O Brasil possui um clima de ondas estável ao longo do ano e a região sul possui uma densidade de energia das ondas maior que as regiões sudeste e nordeste.

As ondas oceânicas possuem um comportamento estocástico, cujo comportamento é frequentemente descrito pelos parâmetros estatísticos altura significativa e período significativo (H_s e T_e). É possível estimar a potência gerada por um conversor através de sua matriz de potência.

Os conversores de energia das ondas podem ser agrupados em três grandes grupos: coluna de água oscilante (CAO), corpos oscilantes e galgamento. Para efeito de comparação de rendimento dos dispositivos é necessário levar em consideração a extensão ocupada por cada um. Uma forma de comparar o custo benefício entre os projetos é avaliar o material empregado em cada projeto e energia gerada, como os conversores são construídos em grande parte por aço, uma forma simples de comparar os custos é avaliar a quantidade de aço empregado na construção. Conversores *onshore* trazem maior impacto ambiental que conversores *offshore*.

3 MODELAGEM DINÂMICA E ESTUDOS DE CASO

Este capítulo tem como objetivo apresentar estudos de casos sobre modelos dinâmicos experimentais de conversores de energia das ondas oceânicas. Realizou-se a descrição da teoria linear das ondas, e também estudo do processo de projeto e aspectos da modelagem dinâmica aplicada a projetos.

3.1 Processo de projeto

Segundo Duffy *et al.* (1993), cerca de 80% do custo de um produto é determinado pelo seu projeto, embora o custo da atividade de projeto em si contribui com apenas percentual em torno de 10% do custo por produto. De acordo com Ullman (1992), aproximadamente 80% dos problemas com novos produtos podem ser atribuídos a um projeto deficiente.

Segundo Pahl e Beitz (2013), a atividade de projeto em Engenharia pode ser dividida em quatro etapas fundamentais;

- esclarecimento da tarefa, projeto informacional;
- projeto conceitual;
- projeto preliminar;
- projeto detalhado.

A primeira etapa tem como função esclarecer a tarefa a ser realizada pelo projeto, funções, propriedades requeridas, coleta e análise de informações. O projeto conceitual é uma atividade voltada para a elaboração de uma ou mais concepções para o projeto. Uma característica do projeto conceitual é o uso intensivo da linguagem gráfica de projeto por ser uma atividade voltada para a elaboração de uma concepção para um produto (*sketch*). No projeto preliminar, parte-se de uma concepção escolhida para definir leiaute, componentes, materiais e dimensões. Uma característica fundamental dessa etapa é o uso de linguagem analítica, modelagem física e matemática do sistema. Na fase de projeto detalhado, todas as partes individuais são completamente especificadas, junto com suas tolerâncias, dimensões, propriedades, desenhos detalhados, propriedades superficiais. Nessa etapa final, deve-se elaborar instruções para a produção, uso, montagem, transporte e manutenção (FERREIRA, 1997).

Projetar também envolve uma atividade de otimização. Busca-se a melhor solução possível sob as restrições de projeto e dentro das limitações de recursos materiais e de conhecimento (FERREIRA, 1997).

3.2 Aspectos da modelagem dinâmica

A tarefa de modelagem é o cerne da etapa de projeto preliminar, e como tal, tem grande impacto juntos às primeiras fases em termos de custo do produto. O êxito na tarefa de modelagem será demonstrado através da validação experimental. Pesquisas demonstram que mais de 80% dos custos de um produto de um produto estão definidos após o término do projeto preliminar (BACK *et al.*, 2008).

Segundo Back *et al.* (2008), algumas das principais vantagens na modelagem dinâmica são:

1. Redução do tempo de desenvolvimento;
2. Um melhor entendimento do comportamento do projeto antes da fabricação;
3. Testes mais completos e precisos;
4. Redução da necessidade de testes em protótipos físicos.

Há muitos projetos de energia de ondas sendo desenvolvidos atualmente, e as maneiras eficazes de reduzir os custos do projeto é prever o comportamento do sistema é utilizar simulações computacionais. Modelos computacionais tornam o projeto mais seguro e otimizado, reduzindo assim a necessidade de testes em protótipos (IONUT, 2013).

Ao investigar a variedade de problemas em engenharia e nas ciências, equações diferenciais são indispensáveis. Uma razão para isso é que modelos matemáticos e suas soluções levam a equações que relacionam as variáveis e os parâmetros no problema. Essas equações permitem, muitas vezes, fazer previsões do comportamento dinâmico de sistemas em engenharia e ciências em diversas circunstâncias. É fácil permitir a variação dos parâmetros no modelo matemático em um amplo intervalo, mas isso poderia levar muito tempo ou ser inviável em um ambiente experimental. A modelagem matemática e a experimental são criticamente importantes e têm papéis um tanto complementares nas investigações científica e tecnológica. Análises matemáticas podem sugerir direções mais promissoras para a exploração experimental (BRANNAN *et al.*, 2008).

Na engenharia, a modelagem dinâmica é uma técnica que auxilia a previsão do comportamento de sistemas, reduz os custos referentes a testes e permite um rápido desenvolvimento de novas tecnologias. A

crescente demanda por produtos mais competitivos e com maior nível tecnológico, fez da modelagem dinâmica uma ferramenta indispensável nos setores industrial e acadêmico. Com a modelagem dinâmica é possível focar nos aspectos mais importantes do sistema e extrair informações sobre o comportamento antes da fabricação, sendo assim parâmetros de projeto ótimos são escolhidos antes da concepção, dando ao equipamento melhor durabilidade e confiabilidade (SILVA, J.C, 2005).

A modelagem dinâmica possui dois paradigmas amplamente difundidos, modelagem via fluxo de sinal e multiportas. Fluxo de sinal é a mais utilizada, no entanto à medida que o sistema cresce, o número de conexões entre os blocos aumenta, aumentando assim a complexidade da representação. O método Multiportas é mais geral, podendo ser considerado um caso mais geral que a modelagem por fluxo de sinal. A modelagem via Multiporta permite que com uma única conexão, possam ser transmitidas informações em ambas as direções, o que leva a um diagrama menor comparado com o fluxo de sinal (Silva, J.C., 2005). Na Figura 3.1 mostra-se um exemplo de representação utilizando os dois paradigmas. Observa-se que a modelagem via Multiporta gera um sistema mais simples e mais ligado ao entendimento físico do sistema.

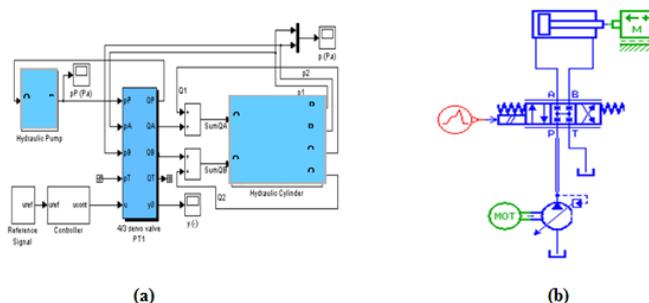


Figura 3.1: Esquema da modelagem dinâmica (a) via fluxo de sinal, (b) via multi-porta. Fonte: Silva, J.C., 2005.

Um exemplo de software que utiliza a modelagem via multiporta é o AMESIM. Na modelagem dinâmica utilizando o software AMESIM existe um ou mais modelos matemáticos para um dado componente, com suas respectivas equações matemáticas. A modelagem em AMESIM é fortemente ligada ao entendimento físico do modelo e as manipulações matemáticas são acessíveis ao usuário, devendo ser feitas considerações sobre quais modelos devem ser empregados em cada aplicação. O

software AMESIM conta com uma vasta gama de ferramentas para modelagem, dividida em bibliotecas. Com ele, é possível realizar modelagem utilizando diferentes áreas da engenharia. Algumas das vantagens da modelagem multiporta em AMESIM é a facilidade de entendimento dos modelos e a simplificação da representação (SILVA, J.C, 2005).

Alguns trabalhos recentes que utilizaram o AMESim com ambiente para modelagem foram: Mazzorana (2008), cujo tema foi “Modelagem dinâmica via fluxo de potência aplicado a reguladores de velocidade em usinas hidrelétricas”, Michelotti (2008), com o tema “Modelagem dinâmica 1-D com validação experimental: Estudo de caso no desenvolvimento do produto”; Berto (2015), com o estudo “Modelagem dinâmica de sistema automotivo: Estudo de caso via teste de performance e falhas do Baja SAE” e Flesch (2012), com o tema “Projeto De Transmissão Hidrostática Para Aerogeradores De Eixo Horizontal”.

3.3 Teoria Linear das Ondas Oceânicas

A modelagem de dinâmica de corpos flutuantes interagindo com ondas oceânicas foi primeiramente estudada com o objetivo de prever o comportamento de navios no mar. Devido à similaridade do comportamento entre embarcações e ondas e flutuadores para conversão de energia das ondas, a mesma formulação matemática pôde ser aplicada (RUEHL, 2013). Na Figura 3.2, é representado um flutuador genérico sobre efeito de uma onda oceânica. Os movimentos possíveis para o flutuador são: translação e rotação nos eixos x , y e z , totalizando seis graus de liberdade.

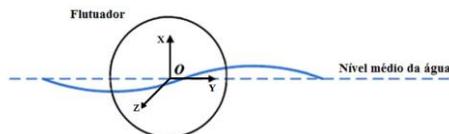


Figura 3.2: Flutuador submetido a uma onda oceânica.
Fonte: Modificado de Yang (2011).

Segundo Falnes (2002), considerando as seguintes hipóteses como válidas:

1. Águas são profundas, profundidade do mar é considerada muito maior que metade do comprimento de onda oceânica;
2. A amplitude das ondas e o movimento do flutuador são suficientemente pequenos se comparadas com o comprimento de onda, de modo que a teoria linear da hidrodinâmica pode ser aplicada;
3. O flutuador é do tipo absorção pontual, com apenas um grau de liberdade, movimento vertical em x . Esta hipótese é válida quando as dimensões do flutuador são consideravelmente menores que o comprimento de onda. Considerando que ondas em regime de águas profundas podem apresentar comprimentos da ordem de 500 m (PRESS, F. *et al.*, 2006), flutuadores com dimensões típicas de até 10 m podem ser considerados como pontuais (FALNES, 2002);
4. Fluido sem viscosidade, os efeitos da viscosidade podem ser desprezados se comparados aos efeitos inerciais e gravitacionais, ou seja, as forças inerciais e gravitacionais são maiores que as forças viscosas permitindo que as forças de origem viscosas sejam desprezadas;
5. Ondas de pequena amplitude quando comparada com o comprimento de onda;
6. Fluido incompressível, para a maioria dos casos práticos a água pode ser considerada como um fluido incompressível;
7. Tensão superficial desprezada, dada as dimensões dos corpos de analisados.

Sendo assim a resultante das forças atuando no flutuador devido à oscilação de uma onda oceânica está direcionada segundo o *eixo* x e de acordo com a segunda lei de Newton pode ser escrita como:

$$M\ddot{x}(t) = F_h(t) - F_s(t) - F_p(t) \quad (3.1)$$

Em que M é a massa do flutuador, a componente $F_s(t) = S_m x(t)$ é a força de restauração hidrostática, devido ao empuxo. O termo S_m é o coeficiente de flutuação, dado por $S_m = \rho g A$, com ρ sendo a massa específica da água, g o valor da gravidade local e A é a área de seção transversal do flutuador na interface da água em repouso, no estado de equilíbrio $x=0$, tem-se $F_s = 0$ (ANTONIO, 2007). A força F_p , é a componente da vertical devido ao sistema de conversão de energia aplicada sobre flutuador. As forças hidrodinâmicas são dadas por:

$$F_h(t) = F_e(t) - F_R(t) \quad (3.2)$$

Em que F_e é força externa de excitação devido à passagem da onda, F_R é a força de radiação, associadas as ondas geradas pelo movimento oscilatório do flutuador, na ausência de ondas incidentes. Considera-se que ondas de várias frequências são geradas e irradiadas da superfície livre, e com o passar do tempo, essas ondas se propagam afastando-se do corpo, mas continuam afetando o movimento nos instantes subsequentes. Essa componente da força possui natureza não linear. Segundo Cummins (1962), a força de radiação é dada por:

$$F_R(t) = m(\omega)\ddot{x} + \int_0^t h_r(t - \tau) \dot{x}(\tau) d\tau \quad (3.3)$$

Em que $m(\omega)$ é o coeficiente de massa adicional, e representa a inércia da massa nas proximidades do flutuador, h_r é denominado termo de memória fluída, ou função de retardo. Este termo está associado às ondas geradas pelo movimento do corpo. Segundo Yu *et al.* (1995), o termo de memória fluída pode ser determinado por:

$$h_r(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty B(\omega) \cos(\omega t) d\omega \quad (3.4)$$

O termo ω é a frequência angular da onda mecânica. Os termos hidrodinâmicos $m(\omega)$ e $B(\omega)$ são determinados numericamente ou experimentalmente.

Segundo Antonio (2007), assumindo um comportamento linear, válido quando a geometria do flutuador e a amplitude de oscilação são consideradas pequenas com relação ao comprimento de onda, tem-se:

$$F_R(t) = m(\omega)\ddot{x}(t) + B(\omega)\dot{x}(t) \quad (3.5)$$

Sendo assim a força de radiação é composta por duas componentes: uma proporcional à velocidade e a outra proporcional à aceleração. A componente proporcional à velocidade é conhecida como amortecimento potencial e está associada às ondas progressivas emanadas pelo corpo e que dissipam a energia do seu movimento. A componente proporcional à aceleração é chamada de massa adicional e está associada às ondas evanescentes formadas devido ao movimento do corpo. O corpo, quando acelerado, exerce uma força sobre o fluido que está à sua volta e,

por consequência, sofre uma reação contrária à sua aceleração. Essa força de reação é composta por uma massa de fluido acelerada sendo chamada de massa adicional. A massa adicional, quando adicionada a massa inercial, é chamada de massa virtual (CLEMENTE, 2011).

A força de excitação das ondas pode ser escrita como uma função senoidal para regimes regulares e irregulares de ondas (ANTONIO, 2007). Para ondas regulares com frequência única (onda monocromática) tem-se:

$$F_e(t) = f_e \cos(\omega t) \quad (3.6)$$

Com:

$$f_e = A \sqrt{\frac{2\rho g^3 B(\omega)}{\omega^3}} \quad (3.7)$$

Para corpos assimétricos, em que A é a amplitude da onda e f_e é a constante de força, ou amplitude de força, a segunda lei de Newton aplicada ao sistema pode ser escrita como:

$$F_e(t) - F_p(t) = (M + m(\omega))\ddot{x}(t) + B(\omega)\dot{x}(t) + S_m x(t) \quad (3.8)$$

Assumindo o comportamento linear para a componente força de radiação, o movimento resultante do flutuador é semelhante a um sistema massa mola amortecido e forçado (Figura 3.3).

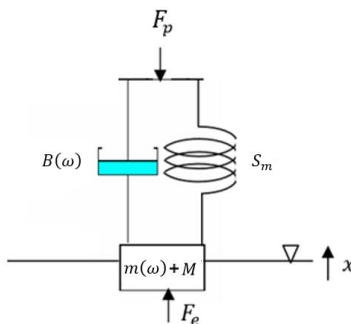


Figura 3.3: Sistema massa-mola amortecido e forçado. Fonte: Modificado de Clemente, 2011.

Ondas irregulares podem ser representadas pela soma em todo espectro de ondas, gerando assim uma onda resultante, que é a superposição de diversas ondas regulares (NEWMAN, 2010). A força de excitação resultante é dada pela superposição de n componentes monocromáticas de ondas regulares com suas respectivas velocidades angulares e amplitudes (ANTONIO, 2007):

$$F_e(t) = \sum_{i=1}^n \left[\sqrt{\frac{2\rho g^3 B(\omega_i)}{\omega^3}} \right] A_i \cos(\omega_i t) \quad (3.9)$$

3.4 Modelos e Protótipos

Nesta seção, são apresentados alguns estudos de casos de projetos de sistemas de geração de energia a partir de ondas oceânicas. A análise dos projetos apresentados serviu como base para os modelos dinâmicos propostos, esta é a principal parte da etapa de projeto preliminar cujo principal foco é a modelagem dinâmica.

Ahn (2012) propôs um conversor de energia através de ondas oceânicas do tipo corpo oscilante que utiliza uma transmissão hidrostática para geração de potência (Figura 3.4).

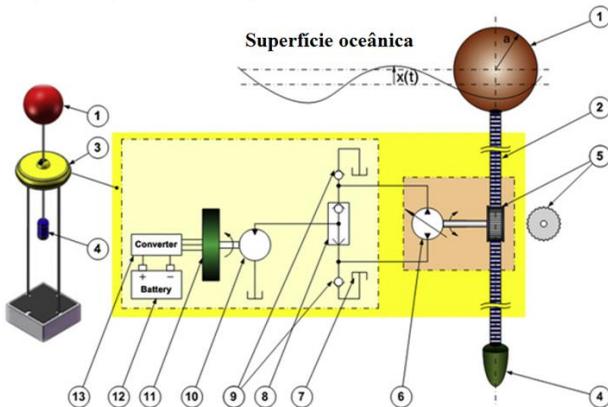


Figura 3.4: Esquema de funcionamento da transmissão hidrostática.
Fonte: Ahn, 2012.

O sistema proposto é constituído por três componentes principais: boia primária (1), boia secundária (3) e contrapeso (4). A boia secundária é ligada ao contrapeso por um sistema de correia dentada enquanto a boia primária é presa ao fundo do oceano por duas barras de metal formando uma estrutura. Dentro da estrutura da boia primária estão os sistemas de transmissão hidrostática e elétrico, constituído por uma combinação de uma bomba bidirecional de deslocamento variável (6), reservatório hidráulico (7), válvula de retenção (8), válvula de bloqueio (9), motor hidráulico unidirecional (10), gerador elétrico (11), bateria elétrica (12) e conversor (13).

A bomba hidráulica é movida pela boia secundária e pelo contrapeso; o motor hidráulico é então acionado pelo fluido gerando energia elétrica; as válvulas de retenção possuem a função de direcionar o fluido em um único sentido no motor hidráulico. Para modelagem dinâmica, utilizou-se o software AMESIM em conjunto com o MATLAB/Simulink. Foi considerado o modelo linear das ondas; nas simulações, utilizou-se uma onda monocromática com período de 4,5 s e altura significativa de 0,75 m. O sistema proposto apresentou um rendimento de 65%.

Lasa (2012) propôs um mecanismo para geração de energia a partir de ondas oceânicas, do tipo corpo oscilante com mecanismo de captura de energia rotacional com transmissão de potência por sistema hidráulico. O sistema foi proposto para adaptar-se a diversas condições oceânicas. Para isso é possível alterar o posicionamento dos atuadores hidráulicos movendo-os em uma guia vertical fixa. Assim é possível controlar o torque de entrada no sistema de acordo com as condições oceânicas (Figura 3.5). A parte central do mecanismo realiza um movimento circular oscilatório devido às ondas. Nesse sistema, o movimento vertical de oscilação do flutuador é convertido em movimento de rotação através de um sistema pinhão e cremalheira. O movimento da parte central do mecanismo aciona os atuadores, gerando assim potência hidráulica. Os valores de R e L podem ser alterados, ajustando o sistema às condições oceânicas.

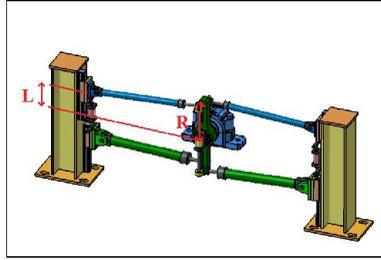


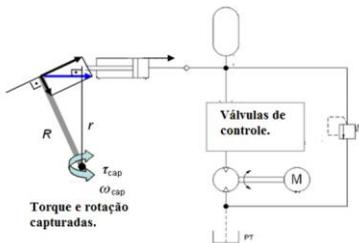
Figura 3.5: Mecanismo do sistema de conversão de energia.

Fonte: Lasa, 2012.

O sistema hidráulico é composto por quatro atuadores hidráulicos, conjunto de válvulas de retenção, válvula limitadora de pressão, acumulador hidráulico e motor hidráulico.

Com o movimento da junta rotacional, os atuadores induzem o movimento do fluido gerando potência através do motor hidráulico. Um acumulador hidráulico é utilizado para compensar flutuações de pressão; as válvulas de retenção possuem a função de direcionar o fluido hidráulico em um único sentido no motor hidráulico.

Caso a pressão na linha atinja um valor maior do que o estabelecido em projeto, a válvula reguladora de pressão atua reduzindo a pressão na linha. Foi utilizado o MATLAB/Simulink para modelagem dinâmica. O diagrama simplificado do circuito hidráulico é mostrado na Figura 3.6a. O sistema foi testado utilizando como entrada de potência um atuador hidráulico ligado a um sistema de pinhão cremalheira (Figura 3.6b).



(a)



(b)

Figura 3.6: Circuito hidráulico simplificado. Fonte: Lasa, 2012.

Os parâmetros relevantes utilizados no projeto foram:

- Foram utilizados 4 cilindros de dois tipos diferentes. O primeiro possui diâmetro de 32mm, diâmetro da haste de 16mm, curso de 420mm, já o segundo tipo, possui 50mm de diâmetro, 22 mm de diâmetro da haste e curso de 420mm;
- Motor hidráulico utilizado possui volume de deslocamento de aproximadamente 4,9 cm³/rot, um motor hidráulico pequeno possibilita a geração de energia em condições de, mas com baixa potência de onda e grande, enquanto um motor grande permitirá geração apenas em mar com elevada potência de onda;
- Acumulador de alta pressão de 50 litros de capacidade, pré-carga de 60 bar, máxima pressão de trabalho de 200bar. Acumulador de baixa pressão de 50 litros de capacidade, pré-carga de 1,5 bar, máxima pressão de trabalho de 6 bar.

Para teste do sistema foi selecionada uma frequência de 0,2 Hz e amplitude de 37mm para função de onda, simulada pelo atuador hidráulico ligado ao sistema pinhão cremalheira. Os parâmetros R e L foram ajustados em 210mm e 30mm, respectivamente. O resultado do teste do sistema mostrou que apesar da entrada de pressão nos atuadores ser flutuante é possível estabilizar pressão e rotação na entrada do motor hidráulico. O dispositivo obteve um rendimento médio de 0,728.

Yang (2011) avaliou o comportamento dinâmico de um conversor de energia a partir de ondas oceânicas levando em consideração as dimensões das tubulações, compressibilidade do fluido de trabalho e o comportamento dinâmico da válvula de retenção. Foi considerado o modelo linear de ondas; as tubulações foram consideradas como sendo rígidas e assumiu-se um comportamento laminar do fluido de trabalho e efeitos térmicos no escoamento foram desprezados. O flutuador utilizado foi esférico, de diâmetro 5 m; o sistema de transmissão de potência hidráulico consistiu de um atuador hidráulico simétrico, quatro válvulas de retenção, dois acumuladores hidráulicos e um motor hidráulico acoplado a um gerador elétrico (Figura 3.7).

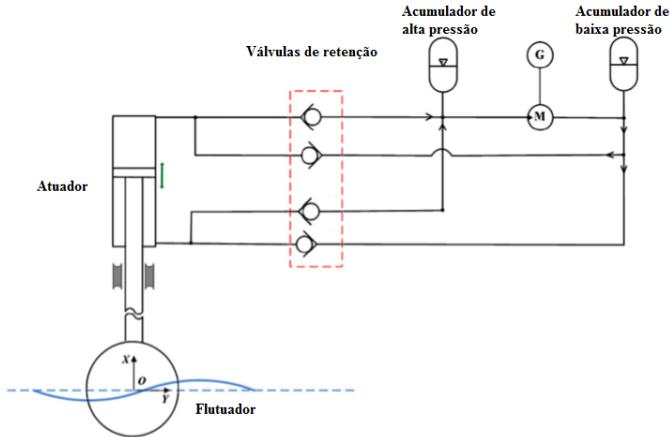


Figura 3.7: Sistema transmissão de potência hidráulico. Fonte: YANG, 2011.

Para um flutuador esférico de 5 m de diâmetro com $2,7 \cdot 10^5 \text{ kg}$ o valor da massa adicionada foi de $1,35 \cdot 10^5 \text{ kg}$. Foi considerada a altura de onda de 4,25 m e período de 9,5 s, condições *offshore*. Os parâmetros hidrodinâmicos foram obtidos utilizando o software WAMIT, e para modelagem dinâmica do sistema foi utilizado o MATLAB/Simulink.

Yang (2010) estudou o desgaste no atuador hidráulico de um sistema de conversão de potência de ondas oceânicas. O fluido hidráulico foi considerado como sendo compressível, cujo módulo de compressibilidade é cerca de $1,4 \cdot 10^9 \text{ Pa}$, para pressões menores que 450MPa e faixa de temperaturas entre -40°C e 120°C . Na câmara do atuador, além das forças de pressão, foram considerados os atritos de Coulomb, atrito viscoso e atrito de Stribeck. Utilizando a Lei de Archard foi possível prever o desgaste nas paredes do atuador hidráulico. Os resultados mostram que ocorre maior desgaste na região central do atuador hidráulico, levando em conta a compressibilidade do óleo ocorre maior desgaste do que o previsto considerando o óleo como fluido incompressível.

Um conversor de energia cinética das ondas oceânicas (CECO) do tipo corpo oscilante foi proposto por Teixeira *et al.* (2012). O dispositivo possui transmissão de potência por sistema mecânico, utilizando cremalheira e engrenagens. Os testes foram realizados em um modelo na escala 1:20, e o critério de semelhança adotado foi o de Froude. Utilizando um tanque de ondas com profundidade de 0,8 m. Foram realizados ensaios utilizando ondas regulares com período de 10 s e altura

significativa de 1,5 m e a potência instantânea e média obtida foi de 15kW.

Chandrasekaran e Raghavi (2015) projetaram um conversor de energia a partir de ondas oceânicas do tipo corpo oscilante com flutuador cilíndrico horizontal. O modelo foi testado em tanque na escala 1:6 (Figura 3.8). O funcionamento do sistema é baseado no movimento vertical do flutuador (1) com a passagem da onda, o movimento oscilatório vertical do flutuador move um braço de alavanca (2) pivotado no centro que, por sua vez, aciona um sistema de engrenagens unidirecional (4) responsável por converter o movimento bidirecional do eixo acoplado ao braço de alavanca em movimento unidirecional no eixo arvore principal. Movimento unidirecional de baixa rotação e alto torque é convertido em alta rotação e baixo toque utilizando um sistema de redução (3). Contrapesos (5) são utilizados no braço de alavanca para facilitar a movimentação do flutuador. Para compensar flutuações de potência no gerador elétrico (6), foi utilizado um volante de inércia (7).

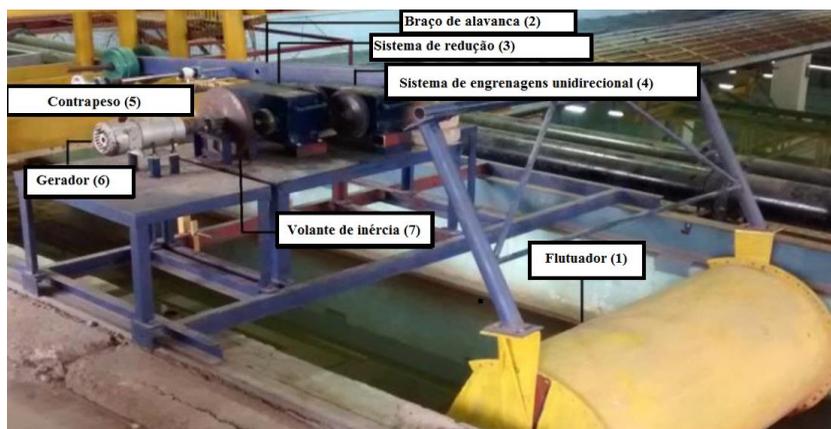


Figura 3.8: Conversor com transmissão de potência mecânica.

Fonte: Chandrasekaran e Raghavi (2015).

Os principais parâmetros utilizados no protótipo são mostrados na Tabela 3.1. O protótipo foi testado em tanque utilizando ondas regulares de 0,3 m e 3 s de período, o tamanho do braço de alavanca até a articulação foi testado em dois comprimentos, 1 e 1,7 m. O resultado mostrou que após 12 s a potência gerada pelo braço de 1,7 m é maior (Figura 3.9). O monitoramento da potência foi feito através de medições da potência no gerador elétrico. O ângulo do flutuador foi variado com objetivo de obter um ângulo ótimo para o flutuador em relação à frente de onda, os

resultados mostraram que a potência máxima é extraída quando o flutuador está inclinado 32 graus com relação a onda incidente (Figura 3.10).

Tabela 3.1: Parâmetros de projeto. Fonte: Chandrasekaran e Raghavi (2015).

Tanque de ondas	Flutuador	Braço de alavanca
Largura: 2 m	Material: Aço	Material: Aço
Comprimento: 40 m	Comprimento: 1,6 m	Comprimento: 2,7 m
Profundidade: 1 m	Diâmetro: 0,8 m	Contrapeso 45 kg
Máxima altura de onda: 30 cm	Massa: 45 kg	
Reduções	Volante de inércia	Gerador
Modulo de engrenagem: 2,5 mm	Massa: 16 kg	Potência: 0,25 kW
Relação de transmissão 1: 9	Diâmetro: 300 mm	Corrente: 8A
Relação de transmissão 2: 12	Largura 25 mm	Voltagem: 24 V

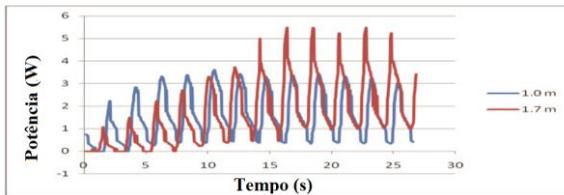


Figura 3.9: Potência instantânea. Fonte: Chandrasekaran e Raghavi (2015).



Figura 3.10: Potência variando com o ângulo do flutuador. Fonte: Chandrasekaran e Raghavi (2015).

Foster *et al.* (2011) projetaram um conversor a partir de ondas oceânicas do tipo corpo flutuante de baixo custo (menos que 2 mil dólares). O sistema pode ser utilizado para carregar bateria de veículos elétricos. O local escolhido para o projeto foi a costa de Oahu no Hawaii. O sistema possui dois flutuadores: um submerso e outro flutuante, ambos ligados entre si através de um cabo que ao se mover aciona um eixo no qual estão acoplados um volante de inércia e um gerador. O sistema é acoplado ao fundo do oceano e selado. Simulações dinâmicas foram realizadas utilizando o MATLAB.

Rosa (2010) realizou a modelagem dinâmica de um conversor a partir de ondas oceânicas desenvolvido pela COPPE/UFRJ. Foram consideradas pequenas oscilações do flutuador, sendo assim, a teoria linear pode ser aplicada. Nas simulações, foi utilizado apenas um flutuador, com geometria cilíndrica e 17000 kg de massa e 6,35 m de diâmetro. Os parâmetros hidrodinâmicos do flutuador foram obtidos utilizando o Software WAMIT, e para modelagem dinâmica foi utilizado o MATLAB/Simulink. A onda incidente foi considerada senoidal com altura de 1,4 m e período de 5 s, com uma potência de 9,4kW/m, a potência máxima que o conversor pode extrair é 59,60 kW e potência obtida pelo sistema foi de 36,8kW, com um rendimento de 61,6%.

Gao *et al.* (2016) projetaram um conversor a partir de ondas oceânicas do tipo corpo oscilante utilizando um gerador elétrico linear para transmissão de potência. O comportamento do projeto foi investigado através da modelagem dinâmica do sistema. Foi considerado o modelo de ondas linear. Para estudo das propriedades eletromagnéticas do gerador, foi utilizado o método de elementos finitos com software Ansoft Maxwell. A máxima rendimento obtida nas simulações foi de 57%, em condição de ressonância.

Para transmissão de potência em conversores do tipo corpo oscilante, a tecnologia mais promissora é a hidráulica, pois pode adaptar-se a diversas condições de potência e frequência; pode ser utilizada de forma eficiente para controle de fase e proporciona um alto rendimento global para o conversor, com valores entre 71 a 76% (GASPAR, 2016). Vários conversores de energia a partir de ondas oceânicas que atingiram maturidade tecnológica utilizam transmissão de potência via sistema hidráulico (SO *et al.*, 2015).

3.5 Principais conclusões do capítulo

A metodologia de projeto proposta por Pahl e Beitz (2013) fornece um direcionamento para o processo de projeto. A modelagem dinâmica em projetos auxilia na redução dos custos e reduz a necessidade de testes em protótipos. A teoria linear das ondas fornece um modelo para a descrição do movimento oscilatório de um flutuador submetido a ondas oceânicas.

Observou-se que a principal classe de conversores pesquisada pelas comunidades científicas atualmente é a de corpos oscilantes por serem mais recentes. A tecnologia CAO é a mais antiga com um grande número de projetos bem-sucedidos já construídos. Observa-se que os

projetos do tipo corpos oscilantes possuem valores de rendimentos maiores do que a classe CAO. A tecnologia do tipo galgamento, por ser recente, possui menor quantidade de pesquisas do que corpos oscilantes (Babarit, 2015).

4 ESTUDO DE CONVERSORES

Neste capítulo, descreve-se os principais materiais e métodos utilizados na etapa avaliação de conversores. O trabalho está organizado em três etapas: caracterização do clima de ondas de Santa Catarina, metodologia para avaliação de conversores e resultados da avaliação de conversores. Cada etapa possui métodos específicos.

Na etapa de caracterização do clima de onda, busca-se levantar as condições oceânicas para o estado de Santa Catarina. Os dados do clima oceânico são utilizados para estimativa da energia e rendimento dos conversores selecionados. Florianópolis foi o local selecionado para avaliação dos conversores. Os conversores são comparados utilizando-se o método da matriz de *Pugh* aplicada a projetos.

4.1 Caracterização do clima de ondas de Santa Catarina

O principal foco desta etapa é explicitar as condições oceânicas utilizadas na avaliação dos conversores selecionados. Os dados oceânicos também serão utilizados posteriormente para análise da modelagem dinâmica.

Para a realização do estudo comparativo entre os conversores de energia das ondas, fez-se necessário caracterizar o clima de ondas. Os dados foram utilizados para estimativa da energia e rendimento que cada conversor apresentaria em um ano de operação se instalados em Florianópolis.

A localização adequada para a instalação de uma usina de geração de energia a partir de ondas oceânicas deve considerar aspectos como: rotas de transporte, proximidades com subestações elétricas, profundidade local e potência das ondas do ponto selecionado. Os pontos escolhidos para estimativa da potência gerada por dispositivos de conversão de energia a partir de ondas oceânicas foram selecionados em Florianópolis, SC devido à proximidade com a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), à proximidade com a Eletrobrás e os portos de São Francisco do Sul, Itajaí e Imbituba. Florianópolis é um local estratégico para um possível parque de energia de ondas, pois se localiza próximo a três portos, o que facilitará operações de transporte e próximo à subestação da Eletrobrás. Outro fator importante é o fato de a região Sul possuir maior densidade de energia das ondas do que o restante do país.

A definição de um local exato para um possível parque de energia das ondas foge do escopo deste trabalho.

Para caracterização do recurso das ondas em Santa Catarina utilizou-se os resultados do estudo de Contestabile *et al.* (2015).

Contestabile *et al.* (2015) realizaram um estudo sobre o potencial energético das ondas ao longo do litoral de Santa Catarina. Em sua pesquisa, as informações do clima de ondas foram obtidas de previsões meteorológicas ao longo de 10 anos. Os dados foram coletados do Centro de Previsões Meteorológicas de Médio Alcance Europeu (ECMWF, 2015). Para caracterização em águas profundas foram estudados 19 pontos distribuídos ao longo da costa catarinense (Figura 4.1).

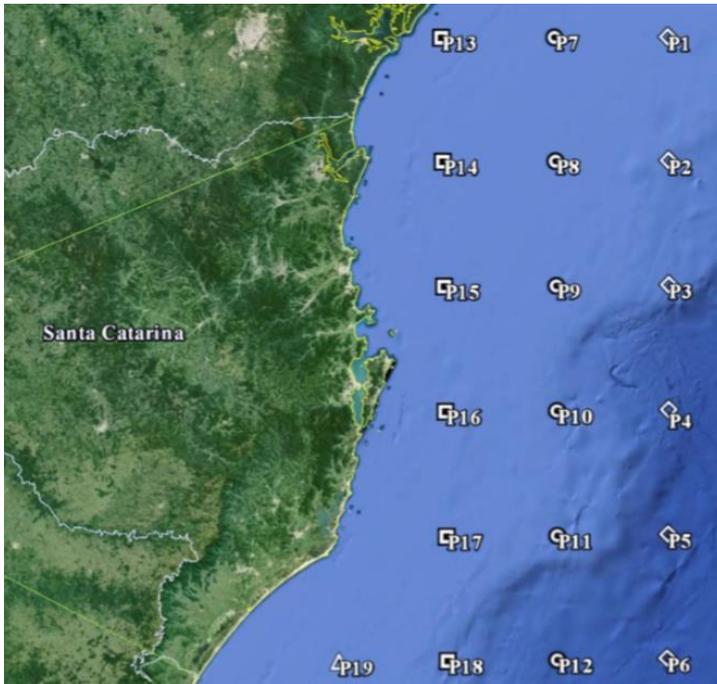


Figura 4.1: Pontos *offshore* selecionados para caracterização do clima de ondas do litoral de Santa Catarina. Fonte: Contestabile *et al.*, 2015.

Na Tabela 4.1, são mostrados a distância da costa, a profundidade, a latitude, a longitude, a altura significativa (H_s) e o período significativo (T_e). Os cálculos de alturas e períodos significativos foram feitos com base na média ao longo de 10 anos. A média anual de potência para todos os pontos foi de 15,2 kW/m e o desvio padrão obtido foi de 3,9kW.

Tabela 4.1: Dados oceânicos dos pontos *offshore*.Fonte: Modificado de Contestabile *et al.*, 2015.

Ponto	Distância da Costa (Km)	Profundidade (m)	Latitude	Longitude	Hs (m)	Te (s)
P1	133	104	25°30'0.00"S	46°30'0.00"O	1,64	9,39
P2	188	236	26°15'0.00"S	46°30'0.00"1	1,76	9,43
P3	210	445	27°0'0.00"S	46°30'0.00"2	185	9,4
P4	187	1646	27°45'0.00"S	46°30'0.00"3	1,94	9,39
P5	214	2024	28°30'0.00"S	46°30'0.00"4	2,02	9,37
P6	235	2306	29°15'0.00"S	46°30'0.00"5	2,09	9,35
P7	76	55	25°30'0.00"S	47°15'0.00"O	1,41	9,06
P8	126	101	26°15'0.00"S	47°15'0.00"O	1,57	9,16
P9	118	144	27°0'0.00"S	47°15'0.00"O	1,68	9,19
P10	114	270	27°45'0.00"S	47°15'0.00"O	1,82	9,25
P11	136	301	28°30'0.00"S	47°15'0.00"O	1,94	9,26
P12	165	1553	29°15'0.00"S	47°15'0.00"O	2,04	9,25
P13	21	20	25°30'0.00"S	47°0'0.00"O	1,38	8,91
P14	44	54	26°15'0.00"S	48°0'0.00"O	1,38	8,91
P15	49	65	27°0'0.00"S	48°0'0.00"O	1,36	8,78
P16	45	91	27°45'0.00"S	48°0'0.00"O	1,83	9,23
P17	72	125	28°30'0.00"S	48°0'0.00"O	1,96	9,16
P18	110	277	29°15'0.00"S	48°0'0.00"O	1,95	9,16
P19	64	91	29°15'0.00"S	48°45'0.00"O	1,74	9,11

A altura significativa média para todo litoral foi de 1,76 m, com 8,07 s de período e direção média de 126 ° sudeste. Aproximadamente, metade de toda energia das ondas é gerada por ondas entre 1,5 e 2,5 m e período entre 8 e 10s. As estações mais energéticas foram outono (com 17,58 kW de potência média) e inverno (18,25 kW), as menos energéticas foram primavera (13,4 kW) e verão (11,78 kW), considerando todo litoral.

O ponto escolhido para estimar a potência gerada por dispositivos *offshore* na costa de Florianópolis foi o ponto P4, localizado a 187 km da costa de Florianópolis a uma profundidade de 1646 m (batimetria). A Figura 4.2 mostra a matriz de potência para estados oceânicos referentes ao ponto P4.

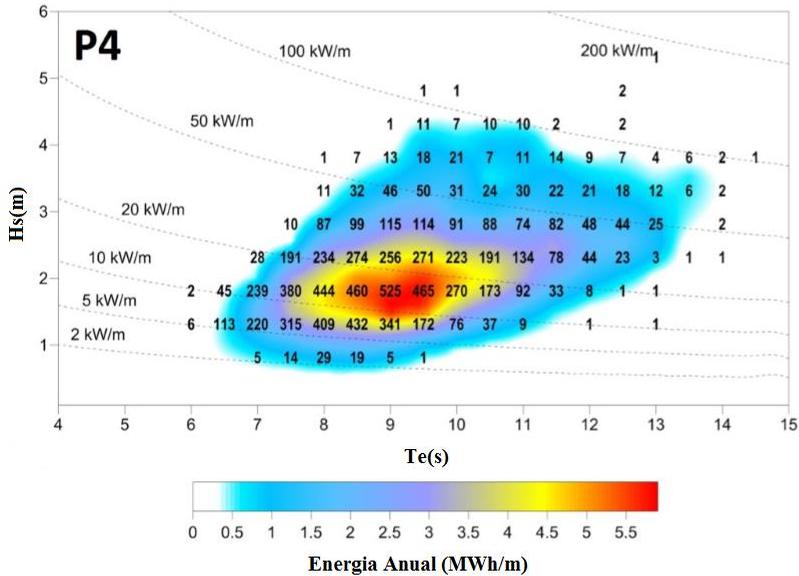


Figura 4.2: Matriz de potência oceânica para o ponto P4.

Fonte: Contestabile *et al.*, 2015.

O número em cada ponto representa a quantidade de horas decorridas em cada estado no ano. Os estados oceânicos são caracterizados pelo binário dado por altura significativa (H_s) e período significativo (T_e). As linhas de potência constante também são representadas na matriz. A região vermelha representa os estados oceânicos de maior ocorrência ao longo do ano, conseqüentemente soma uma grande quantidade de energia. Observa-se que o estado oceânico predominante é aproximadamente o ponto (9s; 1,8m), presente 525 horas no ano.

Ondas com amplitudes acima de 4m somam uma pequena parcela, totalizando apenas 48 horas no ano. Condições de oceano com altura significativa de onda acima próxima de 5m são extremamente raras.

Observa-se que o clima de ondas ao longo do Litoral de Santa Catarina é estável ao longo do ano e o principal motivo disso é atribuído à raridade de furacões e ciclones no sul do Oceano Atlântico. As maiores perturbações são originadas de frentes frias provenientes do Sul do Oceano Atlântico.

O ponto P16 localiza-se mais próximo à costa e a uma profundidade menor que o ponto P4, apesar de o ponto P16 ser mais adequado que o ponto P4 para a instalação de uma usina de energia a

partir de ondas oceânicas. Avaliou-se a energia no ponto P4, pois a matriz de potência para o ponto P16 não foi fornecida.

Para caracterização do recurso *nearshore*, foram selecionados pontos distribuídos ao longo da costa catarinense a uma profundidade de 20 m (Figura 4.3). Para estimativa da potência das ondas em águas rasas, utilizou-se o software MIKE 21 SW, e as simulações foram feitas considerando ondas propagando-se de águas profundas (100-130 m) para águas rasas (20 m) e os dados utilizados foram coletados ao longo de 10 anos.



Figura 4.3: Pontos *nearshore* selecionados para caracterização do clima de ondas no litoral de Santa Catarina. Fonte: Contestabile *et al.*, 2015.

A Tabela 4.2 mostra a potência média, a latitude e a longitude dos pontos selecionados. Observa-se que maiores potências são encontradas ao sul do estado de Santa Catarina.

Tabela 4.2: Potência média, latitude e longitude dos pontos *nearshore* selecionados. Fonte: Contestabile *et al.*, 2015

Ponto	Média de potência (kW/m)	Latitude	Longitude
S1	8,67	26°13'36.95"S	48°25'14,03"O
S2	8,83	26°25'30.06"S	48°29'17,82"O
S3	9,92	26°40'35.37"S	48°32'18.94"O
S4	10,13	26°58'29.69"S	48°32'11.17"O
S5	12,31	27°28'14.91"S	48°20'1.45"O
S6	13,25	27°43'46.89"S	48°26'50.86"O
S7	13,95	28°12'7.52"S	48°37'4.60"O
S8	14,35	28°37'21.98"S	48°47'50.5"O

Os pontos S5 e S6 foram selecionados para estimativa da potência gerada por dispositivos instalados em águas rasas. As Figuras 4.4 e 4.5 mostram as matrizes de potência para águas rasas referentes aos pontos S5 e S6, respectivamente. O ponto S5 localiza-se na direção do bairro dos Ingleses do Rio Vermelho e o ponto S6 localiza-se em frente ao bairro Campeche.

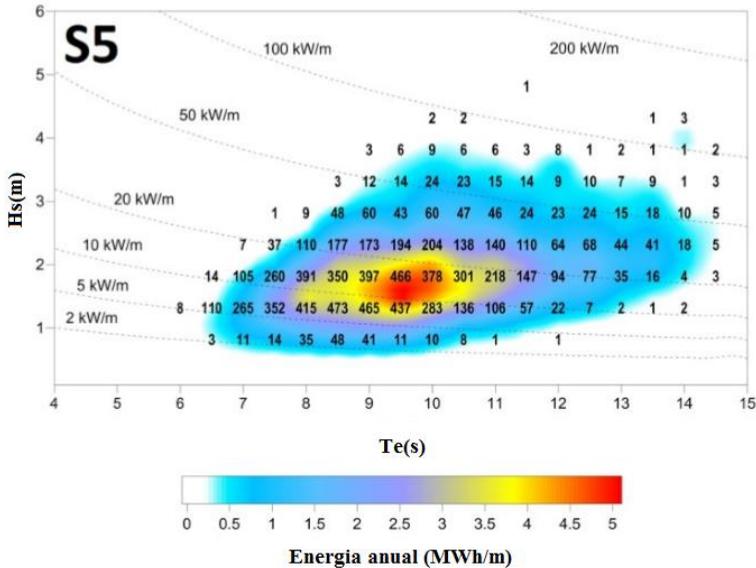


Figura 4.4: Matriz de potência para o ponto S5. Fonte: Contestabile *et al.*, 2015.

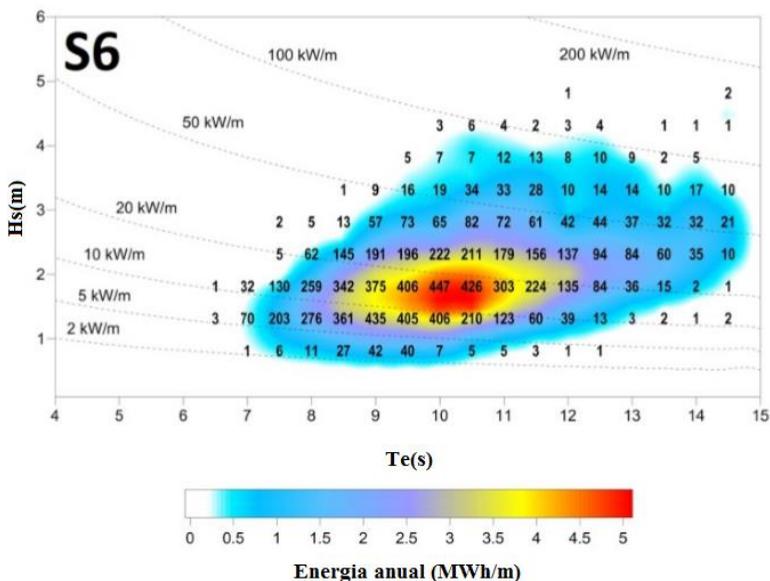


Figura 4.5: Matriz de potência para o ponto S6. Fonte: Contestabile *et al.*, 2015.

Ao aproximar-se de águas rasas a potência da onda se dissipa devido a fenômenos de reflexão, difração, dispersão e perda de energia e ao atrito com o fundo do mar. A diferença média de potência com relação às águas profundas é cerca de 4kW/m.

4.2 Metodologia para avaliação de conversores

O foco desta etapa é realizar uma avaliação dos conceitos de projetos existentes. Busca-se ponderações entre um projeto eficiente, aspectos ambientais, manutenibilidade, confiabilidade e economia de material. Os requisitos estabelecidos são utilizados como base para avaliação dos conversores. O principal recurso utilizado para esta etapa foi a pesquisa bibliográfica. São estimados a potência e o rendimento dos conversores com base no clima de ondas para Florianópolis.

Buscou-se analisar quais projetos de geração de energia a partir de ondas oceânicas são mais adequados para utilização na costa de Florianópolis. Os quinze conversores escolhidos para avaliação de desempenho foram: Aquabuoy, Arquimedes Wave Swing (AWS), CAO, CETO, Langlee, Oceantec, OE Buoy, Oyster, Pelamis P750, Pontoon , Seabased , SSG, Wave Dragon, Wavebob e Wavestar. Os projetos foram selecionados em função da maturidade da tecnologia que atingiram.

Buscou-se também avaliar diferentes concepções de projeto de geração de energia a partir de ondas oceânicas, classificados como CAO, Corpos Oscilantes ou Galgamento.

Detalhes sobre os conversores selecionados podem ser encontrados no capítulo 2 e no anexo A. A estimativa da energia gerada por projeto em um ano de operação foi feita com base no clima de ondas do litoral de Florianópolis, utilizando-se as matrizes mostradas nas Figuras 4.2, 4.4 e 4.5. Os projetos foram separados em *onshore*, *nearshore* e *offshore*.

Combinando os dados do clima oceânico com as matrizes de potência dos conversores, foi possível estimar a energia gerada em cada projeto ao longo de um ano de operação (Figura 4.6). No exemplo, lê-se na matriz de potência oceânica a quantidade de horas que um estado permaneceu no ano, na matriz de potência do conversor lê-se a quantidade de potência (em kW) que o dispositivo geraria se fosse submetido ao estado oceânico, por fim multiplica-se a quantidade de potência pelo valor em horas que o estado permaneceu, fornecendo assim a quantidade de energia gerada em kWh para o estado oceânico.

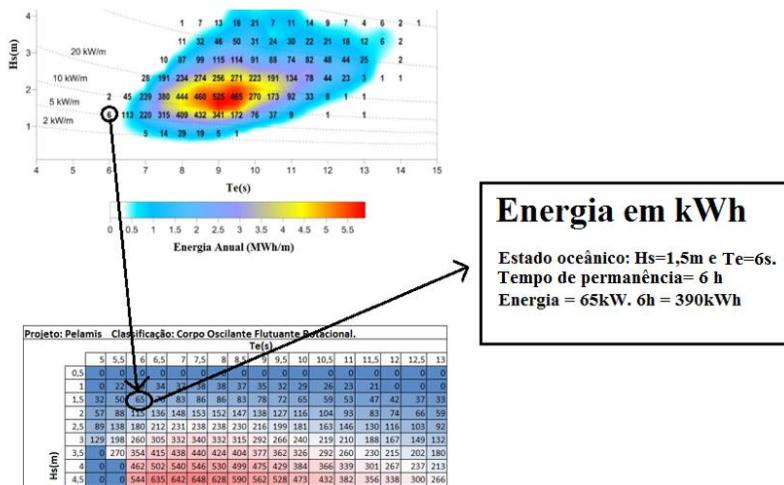


Figura 4.6: Matrizes de potência combinadas para estimativa da energia gerada.

As matrizes de potência dos conversores selecionados são mostradas no Anexo B. Cada conversor possui sua matriz de potência, em que se tem como dados de entrada: altura significativa (H_s) e período significativo (T_e), provenientes da matriz de potência oceânica, para estimar a potência (em kW) gerada por um conversor para um dado estado

oceânico. Um estado oceânico é caracterizado pelos parâmetros estatísticos altura significativa e período significativo. Alguns conversores fornecem a potência em termos de altura significativa e período de pico (T_p). Neste caso, é necessário utilizar a relação entre período significativo e de pico conforme equação 2.4. Para estimar a quantidade de energia (E) gerada pelo conversor soma-se a quantidade de energia gerada em todos os estados oceânicos ao longo do ano:

$$E = \sum_{i=1}^n P_i t_i \quad (4.1)$$

Em que:

- P_i - potência gerada pelo conversor em um dado estado oceânico;
- t_i - quantidade de horas que um dado estado oceânico permaneceu no ano;
- n quantidade de estados oceânicos distintos ao longo do ano.

A soma da quantidade de energia gerada por cada estado oceânico ao longo do ano fornece uma estimativa do aproveitamento energético de um dado conversor, conversores distintos operando em um mesmo local possuirão rendimentos diferentes.

Utilizou-se o Microsoft Excel versão 2014 para estimar a energia gerada por conversor. Alguns estados oceânicos não se encontravam nas matrizes de potência e, neste caso, utilizou-se interpolação polinomial para encontrar o valor de potência. Este método foi sugerido por Babarit (2015). O polinômio utilizado na interpolação polinomial foi de primeiro grau.

Os projetos foram classificados de acordo com a zona de atuação, divididos em três grupos: *nearshore*, *onshore* e *offshore* (Tabela 4.3). Para os conversores *onshore* e *nearshore*, utilizaram-se os dados das matrizes de potência oceânicas referentes aos pontos S5 e S6, para os conversores *offshore*, utilizou-se os dados referentes ao ponto P4. Os dados utilizados encontram-se nas fontes onde foram retiradas as matrizes de potência dos conversores, expostas no Anexo B.

Tabela 4.3: Classificação com relação à profundidade de atuação.

Onshore	Nearshore	Offshore
CAO	OE Buoy	Aquabuoy
SSG	CETO	AWS
	Oyster	Langlee
	Wave Star	Oceantec
		Pelamis P 750
		Pontoon
		Seabased
		Wave Dragon
		Wave Bob
		Wavestar

Após a avaliação da quantidade de energia gerada por cada dispositivo, avaliou-se o rendimento dos dispositivos selecionados utilizando a equação 2.6.

Os projetos selecionados foram classificados em coluna de água oscilante (CAO), corpo oscilante e galgamento, de acordo com Antonio (2010). A classificação dos conversores selecionados é mostrada na Tabela 4.4. Neste estudo foram avaliados dois dispositivos do tipo CAO, onze dispositivos do tipo corpo oscilante e dois dispositivos classificados como sendo pertencentes à classe galgamento. Observou-se que atualmente uma maior quantidade de pesquisas é destinada a classe corpos oscilantes.

Tabela 4.4: Classificação dos conversores selecionados.

Coluna de Água Oscilante	Corpo Oscilante	Galgamento
CAO	Aquabuoy	Wave Dragon
OE Buoy	AWS	SSG
	CETO	
	Langlee	
	Oceantec	
	Oyster	
	Pelamis P750	
	Pontoon	
	Seabased	
	Wavebob	
	Wavestar	

As dimensões características utilizadas para estimativa de rendimento são mostradas na Tabela 4.5. Mostra-se também, a classificação da dimensão característica e a fonte da qual foram retirados os dados dos conversores.

Tabela 4.5: Dimensão característica dos conversores selecionados.

Dispositivo	Dimensão característica (m)	Classificação	Fonte
Aquabuoy	6	Diâmetro	Weinstein <i>et al.</i> (2004)
CAO	4	Largura	Veigas <i>et al.</i> (2015)
CETO	7	Diâmetro	Babarit <i>et al.</i> (2012)
Langlee	25	Largura	Babarit <i>et al.</i> (2012)
Oceantec	10,4	Diâmetro característico	Salcedo <i>et al.</i> (2009)
OE Buoy	24	Largura	Babarit <i>et al.</i> (2012)
Oyster	26	Largura	Babarit <i>et al.</i> (2012)
Pelamis P750	23,12	Diâmetro característico	Dalton <i>et al.</i> (2010)
Pontoon	132	Largura	Babarit <i>et al.</i> (2012)
Seabased	3	Diâmetro	Babarit <i>et al.</i> (2012)
Wave Dragon	260	Largura	Kofoed <i>et al.</i> (2006)
Wavebob	20	Diâmetro	Babarit <i>et al.</i> (2012)
Wavestar	5	Diâmetro	Babarit <i>et al.</i> (2012)

Para os conversores Oceantec e Pelamis, cujo corpo flutuante não é simétrico, foi necessário utilizar a equação 2.7. Para o cálculo do rendimento do projeto Wavestar foram considerados vinte flutuadores, conforme utilizado no cálculo da matriz de potência do projeto. Os flutuadores foram dispostos em duas filas com dez em cada, totalizando um comprimento de cerca de 50 m.

A quantidade de aço utilizada em cada conversor selecionado é mostrada na Tabela 4.6 e, na coluna à direita, é apresentada a fonte dos dados. Recomenda-se priorizar conversores mais leves que utilizam menor quantidade de material, por facilitarem operações de transporte, montagem e manutenção, além de possuírem menores gastos com em material.

Tabela 4.6: Massa dos conversores selecionados.

Dispositivo	Massa (toneladas)	Fonte
Aquabuoy	71	Weinstein <i>et al.</i> (2004)
CAO	Não encontrado	
CETO	200	Babarit <i>et al.</i> (2012)
Langlee	1622	Babarit <i>et al.</i> (2012)
Oceantec	74	Salcedo <i>et al.</i> (2009)
OE Buoy	1800	Babarit <i>et al.</i> (2012)
Oyster	2020	Babarit <i>et al.</i> (2012)
Pelamis P750	700	Dalton <i>et al.</i> (2010)
Pontoon	5233	Babarit <i>et al.</i> (2012)
Seabased	31	Babarit <i>et al.</i> (2012)
Wave Dragon	22000	Kofoed <i>et al.</i> (2006)
Wavebob	5704	Babarit <i>et al.</i> (2012)
Wavestar	1600	Babarit <i>et al.</i> (2012)

Para tomada de decisão utilizou-se a matriz de *Pugh* de acordo com os critérios estabelecidos para avaliação e seleção. Após avaliação, o conceito de projeto selecionado seguiu para a etapa de Modelagem dinâmica.

4.3 Resultados e discussão da avaliação de conversores

Foi estimada a potência gerada ao longo de um ano de operação dos conversores na costa de Florianópolis para as condições *onshore*, *nearshore* e *offshore*. Os cálculos foram baseados nas matrizes de potência dos dispositivos e nas condições oceânicas dos pontos selecionados.

Tratando-se de conversores de energia a partir de ondas oceânicas, não existe uma única concepção de projeto que atenda todos os climas oceânicos do globo. Como o clima de onda difere em cada localidade e os projetos são dimensionados com base nas características do oceano, existem projetos mais indicados para cada local no planeta. Portanto não se espera que os projetos de energia das ondas converjam em uma única concepção. Sendo assim, um passo importante é analisar a quantidade de energia gerada por conversores existentes, com isso pode-se decidir quais concepções são mais adequadas para uma dada localização.

A energia gerada pelos conversores *offshore* foi estimada com base no clima de ondas mostrado na Figura 4.2. Os resultados da energia gerada em GWh em um ano de operação são mostrados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Energia gerada pelos conversores *offshore* (GWh).

Conversor	Energia (GWh)
Aquabuoy	0,39
AWS	2,13
Langlee	0,76
Oceantec	0,98
Pelamis P750	1,14
Pontoon	2,30
Seabased	0,02
Wave Dragon	17,78
Wavebob	1,29
Wavestar	2,06

Dos conversores *offshore*, o maior montante de energia foi obtido pelo conversor Wavedragon, somando 17,78 GWh em um ano de operação. Em contraste, o menor montante de energia foi obtido pelo projeto Seabased com 0,02 GWh no ano. O conversor Pelamis P750, primeiro conversor *offshore* a ser conectado à rede elétrica no mundo, gerou 1,14 GWh. Como esperado, o conversor não é adequado para ser utilizado no Brasil, pois foi projetado para atuar em um clima de ondas português, que é consideravelmente mais intenso, em termos de energia, que o nacional, como mostrado na Figura 2.2. O projeto Pelamis P750 se instalado no Brasil ficaria, portanto, subutilizado, concordando com o trabalho de Fleming (2012).

No trabalho de O'Connor *et al.* (2013), foram comparados os projetos Pelamis P750 e Wavestar. Os autores observaram que o projeto Wavestar é mais adequado para clima de ondas menos intenso que o mar português, o que foi confirmado para o caso brasileiro, se instalado em Florianópolis. Estima-se que o projeto Wavestar geraria 0,92 GWh a mais que o projeto Pelamis P750 em um ano de operação. Esse resultado também pôde ser verificado por inspeção nas matrizes energéticas dos conversores. Observa-se que o conversor Pelamis P750 trabalha com total capacidade de potência em climas de ondas com altura significativa acima de 4 m, em alturas significativas abaixo de 2 m e que maiores valores de potência são oferecidos pelo conversor Wavestar.

As estimativas para os conversores em condições *nearshore* (20 m de profundidade) foram feitas com base em duas localizações na costa de Florianópolis, o ponto localizado na direção do bairro dos Ingleses do Rio Vermelho, o ponto S5 e o ponto S6, localizado em frente ao bairro Campeche (Figura 4.3). Os quatro conversores utilizados em condições *nearshore* foram OE buoy, CETO, Oyster e Wavestar. Os resultados são mostrados nas Tabelas 4.8 e 4.9.

Tabela 4.8: Energia gerada pelos conversores *nearshore* em S5.

Conversor	Energia (GWh)
CETO	0,12
OE Buoy	1,54
Oyster	2,91
Wavestar	1,66

Tabela 4.9: Energia gerada pelos conversores *nearshore* em S6.

Conversor	Energia (GWh)
CETO	0,11
OE Buoy	1,59
Oyster	3,07
Wavestar	1,76

Observa-se que uma maior potência nos dois pontos considerados foi obtida pelo conversor Oyster, seguido por Wavestar, OE buoy e CETO apresentaram menor rendimento entre os dispositivos considerados. Observou-se que a maioria dos conversores instalados em S6 apresentou um maior rendimento, com exceção de CETO. Esse resultado era esperado, pois o sul de Florianópolis apresenta um clima de ondas mais energético. No entanto, mesmo em condições menos energéticas, alguns conversores podem gerar um maior montante do que se fossem submetidos a condições mais energéticas. Esse fenômeno é explicado pelas dimensões do conversor serem projetadas para um clima de ondas em específico, o que pode ser observado nas matrizes de potência (Anexo B), em que cada conversor possui seu ponto de ótimo para trabalho, e em uma dada condição de altura significativa e período a potência convertida é máxima, de acordo com Souza R.A. (2011).

O conversor Wavestar foi designado para atuar em duas condições de trabalho, *offshore* e *nearshore*, segundo o fabricante uma das vantagens do projeto é a flexibilidade de posição que o conversor oferece.

Por fim estimou-se as energias geradas pelos dispositivos *onshore* utilizando-se os pontos S5 e S6. Os resultados são mostrados nas Tabelas 4.10 e 4.11.

Tabela 4.10: Energia gerada por conversores *onshore* em S5.

Conversor	Energia (GWh)
SSG	24,11
CAO	0,42

Tabela 4.11: Energia gerada por conversores *onshore* em S5.

Conversor	Energia (GWh)
SSG	29,03
CAO	0,40

Observou-se que o conversor SSG gerou consideravelmente um maior montante de energia do que o dispositivo CAO, o que pode ser explicado pela maior dimensão do conversor SSG. Não foram encontrados dados confiáveis referentes à largura utilizada pelo conversor SSG, no entanto, inspecionando o valor do rendimento, que não deve superar o valor de 1, estima-se que o projeto utilizado tenha entre 150-600 m de comprimento, consideravelmente maior que o dispositivo CAO. O conversor CAO considerado possui apenas 4 m de largura conforme mostrado na Tabela 4.4. Na estimativa da quantidade de energia gerada pelos conversores SSG e CAO, foi desprezada a perda de energia que a onda sofre quando passa de condições *nearshore* para *onshore*.

Veigas *et al.* (2015) estimou a quantidade de energia gerada pelos dispositivos CAO, Pelamis P750, Wave Dragon e AWS se instalados no porto de São Cibrão, localizado no estado da Galícia na Espanha. O dispositivo CAO foi designado para atuar em condições *onshore*, os outros três dispositivos foram selecionados para atuar em águas profundas (*offshore*). A estimativa da energia foi feita com base nas matrizes de potência dos dispositivos selecionados e na matriz de potência oceânica local. Os resultados mostram que o dispositivo CAO geraria 0,218 GWh no ano, Pelamis P750 apresentou 1,373 GWh, Wave Dragon 17,906 GWh e AWS 2,296 GWh por ano. Observa-se que as estimativas de energia para os conversores instalados Florianópolis foram próximas os espanhóis. Apesar de ter um clima de ondas menos intenso, o Brasil possui um clima de ondas com pouca sazonalidade, este fato é um fator chave para o Brasil apresentar resultados comparáveis aos espanhóis.

O rendimento dos projetos de geração de energia a partir de ondas oceânicas é calculado com base na energia gerada pelos projetos e o espaço ocupado por cada projeto, conforme proposto por Babarit (2015) na equação 2.6.

Os rendimentos dos dispositivos *offshore* são apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12: Rendimentos dos conversores *offshore*.

Converor	Dimensão Característica (m)	Energia oceânica (GWh/m)	Rendimento
Aquabuoy	6	0,17	0,38
Langlee	25	0,17	0,18
Oceantec	10,4	0,17	0,55
Pelamis P750	23,12	0,17	0,29
Pontoon	132	0,17	0,1
Seabased	3	0,17	0,04
Wave Dragon	260	0,17	0,4
Wavebob	20	0,17	0,38
Wavestar	50	0,17	0,24

Observa-se que os três maiores valores de rendimentos foram obtidos pelos conversores Ocean Tec, Wave Dragon, Aquabuoy e Wavebob, com os dois últimos apresentando os mesmos valores (38%). Os dois menores valores foram obtidos pelos conversores Seabased (4%) seguido por Pontoon (10%). Wavestar apresentou rendimento de 24% e Langlee obteve 18%.

O valor do rendimento dos conversores *nearshore* foi estimado considerando os pontos S5 e S6 (Tabelas 4.13 e 4.14). Observa-se que os maiores rendimentos foram apresentados pelos conversores OE buoy e Oyster, seguido por Wavestar e CETO em ambos os pontos considerados.

Tabela 4.13: Rendimentos dos conversores *onshore* em S5.

Conversor	Dimensão característica (m)	Energia oceânica total (GWh/m)	Rendimento
CETO	7	0,14	0,12
OE Buoy	24	0,14	0,46
Oyster	45	0,14	0,46
Wave Star	50	0,14	0,24

Tabela 4.14: Rendimentos dos conversores *onshore* em S6.

Conversor	Dimensão característica (m)	Energia oceânica total (GWh/m)	Rendimento
CETO	7	0,17	0,09
OE Buoy	24	0,17	0,39
Oyster	45	0,17	0,40
Wave Star	50	0,17	0,21

Dos conversores *onshore* avaliados, não foi possível estimar o rendimento do conversor SSG, pois não foram fornecidos dados referentes à dimensão do projeto utilizado na matriz de potência. O conversor CAO, com largura de 4 m, apresentou rendimento de 75 % se instalado no Norte de Florianópolis e 59 % se instalado no Leste. Apesar de possuir maior densidade energética, o lado Leste apresenta menor rendimento, o que pode ser explicado devido ao fato de o ponto ao Leste da ilha atuar mais próximo das ótimas condições para o conversor CAO.

Silva D. *et al.* (2013) estimaram a potência dos conversores Pelamis P750, Aquabuoy, Oyster, Wave Dragon e SSG. Os locais selecionados foram Aguadora e São Pedro de Moel, em Portugal. Para a estimativa foram utilizadas as matrizes de potências dos dispositivos e a matriz oceânica local. O conversor com o maior desempenho em potência foi o Aquabuoy, seguido por Pelamis. Se instalados em condições *offshore* em Florianópolis (Ponto P4), o conversor Aquabuoy apresentaria

rendimento superior ao conversor Pelamis P750, mas geraria uma quantidade menor energia.

Diaconu *et al.* (2013) estimaram a potência gerada pelos conversores Aquabouy, AWS Langlee, Oceantec, OE buoy, Pelamis P750, Pontoon, Seabased, Wave Dragon e Wavebob, submetidos a condições *offshore*. O local selecionado para avaliação foi a plataforma de Gloria na costa ocidental do Mar Negro. Os resultados mostraram um maior valor de rendimento para o conversor Oceantec com 19,2% (55% se instalado em Florianópolis), seguido por Seabased com 10,52 % (4% se instalado em Florianópolis), o menor valor de rendimento foi obtido pelo conversor AWS com 2,4%.

Apesar de produzir um maior montante de energia que todos os outros conversores, Wave Dragon não foi considerado adequado para o local devido aos elevados valores de massa e área do projeto, entre os conversores analisados, Oceantec foi considerado o mais adequado para o local devido ao maior rendimento e menores valores de massa e área ocupada. Observa-se que os valores de rendimentos obtidos para todos os conversores são inferiores aos obtidos para a estimativa *offshore* em Florianópolis, o que é explicado devido ao Oceano Atlântico possuir energia das ondas que o Mar Negro.

Segundo dados do IBGE (2016), Florianópolis possuía em 2007 um total de 396.723 habitantes, em 2010, totalizava 421.240 cidadãos e 470.274 residentes em 2016. Seguindo a mesma taxa de crescimento estima-se que, em 2030, a população seja de 584.686 pessoas.

Utilizando os dados do Atlas de Energia Elétrica do Brasil (2016), o consumo médio *per capita* de energia elétrica do brasileiro é em média 8,7 MWh no ano. Supondo que o consumo médio de energia elétrica *per capita* anual de Florianópolis seja o mesmo da média nacional, a demanda energética doméstica extra prevista para Florianópolis seria de 995,4 GWh no ano. Na Tabela 4.15, apresenta-se uma estimativa da quantidade de conversores que devem ser utilizados e as dimensões ocupadas por projeto. A extensão em linha reta do litoral de Florianópolis é cerca de 50 km (Google Maps, 2016). Observa-se que a maioria dos conversores precisaria de considerável extensão do litoral para atender a demanda futura. A menor extensão seria a ocupada pelo projeto Pelamis P750, com uma usina de geração de energia a partir de ondas oceânicas de 3 km de extensão, possuindo 873 unidades do projeto.

Tabela 4.15: Extensão e quantidade de conversores para atender a demanda extra de energia elétrica para Florianópolis até 2030.

Conversor offshore	Quantidade	Extensão (km)
Aquabuoy	2552	15
Langlee	1310	327
Oceantec	1016	8
Pelamis P750	873	3
Pontoon	433	57
Seabased	49770	149
Wave Dragon	56	15
Wavebob	772	15
Wavestar	483	24
Conversor nearshore	Quantidade	Extensão (km)
CETO	8904	62
OE Buoy	625	15
Oyster	324	8
Wavestar	566	28

Estima-se que o aumento no consumo total de energia no Brasil de 2016 até 2024 seja de 189.101 GWh no ano (EPE, 2015), considerando que demanda extra seja suprida apenas por energia de ondas em condições *offshore*. A extensão ocupada pelos projetos seria elevada, sendo inviável o atendimento a demanda nacional extra apenas com energia das ondas. Na Tabela 4.16 são apresentadas a quantidade de conversores e a extensão ocupada para atender o consumo energético futuro.

Tabela 4.16: Extensão e quantidade de conversores para atender a demanda extra de energia elétrica no Brasil até 2024.

Conversor offshore	Quantidade	Extensão (km)
Aquabuoy	484874	2909
Langlee	248817	6220
Oceantec	192969	1447
Pelamis P750	165878	581
Pontoon	82218	10853
Seabased	945050	28365
Wave Dragon	10636	2765
Wavebob	146590	2932
Wavestar	91797	4590

Considerando que o litoral Brasileiro tenha uma extensão de cerca de 7300 km, a extensão ocupada pelos projetos seria comparada ao território nacional, inviabilizando assim o empreendimento para atender

toda a demanda extra do país. Dessa forma, a energia das ondas ainda não é viável tecnicamente para atender grandes demandas energéticas devido ao elevado espaço ocupado e à grande quantidade de projetos utilizados.

Para comparação entre os projetos selecionados foi utilizado o método da matriz de *Pugh*, de acordo com os critérios:

1. Ambiental;
2. Manutenibilidade e confiabilidade;
3. Quantidade material utilizado no projeto (massa);
4. Possibilidade de compartilhamento da estrutura;
5. Rendimento.

Deve-se observar que, para obtenção de melhores resultados utilizando-se a técnica da matriz de *Pugh*, deve-se dispor de uma maior quantidade de especialistas de uma equipe multidisciplinar. O uso da técnica teve como justificativa uma organização do estudo comparativo entre os projetos selecionados, de uma forma lógica e coerente, servindo como base para futuras avaliações mais detalhadas.

No critério ambiental, avaliaram-se ruídos, prejuízos à costa e a poluição visual. A Constituição Federal de 1988 exige uma série de estudos de impacto ambiental de qualquer atividade que possa vir a causar qualquer degradação ao meio ambiente. Qualquer tipo de usina geradora de energia se enquadra dentro desse grupo e está condicionada a esse tipo de estudo. De forma complementar, a Lei 9.605 de 1998 estabelece as sanções criminais aplicáveis às atividades lesivas ao meio ambiente. A Lei 7.661, de 1988, institui o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro regulamentando e garantindo o uso adequado das zonas costeiras. Os órgãos Federais responsáveis por se fazer cumprir a legislação vigente são: CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), o MMA (Ministério de Meio Ambiente) e o IBAMA (Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis).

No atributo manutenibilidade, avaliou-se a resistência bi-incrustação nos projetos, apesar da existência de tintas anti-incrustantes, cujo tempo de atuação é limitado em cerca de 3-7 anos, podendo ainda causar prejuízos à biota marinha local (MARTINS; VARGAS, 2013).

No critério confiabilidade, avaliou-se a resistência a condições oceânicas extremas e a utilização de redundâncias de projetos. O uso de redundâncias de projeto proporciona uma continuidade na operação e facilita operações de manutenção sem interrupção no fornecimento de energia.

O critério massa foi utilizado como uma estimativa da quantidade de matéria prima utilizada nos projetos. Quanto maior a quantidade de material empregado no projeto, maiores serão os custos relacionados ao transporte, fabricação, e montagem, este critério para avaliação está de acordo com Dalton *et al.* (2010), Babarit *et al.* (2012) e Diaconu *et al.* (2013).

O critério compartilhamento da estrutura refere-se à possibilidade de em um mesmo local utilizar módulos combinados com energia das ondas, solar e eólica, para assim diluir os custos referentes ao projeto de energia das ondas, de acordo com Silva, J.S. (2012).

Parques eólicos em alto-mar têm como vantagens principais: ventos com maior intensidade e menor turbulência, menor disponibilidade de espaço, menores riscos à população, ruídos produzidos ficam longe de áreas urbanas e torres de menor porte devido à baixa rugosidade local, de acordo com Agustine (2013). A principal desvantagem é o custo relacionado à fundação marinha. No entanto, tratando-se de uma estrutura compartilhada com energia das ondas e solar, a produção de energia por metro quadrado torna-se mais elevada, ajudando a viabilizar o investimento *offshore*.

Após a avaliação da quantidade de energia gerada por cada dispositivo, avaliou-se o rendimento dos dispositivos selecionados utilizando a equação 2.6, de acordo com Babarit (2015).

Os projetos foram comparados utilizando-se o método da matriz de *Pugh* (Tabela 4.17). Foi estabelecido como referência o projeto Wavestar. Os demais projetos foram comparados ao projeto-referência utilizando-se como base os critérios estabelecidos anteriormente.

Tabela 4.17: Matriz de *Pugh* para os projetos *offshore*.

Critérios	WaveStar	Aquabuoy	AWS	Langlee	Oceantec	Pelamis P750	Pontoon	Seabased	Wavebob	Wave Dragon
(a)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(b)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(c)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(d)	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
(e)	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
(f)	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
(g)	0	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	-1	-1
(h)	0	1	0	-1	1	1	-1	1	-1	-1
(i)	0	1	0	-1	1	1	-1	-1	1	1
Total:	0	-2	-4	-6	-2	-2	-5	-3	-4	-4

Os critérios utilizados na comparação são:

- a) Ruído;
- b) Prejuízo à costa;
- c) Poluição visual;

- d) Estrutura compartilhada;
- e) Resistência a tempestades oceânicas;
- f) Resistência à bio-incrustação;
- g) Redundâncias de projeto;
- h) Massa;
- i) Rendimento.

Para os projetos *offshore*, os ruídos não causam prejuízos a população litorânea, por esse motivo os conceitos *offshore* não causam impactos referentes a ruídos. Os impactos à costa praticamente não são significativos neste tipo de projeto, podendo ainda trazer impacto positivo como introdução de biota marinha através da formação de recifes artificiais, de acordo com Pontes *et al.* (2005), Beserra (2007) e Sarmiento (2006).

Tratando-se do critério estrutura compartilhada nenhum projeto possui melhor capacidade do que o Wavestar, pois ele é o único que opera em uma plataforma, em que podem ser instalados em conjunto projetos para geração de energia eólica e solar maximizando assim a quantidade de energia gerada por metro quadrado.

No critério resistência a tempestades oceânicas, considerou-se que projetos que utilizam plataformas como fundação são mais seguros que dispositivos ancorados ao fundo do mar. O projeto Wavestar quando submetido a condições acima da estabelecida em projeto pode ser desabilitado apenas erguendo os braços mecânicos para tirá-los de operação, ficando assim, seguro contra tempestades oceânicas que poderiam danificar o sistema. Para projetos ancorados ao fundo do oceano, a estrutura de apoio é o próprio projeto não sendo possível resguardar o sistema de forma completa contra condições extremas de mar

No quesito resistência à bio-incrustação, foi considerado que os projetos submersos possuem menor desempenho. Como o conversor Wavestar fica em contato com a água apenas em seu flutuador, foi atribuída uma maior resistência à bio-incrustação, do que nos demais conversores.

Tratando-se de redundâncias de projeto, o projeto Wavestar possui um desempenho de excelência devido à possibilidade de múltiplos braços, que em operação podem auxiliar a manutenção e permitir operação contínua na geração de energia, os projetos que também possuem essa possibilidade são Pontoon e Seabased, considerados com o mesmo desempenho que o Wavestar nesse critério.

No critério massa, os projetos Pelamis P750, Aquabuoy, Oceantec e Seabased superaram o conceito de projeto Wavestar. Não foi encontrado dados da massa utilizada no projeto AWS, sendo assim, foi considerado que o quesito massa do AWS possui o mesmo desempenho que o projeto Wavestar.

No quesito rendimento, os projetos Aquabuoy, Oceantec, Pelamis, Wavebob e Wave Dragon superaram o projeto Wavestar. Não foi encontrada a dimensão do conversor AWS para o cálculo de rendimento do projeto. Novamente, considerou-se que o conversor possui o mesmo desempenho que o concorrente Wavestar.

Avaliando os resultados finais para os conceitos *offshore*, observa-se que o projeto Wavestar possuiu um desempenho geral melhor que os demais, segundo os critérios estabelecidos para comparação. Deve-se observar que, se não fosse considerado importante o critério estrutura compartilhada, os projetos Aquabuoy, Oceantec e Pelamis P750 possuiriam o mesmo resultado da avaliação que o conversor Wavestar. Os conversores possuem como vantagens maior rendimento e menor massa, no entanto, as desvantagens são menor resistência a condições oceânicas extremas, menor resistência à bioincrustação e não possuem redundâncias de projeto.

Os conceitos de projetos *nearshore* foram avaliados seguindo os mesmos critérios estabelecidos anteriormente (Tabela 4.18). Foi considerado como referência o projeto Wavestar.

Tabela 4.18: Matriz de *Pugh* para os projetos *nearshore*.

Critérios	WaveStar	OE Buoy	CETO	Oyster
(a)	0	-1	0	0
(b)	0	0	0	0
(c)	0	0	0	0
(d)	0	-1	-1	-1
(e)	0	-1	-1	-1
(f)	0	-1	-1	-1
(g)	0	-1	0	0
(h)	0	-1	1	-1
(i)	0	1	-1	1
Total	0	-5	-3	-3

No quesito ruído, o projeto OE buoy possuiu um desempenho inferior ao projeto Wavestar por utilizar uma turbina a ar. Quanto a prejuízos à costa, foram estimados todos os projetos com mesmo desempenho, pois atuavam em uma região relativamente afastada da costa, não produzindo assim efeitos nefastos à biota local.

No item estrutura compartilhada, o melhor desempenho foi obtido pelo projeto Wavestar, pois os projetos CETO e Oyster são submersos, e o projeto OE Buoy é flutuante, não sendo adequados para instalação de torres de geração de energia eólica.

Referente ao quesito resistência a tempestades oceânicas, o conversor Wavestar possui desempenho superior aos demais projetos, pois é o único que pode ficar totalmente fora de operação, se for necessário.

Tratando-se de redundâncias, os projetos CETO e Oyster possuem desempenho semelhante ao Wavestar, pois ambos preveem múltiplos corpos de ação em seus projetos.

Avaliando-se quantidade de material dos conversores, o projeto CETO possui melhor desempenho que o projeto Wavestar. OE buoy e Oyster possuem maiores valores de massa.

Comparando o rendimento, os projetos OE buoy e Oyster obtiveram desempenho superior ao conceito Wavestar.

Na avaliação total, nenhum projeto obteve mais pontos que o Wavestar, sendo o mais indicado dentre os três para operação em condições *nearshore*, segundo os critérios definidos para tomada de decisão.

Observa-se que os fatores decisivos para uma melhor avaliação do conceito Wavestar, quando comparado com outros projetos, foram os critérios estrutura compartilhada, resistência a tempestades oceânicas, resistência a bio-incrustação e redundâncias de projetos. Sendo assim, baseado nos critérios estabelecidos, dentre os projetos analisados, o conversor Wavestar é o mais indicado para posições *nearshore* e *offshore*.

Os projetos *onshore* avaliados apresentam como ponto negativo prejuízos à costa, pois qualquer forma de ocupação da costa traz desequilíbrio para biota marinha local, podendo alterar o transporte de sedimentos e comprometer de forma significativa o local da instalação. Outros pontos negativos das concepções *onshore* são o ruído gerado devido às turbinas e à poluição visual, de acordo com Martins (2009). Sendo Florianópolis uma cidade turística, não se indica esse tipo de empreendimento para o local, pois além de impactos ambientais, pode implicar conflitos de uso, prejudicando o turismo e a economia local.

Supondo que se considere atender a demanda extra de energia doméstica de Florianópolis até 2030 (995,4 GWh), utilizando o dispositivo *onshore* CAO e considerando que a potência gerada por cada dispositivo seja a mesma do ponto S5, seriam necessários 2489 conversores, ocupando uma extensão de aproximadamente 10 km. Pode-se discutir locais mais afastados de áreas urbanas e turísticas que

acarretem menores impactos ambientais e sociais possíveis, para isso são necessários maiores estudos tanto em termos de caracterização do clima de ondas quanto em aspectos ambientais. A grande vantagem dos conversores do tipo CAO é maturidade da tecnologia quando comparada aos conversores *nearshore* e *offshore*. O rendimento do conversor CAO foi consideravelmente maior que os outros projetos. Por ser um dispositivo costeiro, apresenta outras vantagens de facilidade de manutenção e baixos custos relativos à transporte de energia, resultado de acordo com Martins (2009).

O Brasil possui um clima de ondas estável e com pouca variação ao longo de sua extensão (HOMSI, 1978; CARVALHO, 2010; SOUZA, 2011; FLEMING, 2012). Pode-se inferir, que, devido à pequena variação no clima de ondas brasileiro, um conversor selecionado para atuar no litoral sul do país também será adequado para operação nos litorais sudeste e nordeste do país.

A usina binacional de Itaipu fechou os oito primeiros meses de 2016 com 69.020 GWh gerados (ITAIPU, 2016), comparando-se esse resultado com o montante que poderia ser obtido pelo conversor Wave Dragon, em um ano de operação em Florianópolis (Tabela 4.7), o conversor geraria 17,78 GWh, cerca de 0,025 % da energia obtida em Itaipu. Uma pequena central hidrelétrica (PCH) com 3MW de capacidade, gera cerca de 26,28 GWh no ano, o conversor Wave Dragon geraria cerca de 67,7 % desse montante em um ano de operação.

Os conversores de energia não possuem capacidade para atender grandes demandas energéticas, no entanto, são adequados para aplicações em ilhas, regiões isoladas e plataformas em alto-mar. Alguns dispositivos fornecem a possibilidade de compartilhamento de estrutura com outras tecnologias, possibilitando assim que uma maior quantidade de energia possa ser extraída por área ocupada. Deve-se observar que a tecnologia é emergente, e maiores valores de rendimentos poderão ser obtidos com o amadurecimento técnico dos projetos.

5 MODELAGEM DINÂMICA DE CONVERSORES DE ENERGIA A PARTIR DE ONDAS OCEÂNICAS

O conceito de conversor selecionado no capítulo anterior é aqui analisado com enfoque na modelagem dinâmica, cujo foco é um estudo comparativo entre dois sistemas do tipo corpos flutuantes. O primeiro modelo é dimensionado para utilização no mar de Florianópolis, já o segundo é baseado em um estudo de caso e teve como objetivo comparar o rendimento e potência com o primeiro sistema.

Neste capítulo, são apresentados a metodologia, os resultados das simulações e discussão.

5.1 Metodologia da Modelagem dinâmica

A plataforma utilizada para modelagem é o software AMESIM versão 2014. Os projetos selecionados são semelhantes aos conceitos Wavestar e ao conversor hiperbárico da COPPE/UFRJ, podendo ser classificados como corpos oscilantes, diferindo apenas na forma de transmissão de potência.

São selecionados dois sistemas para a modelagem dinâmica, ambos utilizando o mesmo flutuador, baseado no estudo de Clemente (2011), adaptado para operar no clima de ondas do Brasil.

Clemente (2011) modelou o comportamento hidrodinâmico de um flutuador cilíndrico sob o efeito de ondas oceânicas. O diâmetro utilizado foi de 4 m e 7,7 m de calado (altura submersa). A geometria foi concebida de forma a garantir um período de ressonância de 6 s, que é o período de onda mais recorrente nas proximidades da costa brasileira.

Foi utilizado software WAMIT para obter os valores da massa adicionada e coeficiente de amortecimento. Na simulação foi considerado o flutuador atuando em águas profundas, onda de amplitude unitária, movimento apenas vertical, fluido incompressível e efeitos viscosos desprezíveis. O valor da massa adicionada foi de 15.910,1 kg, a do flutuador foi de 99177,1 kg. O coeficiente de amortecimento foi obtido como uma função da frequência angular e densidade da água como sendo de:

$$B(\omega) = 1119. \rho. \omega \quad (5.1)$$

O flutuador modelado por Clemente (2011) foi utilizado nos dois modelos propostos, pois ambos os sistemas foram selecionados para atuar no Brasil.

Segundo Gaspar (2016), a tecnologia mais promissora para transmissão de potência em conversores do tipo corpo oscilante é a hidráulica, de acordo com So (2015), a maioria dos conversores que atingiram a maturidade tecnológica utilizam transmissão de potência via sistema hidráulico.

A modelagem dinâmica foi dividida em quatro etapas básicas:

- Desenvolvimento dos componentes do projeto (*sketch*);
- Seleção dos modelos matemáticos;
- Definição dos parâmetros de projeto;
- Simulação.

Na etapa de *sketch* são definidos com base nos estudos de casos. Os componentes presentes no conversor são construídos os modelos para interação hidrodinâmica do flutuador com a onda oceânica, sistema mecânico e hidráulico.

Na etapa da seleção dos modelos matemáticos, são selecionadas as equações que descrevem o comportamento dinâmico de cada item do sistema.

A definição dos parâmetros de projeto consiste em selecionar as dimensões de cada item utilizado no modelo. Essa etapa consistiu no dimensionamento estático de cada componente para o primeiro modelo de conversor, direcionado com base em estudos de casos. O segundo modelo de conversor foi baseado no estudo de caso de Ahn (2012) e teve como objetivo comparar o rendimento e potência gerada com o primeiro modelo.

Na etapa de simulação, é analisada a potência gerada por cada conversor de acordo com o período e altura de onda. Com base na potência gerada, é possível estimar o rendimento dos conversores utilizando a equação 2.6. Realizou-se uma análise de sensibilidade nos dois projetos. Altura de onda e frequência foram variadas com intuito de avaliar a saída de potência do sistema.

Nas simulações de ambos os modelos, todas as condições iniciais foram estabelecidas como sendo nulas, pois se deve verificar se o sistema tem condição de partir da condição estática (desligado) para o regime permanente de geração de energia.

5.1.1 Projeto CO-THL

O primeiro modelo de conversor é classificado como sendo do tipo corpo oscilante, possuindo uma transmissão hidráulica do tipo linear (nome abreviado como CO-THL).

O primeiro sistema para geração de energia a partir de ondas oceânicas proposto é composto em sua unidade por um flutuador, um braço mecânico, atuador hidráulico e sistema hidráulico para transmissão de potência (Figura 5.1).

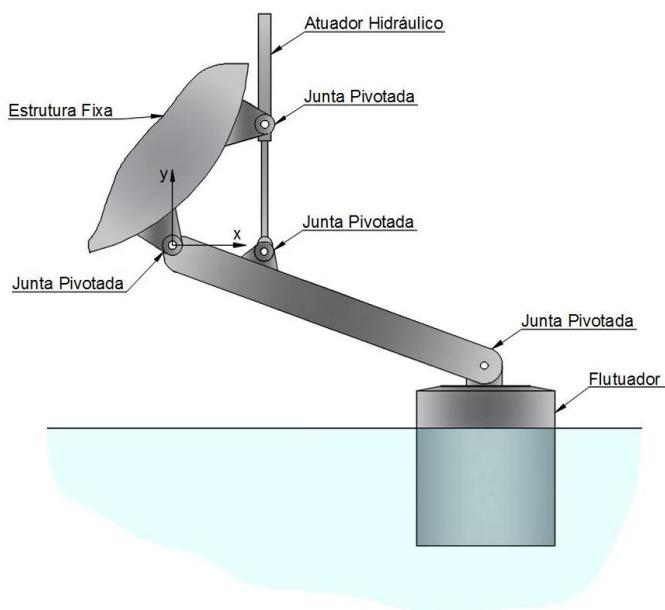


Figura 5.1: Sistema mecânico utilizado no modelo CO-THL.

O flutuador move-se verticalmente com a passagem da onda oceânica, o movimento de subida e descida do flutuador aciona o atuador hidráulico no lado oposto do braço mecânico. Com o movimento do atuador o fluido do sistema hidráulico é deslocado gerando potência útil.

O flutuador pode ser considerado um absorvedor pontual de energia, pois suas dimensões são muito menores que o comprimento da onda oceânica. Neste caso, a teoria linear das ondas é válida.

O Apêndice A fornece a lista completa dos componentes, modelos matemáticos e parâmetros utilizados no Software AMESim, para simulação dos modelos.

A primeira etapa da modelagem dinâmica consistiu em representar de forma esquemática os componentes do projeto (*sketch*). Nessa etapa, foram selecionados os componentes utilizados no sistema hidráulico e mecânico utilizados na simulação. O *sketch* do modelo é apresentado na Figura 5.2.

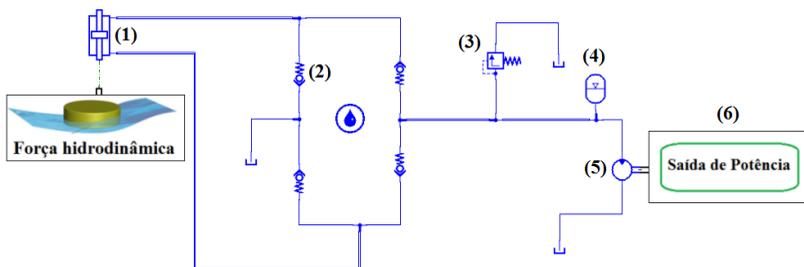


Figura 5.2: Sistema hidráulico utilizado no modelo CO-THL.

O atuador hidráulico simétrico é representado em (1), em (2) tem-se a representação da válvula de retenção, a válvula limitadora de pressão (3) é utilizada para proteção do sistema de pressões elevadas. São utilizados dois acumuladores (4) hidráulicos um para compensação de flutuações de pressão na linha, instalado antes do motor hidráulico e outro na linha de baixa pressão para possibilitar recirculação do fluido hidráulico. O motor hidráulico (5) possui a função de gerar energia quando acionado pelo movimento do fluido do sistema.

Toda potência gerada pelo sistema hidráulico é dissipada na saída de potência (6), e todo torque gerado pelo motor hidráulico é dissipado na saída. Não foi considerado, na modelagem, o gerador hidráulico, pois o foco da modelagem dinâmica foi o estudo do sistema de transmissão de potência.

O sistema hidráulico selecionado para transmissão de potência foi baseado no sistema utilizado por Antonio (2007), Yang (2011) e Beirão e Malça (2014). Nos estudos não foram fornecidos valores dos parâmetros utilizados.

O sistema mecânico do projeto consiste em um flutuador e braço mecânico. A interação hidrodinâmica da onda oceânica foi implementada em AMESIM como um componente que representa a força da onda oceânica sobre o flutuador (Figura 5.3a). A força resultante sobre o

flutuador é transmitida para o braço mecânico, que aciona o atuador hidráulico (Figura 5.3b).

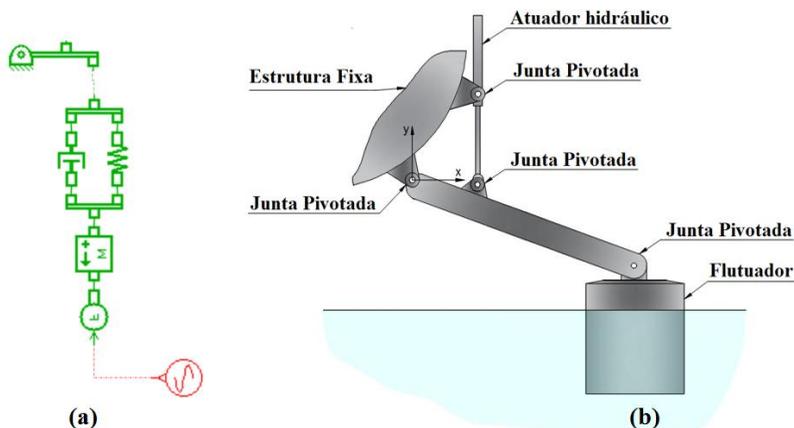


Figura 5.3: (a). Modelo em AMESIM, (b) Desenho esquemático da modelagem do flutuador e braço mecânico para o projeto CO-THL.

A segunda etapa da modelagem consistiu na escolha dos modelos matemáticos para modelagem dinâmica dos componentes do projeto. A interação hidrodinâmica seguiu a teoria linear das ondas de acordo com as equações 3.6, 3.7 e 3.8. As equações foram implementadas no AMESIM utilizando os componentes massa, mola e amortecedor sob a influência da força da gravidade e sinal senoidal (Figura 5.3a). O sinal da força foi modelado como uma onda monocromática de acordo com a equação 3.6, a amplitude da força é calculada através da equação 3.7.

A força resultante do movimento do flutuador é transmitida para o braço mecânico que amplia o valor da força na saída e reduz o valor do deslocamento vertical, as equações matemáticas que modelam o braço mecânico estão representadas nas equações 5.2, 5.3 e 5.4.

$$Y_2 = Y_1 \frac{L_2}{L_1 + L_2} \quad (5.2)$$

$$v_2 = v_1 \frac{L_2}{L_1} \quad (5.3)$$

$$F_2 = F_1 \frac{L_1}{L_2} \quad (5.4)$$

Em que:

- L_1 - Distância da rótula do flutuador até o pivô (m);
- L_2 - Distância da rótula do atuador até a junta com a estrutura fixa (m);
- Y_1 - Valor do deslocamento vertical na rótula do flutuador (m);
- Y_2 - Valor do deslocamento vertical na rótula do atuador (m);
- v_1 - Velocidade vertical na rótula do flutuador (m/s);
- v_2 - Velocidade vertical na rótula do atuador (m/s);
- F_1 - Força hidrodinâmica sobre o flutuador [N];
- F_2 - Força sobre o atuador hidráulico [N].

Na modelagem do braço mecânico, o efeito do atrito, é desconsiderado. A Figura 5.4 mostra de forma esquemática as distâncias L_1 e L_2 e as forças F_1 e F_2 , atuando sobre o braço mecânico. A componente da força F_1 é de natureza hidrodinâmica, devido à interação onda oceânica e do flutuador (equações 3.6 e 3.7).

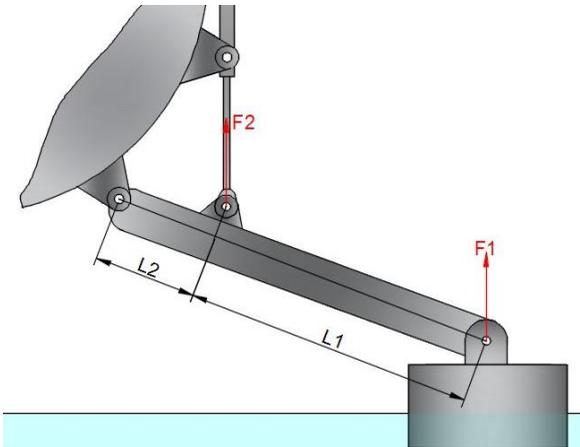


Figura 5.4: Dimensões do braço mecânico.

As equações que descrevem o comportamento dinâmico do atuador hidráulico estão apresentadas nas equações 5.5 a 5.9.

$$\sum F_y = p_{c1}A_{c1} - p_{c2}A_{c2} - F_{at} + F_2 = M_P \frac{d^2y}{dt^2} \quad (5.5)$$

$$Q_1 = A_{c1} \frac{dy}{dt} + \frac{V_1}{\beta} \frac{dp_{c1}}{dt} \quad (5.6)$$

$$Q_2 = A_{c2} \frac{dy}{dt} - \frac{V_2}{\beta} \frac{dp_{c2}}{dt} \quad (5.7)$$

$$Q_1 = Q_2 = Q \quad (5.8)$$

$$A_{c1} = A_{c2} = A \quad (5.9)$$

Em que:

- p_{c1} - Pressão na câmara 1 (Pa);
- p_{c2} - Pressão na câmara 2 (Pa);
- A_{c1} - Área da coroa do atuador na câmara 1 (m²);
- A_{c2} - Área da coroa do atuador na câmara 2 (m²);
- y - Deslocamento do atuador (m);
- A componente da força F_{at} é a soma das forças de atrito viscoso e de Coulomb no atuador (N);
- F_2 - Força externa que o braço mecânico exerce sobre a haste do atuador (N);
- M_p - Soma das massas acopladas (pistão, haste, massas externas do atuador) em kg;
- $\frac{dy}{dt}$ - Velocidade da haste do atuador (m/s);
- $\frac{d^2y}{dt^2}$ - Aceleração da haste do atuador (m/s²);
- Q_1 - Vazão da câmara 1 do atuador (m³/s);
- Q_2 - Vazão da câmara 2 do atuador (m³/s);
- β é o módulo de compressibilidade do fluido hidráulico (bar);
- V_1 e V_2 são os volumes das câmaras do acumulador (m³).

A equação (5.5) é resultante da aplicação da segunda lei de Newton no atuador. As equações 5.6 e 5.7 são resultantes da equação geral da continuidade aplicada às câmaras do atuador. Como o atuador é simétrico, as vazões e as áreas das coroas são as mesmas (Equações 5.8 e 5.9).

Na modelagem desprezou-se o efeito do fim de curso do atuador, pois o sistema foi dimensionado para não atingir o fim de curso e os vazamentos foram desprezados na modelagem matemática. Maiores

detalhes sobre a modelagem dinâmica de atuadores hidráulicos podem ser encontrados em Von Linsingen I. (2013).

A perda de carga nas tubulações não é levada em consideração na modelagem matemática, devido à baixa velocidade de movimento do atuador, e o comprimento é da tubulação da ordem de 10 m (Yang, 2011). A velocidade do atuador é em torno de 0,04 m/s para uma onda de 1 m com 6s de período e 0,045 m/s para uma onda com 4 m de altura e 10 s de período. Como a perda de carga é proporcional ao quadrado da velocidade do fluido, não é considerado a perda de carga no modelo. Maiores detalhes sobre perda de carga em tubulações hidráulicas podem ser encontrados em Von Linsingen (2013) e Fialho A.B (2004).

A equação que descreve o comportamento da válvula de retenção é representada na equação 5.10.

$$Q_v = C_d A_0 \sqrt{\frac{2(p - p_a)}{\rho}} \quad (5.10)$$

Em que:

- Q_v - Vazão volumétrica passando pela válvula, supondo que não ocorrem vazamentos, o valor deve ser o mesmo da vazão volumétrica do atuador hidráulico (m³/s);
- p - Pressão da linha hidráulica (Pa);
- p_a - Pressão de abertura da válvula (Pa);
- ρ - Densidade do fluido hidráulico (kg/m³);
- A_0 - Área de abertura da válvula (m²);
- C_d - Coeficiente de descarga da válvula (adimensional).

A equação (5.10) é resultante da equação do orifício aplicada à válvula de retenção. Para modelar o comportamento da válvula limitadora de pressão também é utilizada a equação do orifício.

A equação que modela o comportamento do acumulador hidráulico é proveniente da equação de estados para um processo politrópico (Van Wylen, G.J *et al.*, 1995). Derivando-se a equação para o processo politrópico com relação ao tempo obtém-se a equação diferencial 5.11 que modela o comportamento do acumulador a gás. A equação 5.12 é resultante da equação da continuidade aplicada ao acumulador hidráulico, Q_e e Q_s são as vazões na entrada e saída, respectivamente.

$$\frac{dp}{dt} = \left(\frac{\gamma p}{V}\right) \frac{dV}{dt} \quad (5.11)$$

$$Q_e = Q_s \quad (5.12)$$

O parâmetro γ é uma constante, e se o processo for modelado como adiabático, ela assume o valor de 1,4. Caso seja considerado um processo isotérmico, tem-se $\gamma=1$.

Devido às rápidas variações de volume no acumulador devido a pressão oscilante no sistema, o acumulador foi modelado como possuindo um comportamento adiabático. As variáveis p e V são a pressão e volume do acumulador.

Em regime permanente, a pressão interna do gás é igual à pressão do fluido, quando o acumulador está sendo carregado, a pressão do fluido é maior que a pressão do gás. Se a pressão na linha hidráulica cai, a pressão interna do acumulador passa a ser maior que a do fluido, fornecendo, assim, pressão para linha hidráulica.

A função do acumulador hidráulico é armazenar energia para compensar as flutuações de pressão na linha hidráulica, para fornecer uma pressão o mais constante possível ao motor hidráulico, possibilitando assim ao motor rotação e torque estabilizados.

Para modelagem dinâmica do motor hidráulico utilizou-se as equações 5.13 a 5.19.

$$Q_m = V_d \cdot n \quad (5.13)$$

$$T_m = \frac{\Delta p \cdot V_d}{2\pi} \quad (5.14)$$

$$\dot{W} = Q_m \cdot \Delta p \quad (5.15)$$

$$\eta_v = \frac{Q_t}{Q_e} \quad (5.16)$$

$$\eta_m = \frac{T_e}{T_t} \quad (5.17)$$

$$\eta = \eta_m \cdot \eta_v \quad (5.18)$$

$$T_m - T_c = I \cdot \alpha \quad (5.19)$$

Onde:

- V_d - Volume de líquido deslocado por rotação no motor (m^3/rot);
- n - Rotação em RPS;
- Q_m - Vazão no motor hidráulico (m^3/s);
- \dot{W} - Potência do motor hidráulico (W);
- T_m - Torque no eixo do motor hidráulico (N.m);
- T_c - Torque consumido pelo sistema dissipativo acoplado ao motor hidráulico. O torque consumido é modelado como sendo proporcional a velocidade angular;
- I - Momento de inércia do eixo do motor hidráulico (kg.m^2);
- α - Aceleração angular do eixo hidráulico (rad/s^2);
- Δp - Diferença de pressão na entrada e saída do motor hidráulico (Pa);
- η_v - Rendimento volumétrico do motor hidráulico;
- Q_t e Q_r - Vazões teórica e real, respectivamente (m^3/s);
- η_m - rendimento mecânico do motor hidráulico;
- T_t e T_e - Torques teórico e real, respectivamente (N.m).

O rendimento global é dado por η na equação 5.18 como sendo o produto dos rendimentos volumétrico e mecânico. Maiores detalhes sobre a modelagem matemática empregada em motores hidráulicos pode ser encontrados em Von Linsingen I. (2013). A equação 5.19 representa a segunda lei de Newton para torques aplicada ao eixo do motor hidráulico.

A terceira etapa da modelagem dinâmica é a definição dos parâmetros de projeto. Essa etapa correspondeu ao dimensionamento estático de cada componente do sistema com base em indicações de estudos de casos para cada parâmetro. Uma das dificuldades encontradas foi obter parâmetros de projetos utilizados nos sistemas hidráulicos e, para contornar essa dificuldade, cada parâmetro foi dimensionado ou definido com base em estudos de casos.

O primeiro parâmetro definido é o comprimento do braço mecânico, parâmetros L_1 e L_2 . Os valores utilizados são 8 m para L_1 e 1 m para L_2 , estes parâmetros são baseados no projeto Wavestar (Babarit *et al.*, 2012). Os parâmetros do sistema hidráulico não foram fornecidos, para o projeto CO-THL.

As dimensões do atuador hidráulico são calculadas com base na condição extrema de mar com 4 m de altura e 12 s de período, ao chegar nesta condição o sistema deve ser desabilitado. Utilizando as equações 3.7 e 6.4, é possível prever o valor da força na haste do atuador e, assim, calcular o diâmetro mínimo para que não ocorra flambagem. A equação utilizada para o dimensionamento da haste é ilustrada em 5.20 (Fialho A.B, 2004).

$$d_h = \sqrt[4]{\frac{64 \cdot S \cdot \varepsilon^2 \cdot F_2}{\pi^2 E}} \quad (5.20)$$

Em que;

- S - Coeficiente de segurança contra sobrecarga e fadiga definido como 3,5 segundo Fialho A.B (2004);
- F_2 - Força sobre a haste do atuador;
- ε - Comprimento livre para flambagem (m);
- E - Módulo de elasticidade do aço, utilizado como sendo de 207 MPa.

O resultado do diâmetro mínimo da haste é de 102,8 mm, para atender requisitos do dimensionamento é selecionado o atuador CDH2 MT4 do fabricante Bosch-Rexroth com dimensões superiores às mínimas calculadas. A escolha do atuador é baseada em um valor do diâmetro do êmbolo utilizado de maneira que as pressões de trabalho sejam baixas (menores que a máxima permitida pelo sistema, no caso pressão máxima no motor hidráulico), de modo a não danificar os componentes hidráulicos do sistema e assim poder operar em diversas condições oceânicas. O atuador selecionado para o modelo possui 280 mm de diâmetro do êmbolo (D_e), 200 mm de diâmetro da haste (D_h) e 616 mm de curso (BOSCH-REXROTH, 2016).

A pressão no sistema hidráulico varia consideravelmente com as condições oceânicas, ondas com baixa amplitude (0,5-1 m) levam o sistema a operar com pressões da ordem de 100 bar, já ondas de elevada amplitude elevada (acima de 3 m) fornecem elevados valores de força ao atuador hidráulico, conseqüentemente a pressão de trabalho torna-se elevada (acima de 500 bar) no motor hidráulico. O sistema deve ser dimensionado para atender o maior número possível de estados oceânicos, para assim gerar energia o maior tempo possível. Por esse

motivo optou-se por trabalhar com a maior pressão permitida dentro dos limites permitidos pelos componentes do sistema hidráulico.

A escolha do diâmetro utilizado nas tubulações hidráulicas é baseada no estudo de Yang (2011) e o diâmetro selecionado é de 50 mm. A mangueira hidráulica do modelo possui os parâmetros do fabricante Parker, possuindo 50,8 mm de diâmetro podendo trabalhar com pressões de até 700 bar (PARKER, 2016).

Segundo Lasa (2012), para o dimensionamento do motor hidráulico não se deve considerar a vazão proveniente do atuador para o estado extremo de oceano, pois, nesse caso, o motor hidráulico geraria pouca energia em condições menos energéticas, ou seja, baixa altura de onda (1-2 m). Os estados extremos não são frequentes, sendo assim um motor dimensionado para atuar nessa condição não geraria uma quantidade de energia adequada nos demais estados oceânicos, que são mais frequentes.

O motor hidráulico selecionado é baseado na vazão fornecida pelo atuador hidráulico na condição oceânica média no ponto P4 (Tabela 4.1), condição de 1,94 m de altura e 9,4 s de período. Na Figura 4.2, observa-se que esse estado oceânico é predominante ao longo do ano, com 525 horas no ano. Segundo Fialho A.B (2004), pode-se estimar a vazão do atuador hidráulico através da equação 5.21.

$$Q_P = v_m A_P \quad (5.21)$$

Em que:

- Q_P – Vazão fornecida pelo atuador hidráulico em um curso completo (m^3/s);
- v_m – Velocidade média de subida do atuador (m/s);
- A_P - Área da coroa do pistão (m^2).

A velocidade média é calculada como sendo o deslocamento do atuador dividido por metade do período, um período completo representa a subida e descida do atuador, para o deslocamento completo do atuador na subida ou descida deve ser considerado apenas metade do período (4,7s).

O curso no atuador na condição oceânica foi calculado através da equação (6.2) para uma altura $Y_1 = 1,94$ m, fornecendo o curso do pistão como sendo de $Y_2 = 0.215$ m, o que leva a uma velocidade média de 4,57 cm/s. Utilizando as características geométricas do atuador selecionado a vazão calculada foi de 395,63 l/min.

De acordo com Fialho A.B (2004), o deslocamento volumétrico do motor hidráulico pode ser calculado através da equação matemática (5.22).

$$V_d = \frac{60000 \cdot Q_P}{n \cdot \eta_v} \quad (5.22)$$

Em que:

- V_d é o deslocamento volumétrico em cm^3/rot ;
- n é a rotação (RPS);
- η_v é o rendimento volumétrico.
- Q_P – Vazão fornecida pelo atuador hidráulico em um curso completo (m^3/s);

Selecionou-se um motor hidráulico que pudesse trabalhar com pressões altas (até 400 bar) para manter um bom rendimento (mais de 80%).

A variação de pressão hidráulica com a variação das condições de ondas é elevada, em condições de 0,5 m de altura de onda com período de 6 s. Pode-se ter pressões da ordem de 20 bar, enquanto condições de onda de 5 m de altura com 12 s de período podem fazer o sistema trabalhar com pressões da ordem de 600 bar. No entanto, há uma limitação de pressão permitida pelos componentes hidráulicos. Optou-se por trabalhar com a maior pressão possível dentro das limitações técnicas dos componentes hidráulicos, de modo a gerar energia na maior quantidade possível de estados oceânicos.

A pressão de trabalho do sistema é função do tamanho do braço mecânico utilizado, das dimensões do atuador e tamanho nominal do motor hidráulico. Não faz parte do escopo deste trabalho determinar a melhor faixa de pressão para o sistema hidráulico. A pressão foi selecionada de forma a respeitar a máxima pressão possível nos componentes hidráulicos e possibilitar o funcionamento na maior quantidade de estados oceânicos.

Uma forma de reduzir a pressão no sistema seria aumentar as dimensões do atuador hidráulico, tubulações e motor hidráulico, no entanto, esse sistema não consegue atingir regime permanente.

O motor hidráulico selecionado foi do tipo pistões axiais A2FO do fabricante Bosch-Rexroth, possuindo pressão máxima de trabalho de 400 bar e pressão de pico de 450 bar (BOSCH-REXROTH, 2016), com rendimento volumétrico de 0,9 e rotação média de 3000 RPM. O volume

deslocado pelo motor hidráulico calculado foi de 147 cm³/rot. O motor hidráulico disponível pelo fabricante possui 160,4 cm³/rotação.

O dimensionamento do acumulador foi baseado no critério de utilização do acumulador como amortecedor de pulsação de atuador hidráulico.

O acumulador deve fornecer ao motor hidráulico uma pressão o mais constante possível para que possa ser atingido regime permanente na geração de energia. Foi considerado que o acumulador possui um comportamento adiabático. De acordo com Von Linsingen I. (2013) pode-se dimensionar o volume de um acumulador hidráulico para absorção de pulsação de atuadores e motores hidráulicos através da equação 5.23.

$$V_{ac} = \frac{\Delta V \cdot \varphi \cdot \left(\frac{P_t}{P_{min}} \right)^{1/1,4}}{\left(1 - \left(\frac{P_t}{P_{max}} \right)^{\frac{1}{1,4}} \right)} \quad (5.23)$$

A equação 5.21 fornece o volume necessário para o acumulador hidráulico (V_{ac}) em litros como função das pressões máxima (P_{max}), pressão mínima (P_{min}) e pressão de trabalho (P_t). A variação do volume do acumulador (ΔV) é estimada como sendo o volume deslocado pelo atuador, e φ é uma constante para cada tipo de atuador, para um atuador de duplo efeito o valor é 0,25.

A pressão de trabalho é estimada como sendo a pressão nominal do motor hidráulico, a pressão máxima é considerada como sendo a pressão de trabalho mais a variação de pressão admitida (ΔP_{am}) no motor hidráulico, conforme equação 5.24. A pressão mínima é calculada como sendo a pressão de trabalho menos a variação de pressão admitida, de acordo com a equação 5.25.

$$p_{max} = p_t + \Delta p_{am} \quad (5.24)$$

$$p_{min} = p_t - \Delta p_{am} \quad (5.25)$$

O resultado do dimensionamento é um acumulador de 102,8 litros, selecionou-se um acumulador do tipo bexiga do fabricante Haydac, modelo SB130, com um volume de 130 litros (HYDAC, 2016).

Os principais parâmetros do modelo CO-THL são exibidos na Tabela 5.1. Esses parâmetros foram dimensionados com base no clima de ondas médio do litoral de Santa Catarina, são considerados parâmetros compatíveis com os disponíveis no mercado, com o objetivo de utilizar parâmetros reais na simulação dinâmica do modelo CO-TLH.

Tabela 5.1: Parâmetros utilizados no modelo CO-THL.

Componentes					
Atuador					
Curso (mm)	D_e (mm)	d_h (mm)	Fabricante	Modelo	
616	280	200	Bosch-Rexroth	CDH2 MT4	
Motor					
V_d (cm ³ /rot)	η	Modelo	Fabricante	P_t (bar)	P_{max} (bar)
160,4	0,8	A2FO	Bosch-Rexroth	400	450
Acumulador					
Volume nominal		Fabricante		Modelo	
130		Hydac		SB130	
Tubulações					
D (mm)	L (m)	Fabricante		P_{max} (bar)	
50,8	10	Parker		700	

A válvula de alívio de pressão é configurada para atuar quando a pressão da linha for de 450 bar, com o objetivo de proteger o motor hidráulico contra eventuais sobrecargas no sistema. O valor de 0,15 kg.m² foi utilizado nos dois modelos como momento de inércia do eixo do motor hidráulico, valor baseado na simulação de Ahn (2012).

5.1.2 Modelo CO-TH

O segundo modelo é baseado no estudo de Ahn (2012), classificado como sendo do tipo corpo oscilante com transmissão de potência via transmissão hidrostática (nome abreviado para CAO-TH). O sistema possui um flutuador ligado a um conjunto pinhão e cremalheira (Figura 5.5) acoplado a uma caixa de redução que aciona um sistema de transmissão hidrostática para geração de energia.

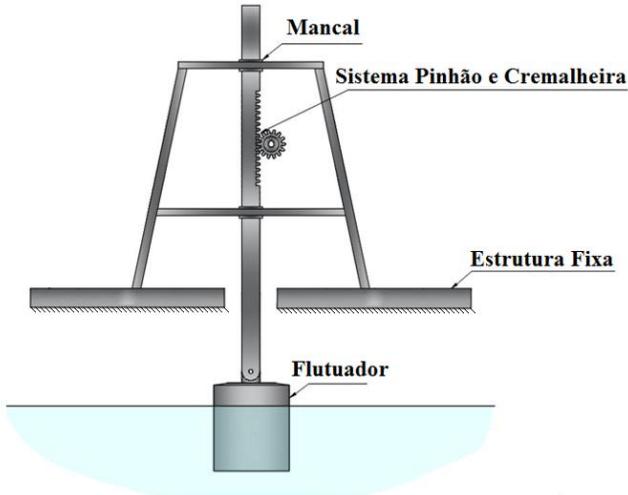


Figura 5.5: Projeto CO-TH.

O objetivo do projeto CO-TH é comparar os resultados de rendimento e potência obtidos com o modelo CO-THL, dimensionado no nesse estudo.

Na etapa de *sketch*, foram escolhidos os componentes do sistema. A Figura 5.6 ilustra os componentes utilizados no modelo CO-TH.

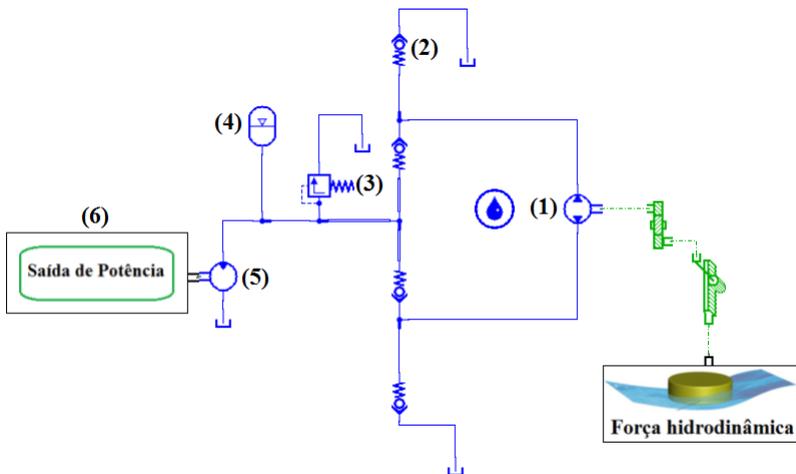


Figura 5.6: Transmissão hidrostática utilizada no projeto CO-TH.

Em (1) tem-se uma bomba hidráulica bidirecional de deslocamento volumétrico constante; o item (2) representa uma válvula de retenção e o componente (3), a válvula de alívio. O motor hidráulico é apresentado no item (4) e o reservatório é representado em (5).

Toda potência gerada pelo sistema hidráulico é dissipada na saída de potência (6), e todo torque gerado pelo motor hidráulico é dissipado na saída. Não foi considerado na modelagem o gerador hidráulico, pois o foco da modelagem dinâmica foi o estudo do sistema de transmissão de potência.

A transmissão hidrostática do projeto tem como objetivo converter movimento bidirecional da bomba em movimento unidirecional no motor hidráulico, para cumprir este objetivo são utilizadas válvulas direcionais ligadas de uma forma que proporcionam um fluxo unidirecional no motor hidráulico nos dois sentidos de rotação da bomba.

O sistema mecânico proposto é constituído de sistema pinhão cremalheira e um redutor (Figura 5.7 (a)). O sistema pinhão cremalheira converte movimento vertical de oscilação do flutuador em movimento rotacional, a velocidade angular e o torque são controlados através de uma redução mecânica. O modelo em AMESIM é mostrado na Figura 5.7 (b).

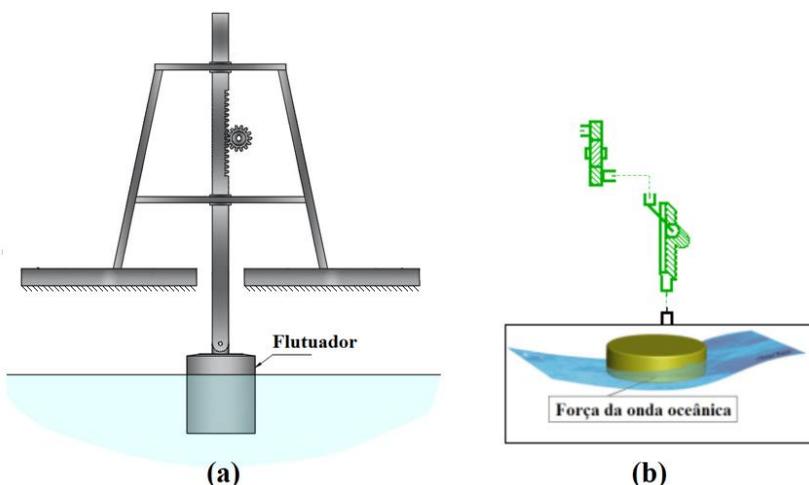


Figura 5.7: Modelo CO-TH, (a) Sistema Pinhão e Cremalheira, (b) modelo em AMESIM.

Na etapa de submodelos, foram escolhidas as mesmas formulações matemáticas utilizadas no projeto CO-THL para os componentes em comum. De maneira análoga ao projeto CO-THL a força hidrodinâmica

sobre o flutuador devido à onda oceânica é modelada pelas equações 3.6, 3.7 e 3.8.

As equações que descrevem o modelo do sistema Pinhão e Cremalheira em AMESIM são (5.26), (5.27) e (5.28).

$$T_p = F_1 \cdot R_p \quad (5.26)$$

$$Y = R_p \cdot \theta \quad (5.27)$$

$$V = R_p \cdot \omega \quad (5.28)$$

Em que:

- T_p - Torque resultante (N.m) da força hidrodinâmica F_1 (N) sobre a cremalheira;
- R_p - Raio do pinhão (m);
- θ - Deslocamento angular (rad);
- Y - Deslocamento vertical (m);
- V - Velocidade vertical da cremalheira (m/s);
- ω - velocidade angular (rad/s);

Foram desprezadas as perdas por atrito no sistema Pinhão Cremalheira. A redução é modelada pelas as equações 5.29, 5.30 e 5.31.

$$R_1 \theta_1 = R_2 \theta_2 \quad (5.29)$$

$$R_1 \omega_1 = R_2 \omega_2 \quad (5.30)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{R_1}{R_2} = K \quad (5.31)$$

Onde;

- R_1 - Raio da engrenagem 1 (m);
- R_2 - Raio da engrenagem 2 (m);
- θ_1 - Deslocamento angular da engrenagem 1 (m);
- θ_2 - Deslocamento angular da engrenagem 2 (m);
- ω_1 - Velocidade angular da engrenagem 1 (m);
- ω_2 - Velocidade angular da engrenagem 2 (m);
- A constante K é conhecida como relação de transmissão, fornece uma relação entre os torques (T) em cada engrenagem;

As equações que modelam o comportamento da bomba hidráulica em AMESIM são ilustradas de 5.32 a 5.37. A bomba hidráulica utilizada é do tipo hidrostática, que fornece energia ao fluido, mantendo uma velocidade de entrada e saída constante. O aumento de energia no fluido se dá através do aumento de pressão.

$$Q_b = V_d \cdot n \quad (5.32)$$

$$T_b = \frac{\Delta p \cdot V_d}{2\pi} \quad (5.33)$$

$$\dot{W} = Q \cdot \Delta p \quad (5.34)$$

$$\eta_v = \frac{Q_e}{Q_t} \quad (5.35)$$

$$\eta_m = \frac{T_t}{T_e} \quad (5.36)$$

$$\eta = \eta_m \cdot \eta_v \quad (5.37)$$

Em que:

- V_d - Volume de líquido deslocado por rotação na bomba (m^3/rot);
- n - Rotação em RPS;
- Q_b - Vazão na bomba hidráulica (m^3/s);
- \dot{W} - Potência na bomba hidráulica (W);
- T_b - Torque no eixo da bomba hidráulica (N.m);
- Δp - Diferença de pressão na entrada e saída da bomba hidráulica (Pa);
- η_v - Rendimento volumétrico do motor hidráulico;
- Q_t e Q_r - Vazões teórica e real, respectivamente (m^3/s);
- η_m - Rendimento mecânico da bomba hidráulica;
- T_t e T_r - Torques teórico e real, respectivamente (N.m). O torque real que deve ser fornecido a uma bomba é maior que o torque teórico devido ao atrito de Coulomb e atrito viscoso presentes na bomba.

O rendimento global é dado por η na equação 5.37 como sendo o produto dos rendimentos volumétrico e mecânico. Maiores detalhes sobre a modelagem matemática empregada em bombas hidráulicas pode ser encontrada em Von Linsingen I. (2013).

Os modelos matemáticos empregados nas válvulas de retenção, tubulações, válvula de alívio de pressão e motor hidráulico são análogas as empregadas no projeto CO-THL.

A terceira etapa da modelagem dinâmica é a definição dos parâmetros utilizados na modelagem. A Tabela 5.2 mostra os principais parâmetros utilizados no modelo CO-TH, baseados no estudo de Ahn (2012).

Tabela 5.2: Parâmetros utilizados no modelo CO-TH.

Componentes					
Bomba					
$V_d(\text{cm}^3/\text{rot})$	η	Fabricante	Modelo	$P_t(\text{bar})$	$P_{max}(\text{bar})$
355	0,8	Bosch-Rexroth	A2FO	400	450
Motor					
$V_d(\text{cm}^3/\text{rot})$	η	Fabricante	Modelo	$P_t(\text{bar})$	$P_{max}(\text{bar})$
80,4	0,8	Bosch-Rexroth	A2FO	400	450
Redução					
K					
4					
Tubulações					
D(mm)	L(m)	Fabricante	$P_{max}(\text{bar})$		
50,8	10	Parker	700		

A válvula de alívio de pressão é configurada para trabalhar com pressões de até 450 bar, para que o sistema não opere com pressões acima da pressão de trabalho permitida no motor hidráulico e bomba hidráulica.

A bomba e motor hidráulico utilizados são do mesmo modelo (A2FO), com rendimento de 80% (BOSCH-REXROTH, 2016). A mangueira utilizada possui pressão máxima de trabalho de 700bar, possuindo diâmetro interno de 50,8 mm e diâmetro externo de 66 mm (PARKER, 2016).

O sistema é simulado utilizando um segundo projeto hidráulico (Figura 5.8). Nesse novo sistema hidráulico, é proposta uma melhoria com objetivo de fornecer uma pressão constante ao motor hidráulico, para cumprir este objetivo é utilizado um acumulador hidráulico na entrada do motor. O acumulador é dimensionado utilizando como critério de dimensionamento a função de amortecer pulsação da bomba, considera-

se um comportamento adiabático. As pressões máximas e mínimas seguiram as especificações utilizadas do motor hidráulico.

O dimensionamento do acumulador hidráulico utiliza a equação 5.22. Obteve-se um volume de 3l para o acumulador. O acumulador seleccionado para o projeto é o mesmo utilizado no modelo CO-THL.

5.2 Resultado das simulações do modelo CO-THL

O comportamento dinâmico do sistema é avaliado considerando uma onda monocromática de 1 m de altura de onda e 7 s de período. Na Figura 5.8 apresenta-se a pressão no motor e atuador variando com o tempo. A curva em picos (a) representa a pressão no atuador hidráulico, e a curva estabilizada (b), representa a saída de pressão no motor hidráulico.

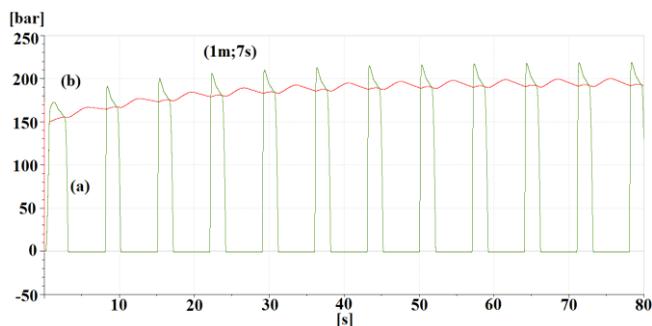


Figura 5.8: Pressão no motor e atuador hidráulico do modelo CO-TLH.

A condição de onda é representada como um binário (altura de onda; período) junto ao gráfico. Observou-se que, em aproximadamente 50 s, o regime permanente foi atingido no motor hidráulico, com uma pressão média de 190 bar, e variações de pressão em torno de 5 bar. Observa-se que, apesar da pressão de saída do atuador hidráulico ser variável, o sistema consegue estabilizar a pressão na entrada do motor devido à utilização do acumulador hidráulico.

Na condição avaliada a rotação do motor hidráulico estabilizou-se em 450 RPM (Figura 5.9).

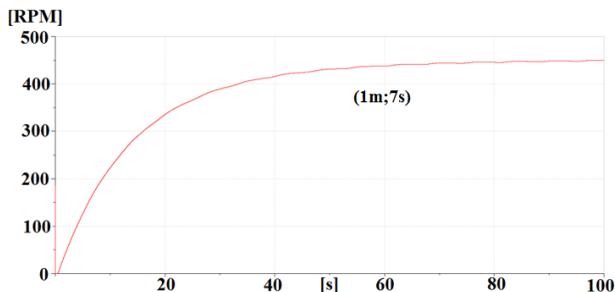


Figura 5.9: Rotação no motor hidráulico do modelo CO-TLH.

O resultado apresentado está de acordo com Joseba (2012). É possível estabilizar a rotação no motor hidráulico devido ao uso de acumuladores hidráulicos.

O protótipo testado por Joseba (2012) utilizou um acumulador hidráulico de 50 l, e um motor de 5 cm³/rot, testado com uma onda monocromática de 0,2 Hz e amplitude de 37 mm. A pressão estabilizou-se em 65 bar, e a rotação em 1550 RPM.

Observou-se que, para cada condição de entrada a rotação no motor hidráulico é diferente, maiores rotações são obtidas com ondas de maior altura (Figura 5.10). A curva inferior (1 m; 7 s) representa a altura de onda de 1 m, a curva da posição média representa uma onda de 2 m de altura e a curva superior representa a onda com 3m de altura, foi mantido constante o período de 7 s.

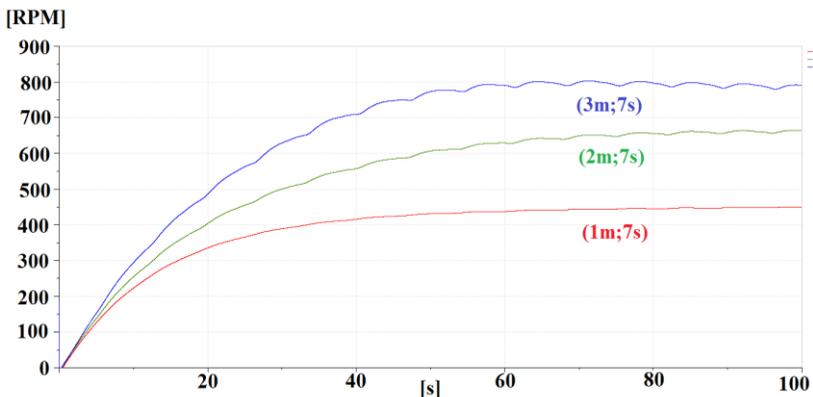


Figura 5.10: Variação da rotação do motor com a altura da onda.

Para onda de 1 metro a rotação estabilizou-se em aproximadamente 450 RPM, para onda de 2 m a rotação estabilizou em cerca de 650 RPM e para onda de 3 m a rotação atingiu o regime permanente em aproximadamente 800 RPM. Observa-se também que à medida que a altura da onda cresce a rotação apresenta maior variação. Esse resultado é esperado, pois ondas de amplitude maior fornecem uma maior força hidrodinâmica e, conseqüentemente, maior quantidade de pressão para linha hidráulica.

A pressão no sistema aumenta com a altura da onda oceânica (Figura 5.11). Observa-se que à medida que a altura de onda aumenta, maiores pressões são atingidas no motor hidráulico, e as flutuações de pressão no motor hidráulico também aumentam com a altura de onda.

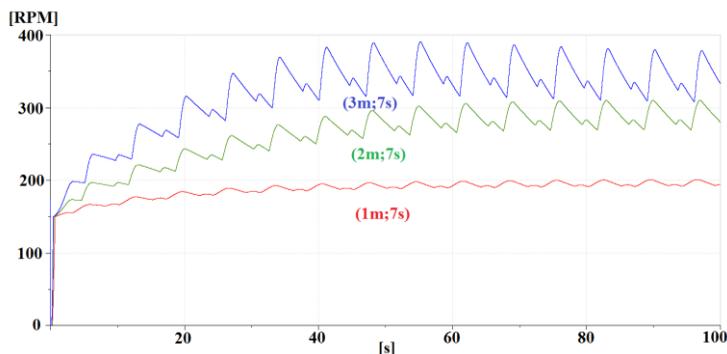


Figura 5.11: Aumento da pressão com a altura da onda oceânica.

De acordo com a equação 2.1, a potência máxima que pode ser extraída de uma onda oceânica monocromática de 1 metro de altura com 7 s de período é 6,85 kW/m, considerando que o flutuador ocupa 4 m de extensão da frente de onda, a potência máxima extraída é de 27,51 kW. Observa-se que a potência gerada pelo conversor em regime permanente foi 20 kW (Figura 5.12), fornecendo um rendimento de 72,7 % para essa condição de onda.

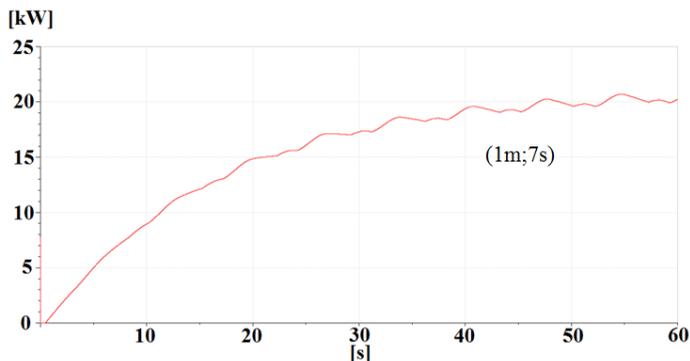


Figura 5.12: Potência gerada pelo modelo CO-TLH.

No protótipo mecânico testado Chandrasekaran e Raghavi (2015), a potência extraída não atingiu regime estável (Figura 3.9) para nenhuma condição testada. Sendo assim não apresentou condições adequadas para geração de energia a partir de ondas oceânicas. De acordo com Gaspar (2016), a tecnologia de transmissão de potência via sistema hidráulico é mais promissora para transmissão de potência em conversores do tipo corpo oscilante.

Na simulação dinâmica do conversor hiperbárico da COPPE/UFRJ realizada por Rosa (2010), atingiu-se regime permanente na geração de potência, com pequenas flutuações em torno de 0,0007 %.

Para análise da potência gerada o período de onda é variado intervalo de 6-12 s e a altura de onda no intervalo de 1-3 m. A Figura 5.13 mostra a curva da potência gerada para o modelo do CO-TLH quando são variados a altura (m) e período (s) de onda oceânica.

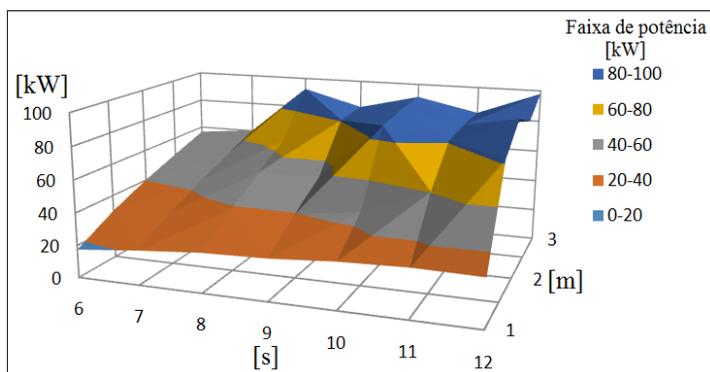


Figura 5.13: Análise de sensibilidade da Potência gerada pelo modelo CO-TLH.

Observa-se que o aumento da altura de onda e período leva a um acréscimo na potência gerada pelo conversor CO-THL. A potência gerada aumenta consideravelmente com o aumento da altura. Esse fato é explicado devido à potência disponível da onda variar com o quadrado da altura e variar linearmente com o período (Equação 2.1).

O conversor simulado por Ahn (2012) foi submetido a uma onda monocromática de 4,5s de período e 0,75 m de altura, e o rendimento obtido pelo modelo nessa condição foi de 65%. Sob as mesmas condições o modelo CO-THL apresentou um rendimento de 75%. No estudo de Ahn (2012), não foi levada em conta a variação do rendimento com as condições de onda e não foi avaliada a potência gerada pelo sistema para diferentes condições de onda.

Na simulação dinâmica do conversor hiperbárico de Pecém realizado por Rosa (2010), considerou-se onda monocromática com 5 s de período e 1,4 m de altura, fornecendo um rendimento de 61,6%. Sob as mesmas condições o modelo CO-THL apresentou um rendimento de 54%. Na simulação do conversor hiperbárico foi desconsiderada a variação do rendimento do sistema com a altura e período da onda, e a estimativa da eficiência do sistema é baseada em apenas uma condição oceânica. Não foi realizada uma análise de sensibilidade do modelo.

A Figura 5.14 apresenta a variação do rendimento do modelo CO-THL variando com a altura de onda (m) e período (s).

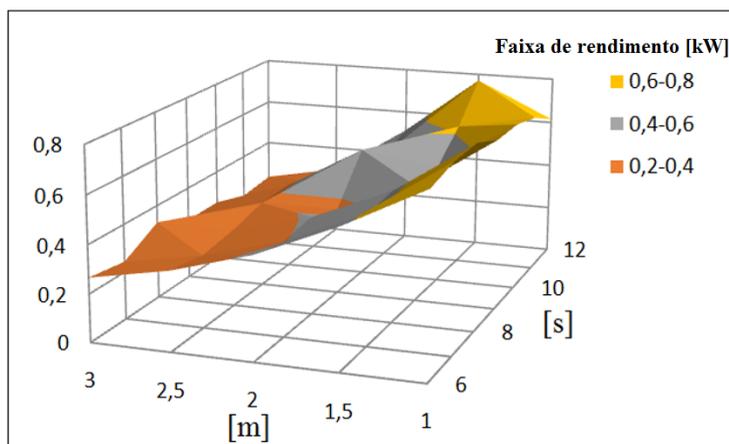


Figura 5.14: Análise de sensibilidade do rendimento do modelo CO-THL.

Observa-se que à medida que a altura de ondas aumenta o rendimento diminui. Esse fato é explicado devido ao desvio da vazão na válvula limitadora de pressão quando a pressão atinge a máxima admissível.

À medida que a amplitude de onda aumenta, o atuador hidráulico é solicitado por uma maior força, ocasionando um aumento de pressão na linha hidráulica. Como a válvula limitadora de pressão é configurada para abrir a uma pressão de 450 bar, de modo a proteger o componente mais sensível do sistema hidráulico, em condições de pressão acima do limite da válvula, a vazão é parcialmente desviada para o tanque. Sendo assim o sistema não aproveita toda energia disponível da onda oceânica, apresentando um menor rendimento. O rendimento médio obtido para o modelo CO-THL foi de 43%.

Uma forma reduzir a pressão no sistema seria aumentar o diâmetro do cilindro do atuador e o tamanho do motor hidráulico. Nesse caso, o sistema operaria com menores pressões e aproveitaria maior quantidade de energia das ondas de grande altura (acima de 2,5 m).

No entanto, em condições de altura de onda pequena e média (1-2 m de onda), o sistema hidráulico não conseguiria estabilizar a pressão no motor hidráulico, apresentando rendimento insatisfatório. O modelo CO-THL foi dimensionado para operar de acordo com a condição média *offshore* de Florianópolis (Tabela 4.1), ponto P4, com 1,94 m de altura de onda e 9,4 s de período. Sendo assim, o sistema apresenta melhores rendimentos para condições próximas ao ponto utilizado para o dimensionamento do sistema (0,55-0,80 de rendimento).

Ao dimensionar um sistema para geração de energia, deve-se observar a condição predominante do mar onde se deseja utilizar o sistema. Para isso deve-se ter disponível a caracterização das condições oceânicas locais.

A Figura 5.15 ilustra o efeito da variação dos parâmetros do sistema hidráulico pressão de trabalho do motor. O deslocamento volumétrico do motor hidráulico foi alterado de 160,4 cm³/rot para 400

cm^3/rot , e o diâmetro do cilindro do atuador hidráulico passou de 280 mm para 400 mm, mantendo a condição oceânica de (1 m; 7 s).

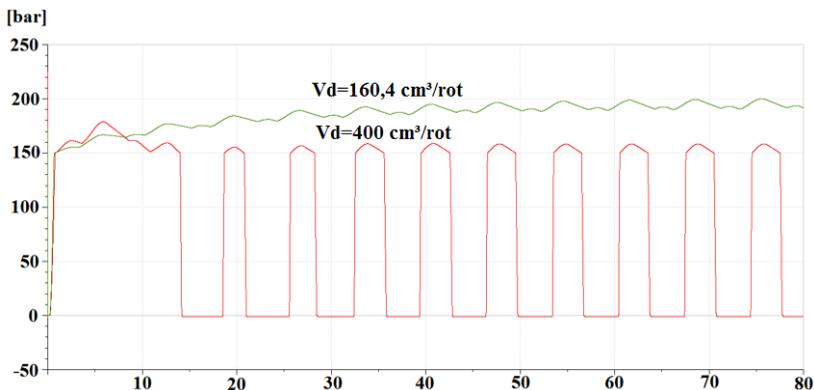


Figura 5.15: Variação de pressão no motor com a variação do diâmetro do pistão e volume deslocado pelo motor.

A curva superior representa o sistema com os parâmetros originais, enquanto a vermelha representa os parâmetros modificados. Observa-se que o aumento dos parâmetros do sistema hidráulico acarretou em uma redução da pressão no motor hidráulico, embora o regime permanente não foi atingido. Sendo assim o sistema não apresentou condições adequadas para geração de energia. Esse resultado não foi discutido em outros estudos.

Observou-se que, mesmo com o aumento do volume do acumulador, o sistema não foi capaz de atingir o regime permanente.

5.3 Resultados das simulações dinâmicas do modelo CO-TH

O comportamento dinâmico do modelo CO-TH foi avaliado considerando uma onda monocromática de 1 metro de altura de onda e 7 s de período. O modelo CO-TH foi baseado no estudo de Ahn (2012) e teve como objetivo realizar uma comparação com o modelo CO-THL.

A Figura 5.16 mostra a pressão no motor hidráulico do projeto CO-TH, com acumulador presente. Observa-se que o sistema operou com pressões na faixa de 425-450 bar após 40s, o modelo apresentou uma pressão mais elevada que o modelo CO-THL para a mesma condição.

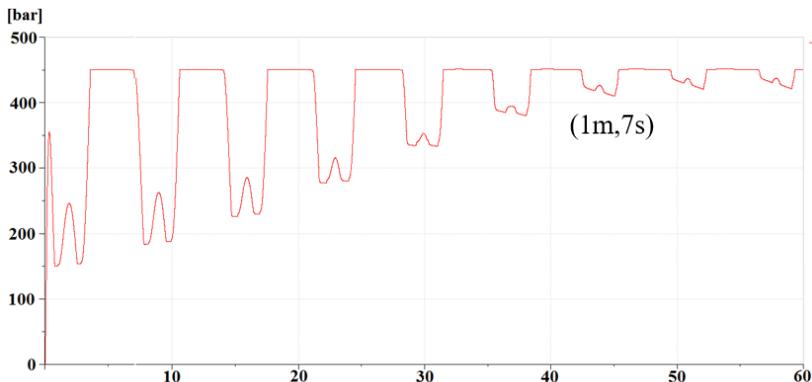


Figura 5.16: Pressão no motor hidráulico do modelo CO-TH com acumulador.

Este resultado está de acordo com Joseba (2012), é possível estabilizar a rotação no motor hidráulico devido ao uso de acumuladores hidráulicos.

A Figura 5.17 mostra a pressão no motor hidráulico do modelo CO-TH, sem o acumulador hidráulico. Observa-se que o sistema operou com pressões na faixa de 250-450 bar. Sendo assim, a variação de pressão foi consideradamente superior ao sistema com acumulador, não sendo adequado para geração de energia o sistema sem acumulador.

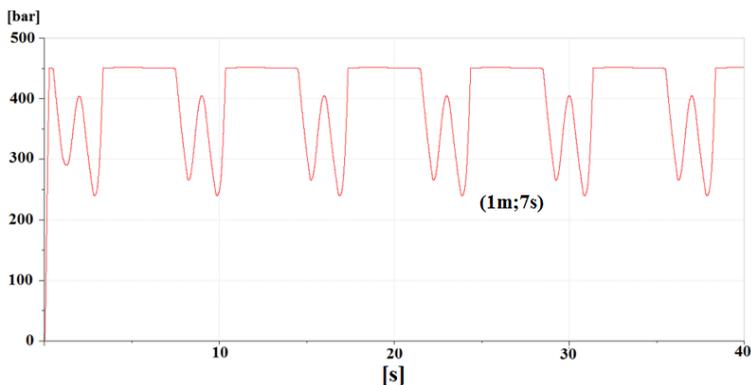


Figura 5.17: Pressão no motor hidráulico do modelo CO-TH sem acumulador.

A energia gerada pelo projeto CO-TH é mostrada na Figura 5.18. O modelo gerou uma potência média de 26 kW, apresentando um rendimento de 90% para condição oceânica de 1m de altura e 7 s de

período. Observa-se que o rendimento nessa condição foi consideravelmente maior que o modelo CO-THL.

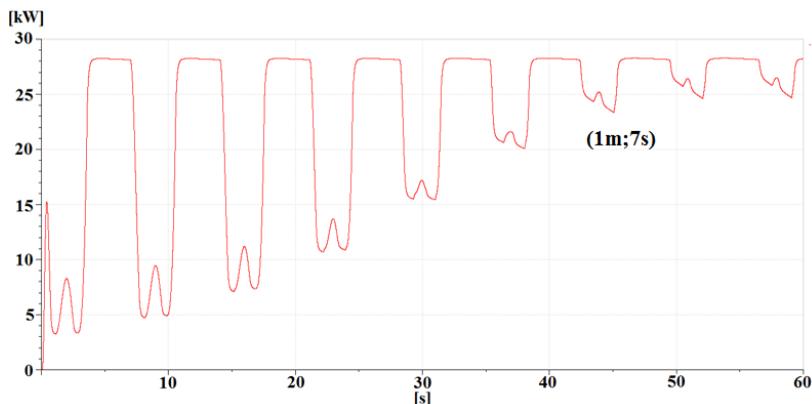


Figura 5.18: Potência gerada pelo modelo CO-TH com acumulador.

A energia convertida pelo projeto varia com as condições de onda, a Figura 5.19 mostra a variação da energia convertida (kW) pelo modelo CO-TH em função da altura de onda (m) e período (s).

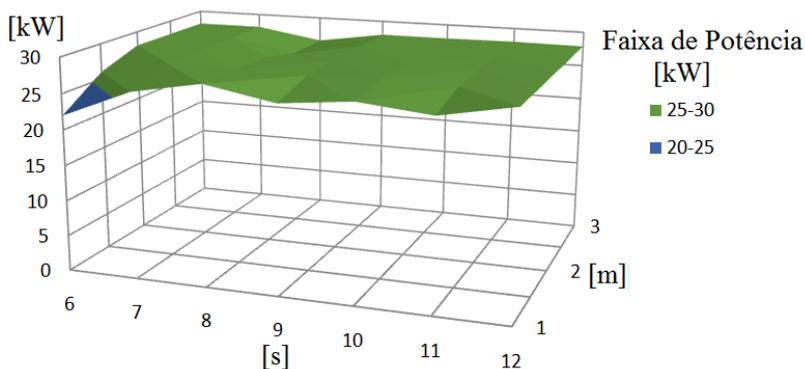


Figura 5.19: Análise de sensibilidade da Potência gerada pelo modelo CO-TH.

Observa-se que devido ao sistema operar em alta pressão (450 bar) em condições de onda de baixa altura (1-1,5 m), ao aumentar a altura e período de onda pouca quantidade extra foi aproveitada pelo conversor, pois a válvula de alívio de pressão atua liberando parte do fluxo para o tanque quando a pressão atinge 450 bar.

A energia gerada pelo conversor CO-TH esteve na faixa de 20-30 kW para todas as condições consideradas para o projeto CO-TH, enquanto o modelo CO-THL, esteve na faixa de 20-100 kW. Se comparado ao modelo CO-THL, o conversor CO-TH é insensível a variação das condições de onda.

Pode-se operar com maiores pressões no sistema hidráulico, no entanto, nesse caso, os elementos do circuito hidráulico deverão ser substituídos por elementos que suportem uma maior pressão, no entanto essa pressão sempre será finita e haverá limites para a pressão de máxima de trabalho, de modo que o sistema sempre deverá ser otimizado para uma faixa de operação. Essa faixa de operação pode ser retirada das matrizes oceânicas para uma dada localidade (como mostrado na Figura 4.2 para Florianópolis).

O modelo CO-TH teve seu dimensionamento baseado em condições de ondas menos energéticas que a de Florianópolis. Sendo assim, apresentou um comportamento inferior ao modelo CO-THL, pois não foi dimensionado para atuar no mesmo local. O rendimento médio do modelo CO-TH foi de 20%, menos que metade do rendimento obtido com o modelo CO-THL.

A Figura 5.20 mostra a análise do rendimento do modelo CO-TH com as condições a altura (m) e período (s) de onda.

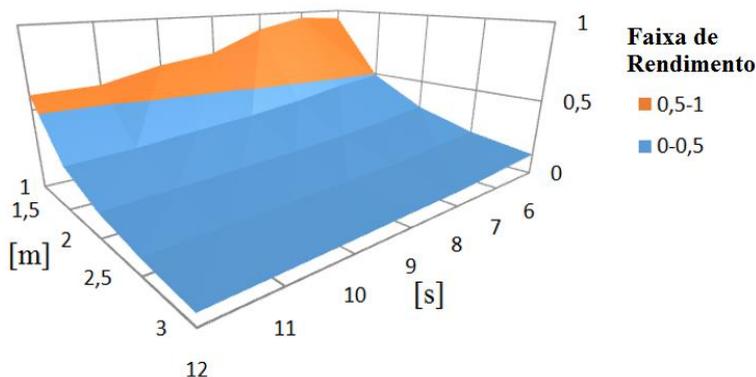


Figura 5.20: Análise de sensibilidade do rendimento do modelo CO-TH.

Observa-se que o rendimento decai consideravelmente com a altura de onda. Este fato é explicado devido à válvula de alívio de pressão desviar parte do vazão para o tanque, estabelecendo um valor máximo para a pressão do sistema. Sendo assim, grande parte da potência disponível não

é aproveitada. Maiores rendimentos são obtidos na faixa de altura de onda de 1-1,5 m.

Na simulação dinâmica do conversor hiperbárico de Pecém realizado por Rosa (2010), foi considerada uma onda monocromática com 5 s de período e 1,4 m de altura, fornecendo um rendimento de 61,6%, sob as mesmas condições o modelo CO-TH apresentou um rendimento de 70%.

Observa-se nos dois modelos simulados, que é possível estabilizar a pressão no motor hidráulico, variações nas condições de onda alteram a potência, rendimento, rotação e torque nos modelos simulados. O rendimento médio é inferior a 50% nos dois modelos. A análise de sensibilidade possibilitou observar variações de potência e rendimento não previstas nos estudos de Rosa (2010), Ahn (2012) e Chandrasekaran e Raghavi (2015).

Deve-se observar que os valores obtidos para o rendimento dos modelos são superiores aos que seriam obtidos por protótipos reais, pois na modelagem foram adotadas simplificações como onda monocromática, foram desprezadas perdas de cargas nas tubulações, os atritos nos sistemas mecânicos e não foi modelado o comportamento do gerador elétrico.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo trata-se das principais conclusões obtidas no trabalho e recomendações para trabalhos futuros. Os resultados e discussões são divididos em duas partes, referentes ao estudo de conversores e à modelagem dinâmica.

6.1 Estudo de conversores

Com estudo dos conversores existentes foi possível ter uma estimativa do potencial energético do recurso da energia das ondas em Florianópolis. A estimativa da energia gerada em um ano de operação dos conversores *offshore* foi em torno de 0,39 – 17,78 GWh, dependendo do tipo de conversor. A energia das ondas pode contribuir para o fornecimento de energia elétrica em regiões isoladas, ilhas e plataformas oceânicas.

A estimativa da energia gerada pelos conversores *offshore* em Florianópolis mostrou que um maior montante energético é obtido pelo conversor Wave Dragon (17,78 GWh), seguido por Pontoon (2,3 GWh), AWS (2,13 GWh) e Wavestar (2,06 GWh). Dos conversores *nearshore*, o maior montante energético é obtido conversor Oyster (2,91 GWh em S5), seguido por Wavestar (1,66 GWh) e OE Buoy (1,54 GWh). Dos dois conversores *onshore* avaliados SSG apresentou um montante energético de 24,11 GWh e o conversor CAO apresentou 0,42 GWh.

Comparando-se as estimativas de energia gerada pelos conversores CAO, Pelamis P750, Wave Dragon e AWS no estado da Galícia na Espanha com as estimativas dos mesmos conversores para Florianópolis, os resultados foram próximos. Em alguns casos, o desempenho em Florianópolis seria superior. As estimativas mostraram que, apesar das condições oceânicas nacionais possuem menor densidade energética que o mar espanhol, o montante energético obtido foi próximo ao espanhol devido à baixa sazonalidade do recurso das ondas nacional.

Florianópolis é uma região estratégica para implementação de um parque de energia das ondas, pois possui proximidade com subestações elétricas (Eletrobrás), encontra-se perto dos portos São Francisco do Sul, Itajaí e Imbituba e próxima à Universidade Federal de Santa Catarina, o que poderá viabilizar futuras parcerias de pesquisa. O estado de Santa Catarina (assim como o Brasil) possui um clima de ondas estável, o que

favorece empreendimentos de geração de energia a partir de ondas oceânicas por fornecer uma demanda energética com baixa sazonalidade.

O estudo comparativo dos conceitos de projetos através do método da matriz de *Pugh* mostrou que o conversor Wavestar possui um desempenho superior aos demais projetos analisados. Deve-se observar que o uso da matriz de *Pugh* teve como finalidade o auxílio do estudo comparativo entre os conversores. Para tomada de decisões é necessária uma melhor avaliação dos conceitos de projetos.

A energia das ondas pode contribuir para o fornecimento de energia elétrica em regiões isoladas, ilhas e plataformas oceânicas.

6.2 Modelagem dinâmica

Os parâmetros utilizados na simulação dinâmica influenciam consideravelmente o rendimento final do conversor, que deve ser dimensionado para o clima predominante local para maximizar o montante energético obtido pelo projeto.

Apesar de pressão na entrada dos sistemas hidráulicos ser flutuante, a pressão no motor hidráulico nos dois projetos conseguiu atingir o regime permanente, sendo adequada para geração de energia elétrica.

O modelo que utiliza o braço de alavanca (CO-THL) apresentou um rendimento superior ao modelo que utiliza um sistema cremalheira (CO-TH). À medida que a altura e o período de onda aumentam, maior quantidade de energia é convertida no modelo com braço de alavanca. Pouca variação de potência é obtida ao ser variado altura e período de onda no modelo cremalheira.

Com o aumento da altura, uma maior quantidade de energia é convertida no modelo braço de alavanca. Pouca variação de potência é obtida ao ser variado altura e período de onda no modelo pinhão cremalheira.

Observou-se que à medida que a altura de onda aumenta as flutuações de pressão no motor hidráulico do modelo braço de alavanca são mais pronunciadas.

O uso do acumulador hidráulico é um componente importante em projetos de geração de energia a partir de ondas oceânicas, pois podem ser usados para armazenar energia com intuito de suavizar a pressão na entrada do motor hidráulico.

6.3 Recomendações

As principais recomendações para trabalhos futuros são:

- Realizar um estudo de possíveis locais para instalação de parques de energia das ondas no litoral de Santa Catarina;
- Estudar o ciclo de vida dos projetos de geração de energia a partir de ondas oceânicas;
- Construir protótipos físicos dos modelos simulados;
- Realizar estudo da variação da potência obtida pelos conversores com a alteração da geometria do flutuador;
- Propor uma metodologia para otimizar os parâmetros de projeto;
- Avaliar sistemas de transmissão de potência alternativos;
- Realizar simulações dinâmicas utilizando um motor hidráulico com deslocamento variável;
- Observou-se no estudo que à medida que a altura de onda aumenta o modelo desvia-se do comportamento de regime constante para oscilante, sendo assim indica-se que seja desenvolvido algum método para dimensionamento do acumulador para sistemas hidráulicos, já que o método tradicional utilizado no dimensionamento de acumuladores hidráulicos não apresenta desempenho satisfatório;
- Propor e avaliar diferentes sistemas hidráulicos para transmissão de potência em sistemas de geração de energia a partir de ondas oceânicas.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABNT NBR 5462: **Confiabilidade e manutenibilidade – terminologia**. Rio de Janeiro, 1994. 37 p.
- [2] **Agencia Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)**, Atlas de energia elétrica, disponível em:
<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_par1_cap2.pdf>.
Acessado em 01/03/2016.
- [3] AGUSTINI, CAROLINE BORGES. **Perspectiva do mercado brasileiro no setor de energia eólica**. 2013.
- [4] AHN, K. K., TRUONG, D. Q., TIEN, H. H., & YOON, J. I. **An innovative design of wave energy converter**. *Renewable Energy*, 42, 186-194, 2012.
- [5] ALVES, JOSÉ HENRIQUE G.M; MELO, ELOI. **Measurement and modeling of wind waves at the northern coast of Santa Catarina, Brazil**. *Revista Brasileira de Oceanografia*, v. 49, n. 1-2, p. 13-28, 2001.
- [6] ANTONIO, F.O. **Modelling and control of oscillating-body wave energy converters with hydraulic power take-off and gas accumulator**. *Ocean engineering*, v. 34, n. 14, p. 2021-2032, 2007.
- [7] ANTÔNIO, F.O. **Modelling of Wave Energy Conversion**. **Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa**, 2014.
- [8] ANTONIO, F.O. **Wave energy utilization: A review of the technologies**. *Renewable and sustainable energy reviews*, v. 14, n. 3, p. 899-918, 2010.
- [9] ASSIS, LEANDRO EDUARDO DE. **Avaliação e aproveitamento da energia de ondas oceânicas no litoral do Rio Grande do Sul**. 2010.
- [10] BABARIT, A. **A database of capture width ratio of wave energy converters**. *Renewable Energy*, v. 80, p. 610-628, 2015.
- [11] BABARIT, A., HALS, J., MULIAWAN, M. J., KURNIAWAN, A., MOAN, T., & KROKSTAD, J. **Numerical benchmarking study of**

- a selection of wave energy converters.** *Renewable Energy*, 41, 44-63, 2012.
- [12] BACK, N., OGLIARI, A., DIAS, A., & SILVA, J. D. (2008). **Projeto integrado de produtos: planejamento, concepção e modelagem.** *Barueri: Malone*, p. 435-482, 2008.
- [13] BEIRAO, PEDRO JORGE BORGES FONTES NEGRÃO; MALÇA, CÂNDIDA MARIA DOS SANTOS PEREIRA. **Design and analysis of buoy geometries for a wave energy converter.** *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, v. 5, n. 2-3, p. 1-11, 2014.
- [14] **BEN**, Balanço Energético Nacional, disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/>>. Acessado em 12/08/2015.
- [15] BERTO, LUCAS FIGUEIRÓ. **Modelagem Dinâmica de Sistema Automotivo: Estudo de caso via testes de performance e falhas do Baja SAE.** Dissertação de Mestrado, Engenharia Mecânica, POSMEC/UFSC. 2015.
- [16] BESERRA, ELIAD RICARTE. **Avaliação de sítios para o aproveitamento dos recursos energéticos das ondas do mar.** 2007. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO.
- [17] **BOSCH-REXROTH INDUSTRIAL HYDRAULICS**, disponível em: <www.boschrexroth.com>, acessado em: 15/05/2016.
- [18] BOSTROM, C., WATERS, R., LEJERSKOG, E., SVENSSON, O., STALBERG, M., STROMSTEDT, E., & LEIJON, M. **Study of a wave energy converter connected to a nonlinear load.** *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 34(2), 123-127, (2009).
- [19] BRACCO, G., GIORCELLI, E., MATTIAZZO, G., & PASTORELLI, M. **Design of a gyroscopic wave energy system.** In *IECON 2011-37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society* (p. 3134-3139). IEEE, 2011.
- [20] BRANNAN, JAMES; BOYCE, WILIAM E. **Equações diferenciais: uma introdução a métodos modernos e suas aplicações.** Rio de Janeiro: LTC, p. 3-8, 2008.
- [21] BROOKE, John. **Wave energy conversion.** Elsevier, 2003.

- [22] CALLIARI, L. J., MUEHE, D., HOEFEL, F. G., & TOLDO JR, E. **Morfodinâmica praias: uma breve revisão.** *Revista brasileira de oceanografia*, 51(unico), 63-78, 2003.
- [23] CARTER, D. J. T. **Prediction of wave height and period for a constant wind velocity using the JONSWAP results.** *Ocean Engineering*, v. 9, n. 1, p. 17-33, 1982.
- [24] CARVALHO, J. T. **Simulação da Distribuição de Energia das Ondas Oceânicas ao Largo do Litoral Brasileiro.** INPE, São José dos Campos, 2010.
- [25] CENTER, Wave Energy. **Potencial e Estratégia de desenvolvimento da energia das ondas em Portugal.** *Wave Energy Centre*, p. 6-12, 2004.
- [26] **CETO ENERGY**, disponível em: <<http://www.design-engineering.com/general/carnegie-applies-for-5mw-wave-energy-project-49943/>>. Acessado em 29/08/2015.
- [27] CHANDRASEKARAN, S.; RAGHAVI, B. **Design, Development and Experimentation of Deep Ocean Wave Energy Converter System.** *Energy Procedia*, v. 79, p. 634-640, 2015.
- [28] CHOZAS, J. FERNÁNDEZ; SOERENSEN, H. C. **State of the art of wave energy in Spain.** In: *Electrical Power & Energy Conference (EPEC)*, 2009 IEEE. IEEE, 2009. p. 1-6.
- [29] CLEMENTE, CRISTIANO HENRIQUE PIMENTEL. **Avaliação do desempenho hidrodinâmico de um sistema de corpos oscilantes para extração de energia das ondas.** 2011. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [30] CONTESTABILE, PASQUALE; FERRANTE, VINCENZO; VICINANZA, DIEGO. **Wave Energy Resource along the Coast of Santa Catarina (Brazil).** *Energies*, v. 8, n. 12, p. 14219-14243, 2015.
- [31] CORNETT, ANDREW M. **A global wave energy resource assessment.** In: *The Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference.* International Society of Offshore and Polar Engineers, 2008.
- [32] COSTA, PAULO ROBERTO da. **Energia das Ondas do Mar para Geração de Eletricidade.** Dissertação de Mestrado, PENO/COPPE/UFRJ, 2004.

- [33] CRUZ, JOÃO M.B.P; SARMENTO, ANTÔNIO J.N.A. **Energia das ondas: introdução aos aspectos tecnológicos, económicos e ambientais**, 2004.
- [34] CUMMINS, W. E. **The impulse response function and ship motions**. David Taylor Model Basin Washington DC, 1962.
- [35] DA SILVEIRA, I. C. A., LIMA, J. A. M., SCHMIDT, A. C. K., CECCOPIERI, W., SARTORI, A., FRANSCISCO, C. P. F., & FONTES, R. F. C. **Is the meander growth in the Brazil Current system off Southeast Brazil due to baroclinic instability?**. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 45(3), p. 187-207, 2008.
- [36] DALTON, GORDON J.; ALCORN, RAYMOND; LEWIS, T. **Case study feasibility analysis of the Pelamis wave energy convertor in Ireland, Portugal and North America**. *Renewable Energy*, v. 35, n. 2, p. 443-455, 2010.
- [37] DE SOUSA PRADO, M. G., GARDNER, F., DAMEN, M., & POLINDER, H. **Modelling and test results of the Archimedes wave swing**. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 220(8), p. 855-868, 2006.
- [38] DIACONU, SORIN; RUSU, EUGEN. **Evaluation of various WEC devices in the Romanian near shore. In: WSEAS International Conference on Energy and Environment Technologies and Equipment (EEETE'13)**. Brasov, Romania. 2013. p. 92-102.
- [39] DUFFY, A. H. B., ANDREASEN, M. M., MACCALLUM, K. J., & REIJERS, L. N. **Design coordination for concurrent engineering**. *Journal of Engineering Design*, 4(4), p. 251-265, 1993.
- [40] **ECMWF, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts**. Disponível em: < <http://www.ecmwf.int> > , Acessado em 24/01/2016.
- [41] FALNES, JOHANNES. **Ocean waves and oscillating systems: linear interactions including wave-energy extraction**. Cambridge university press, 2002.
- [42] FERREIRA, MARCELO GITIRANA GOMES. **Utilização de modelos para a representação de produtos no projeto**

- conceitual**. 1997. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina.
- [43] FIALHO, ARIVELTO BUSTAMANTE. **Automação Hidráulica: projetos, dimensionamento e análise de circuitos**. São Paulo: Editora Érica, 2004.
- [44] FLEMING, FERNANDA PEREIRA. **Avaliação do potencial de energias oceânicas no brasil**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [45] FLESCH, EDUARDO AUGUSTO. **Projeto de transmissão hidrostática para aerogeradores de eixo horizontal. Dissertação de Mestrado, Engenharia Mecânica, POSMEC/UFSC**, 2012.
- [46] FOSTER, J. W., GHORBANI, R., GARAMBOIS, P., JONSON, E., & KARLSSON, S. **Development of a Low Cost Point Absorber Wave Energy Converter for Electric Mobility**. In *World Renewable Energy Congress-Sweden; 8-13 May; 2011; Linköping; Sweden* (No. 57, p. 2278-2285). Linköping University Electronic Press, 2011.
- [47] GAO, Y., SHAO, S., ZOU, H., TANG, M., XU, H., & TIAN, C. **A fully floating system for a wave energy converter with direct-driven linear generator**. *Energy*, 95, p. 99-109, 2016.
- [48] GARDNER, F. E. **Learning experience of AWS pilot plant test offshore Portugal**. In: Proceedings of 6th European wave energy conference. 2005, p. 149-54.
- [49] GASPAR, J. F., CALVÁRIO, M., KAMARLOUEI, M., & SOARES, C. G. **Power take-off concept for wave energy converters based on oil-hydraulic transformer units**. *Renewable Energy*, 86, p. 1232-1246, 2016.
- [50] GOLDEMBERG, JOSÉ. **The promise of clean energy**. *Energy policy*, v. 34, n. 15, p. 2185-2190, 2006.
- [51] **GOOGLE MAPS**, disponível em: <<https://www.google.com.br/maps>>. Acessado em: 11/04/2016.
- [52] HANSEN, RICO H.; KRAMER, MORTEN M.; VIDAL, ENRIQUE. **Discrete displacement hydraulic power take-off system for the wavestar wave energy converter**. *Energies*, v. 6, n. 8, p. 4001-4044, 2013.

- [53] **HAYDAC**, Disponível em: <<http://www.hydac.com/br-pt/produtos/acumuladores-hidraulicos.html>>, acessado em: 22/03/2016.
- [54] HEIN, KLAUS R.G. **Future energy supply in Europe**—challenge and chances. *Fuel*, v. 84, n. 10, p. 1189-1194, 2005.
- [55] HENDERSON, ROSS. **Design, simulation, and testing of a novel hydraulic power take-off system for the Pelamis wave energy converter**. *Renewable energy*, v. 31, n. 2, p. 271-283, 2006.
- [56] HOMSI, ALBERTO. **Wave climate in some zones off the Brazilian coast**. *Coastal Engineering Proceedings*, v. 1, n. 16, 1978.
- [57] **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)**, disponível em: <<http://brasilemsintese.ibge.gov.br/contas-nacionais/pib-valores-correntes.html>> . Acessado em: 11/04/2016.
- [58] IONUT-CRISTIAN, SCURTU. **A Survey of Developments in Wave Energy**. *Universitatii Maritime Constanta. Analele*, v. 14, n. 20, p. 103, 2013.
- [59] **ITAIPU**, Usina binacional, disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/noticia/itaipu-tem-oito-meses-historicos-com-recorde-de-69-milhoes-de-mwh>> . Acessado em 04/09/2016.
- [60] KIM, B. H., WATA, J., ZULLAH, M. A., AHMED, M. R., & LEE, Y. H. **Numerical and experimental studies on the PTO system of a novel floating wave energy converter**. *Renewable Energy*, 79, p. 111-121, 2015.
- [61] KOFOED, J. P., FRIGAARD, P., FRIIS-MADSEN, E., & SØRENSEN, H. C. **Prototype testing of the wave energy converter wave dragon**. *Renewable energy*, 31(2), 181-189, (2006).
- [62] LASA, J., ANTOLIN, J. C., ANGULO, C., ESTENSORO, P., SANTOS, M., & RICCI, P. **Design, construction and testing of a hydraulic power take-off for wave energy converters**. *Energies*, 5(6), 2030-2052, 2012.
- [63] LAVELLE, JOHN; KOFOED, JENS PETER. **Power production analysis of the OE buoy WEC for the cores project**. Department of Civil Engineering, Aalborg University, 2011.

- [64] LEWIS, A., ESTEFEN, S., HUCKERBY, J.. **Ocean Energy. In: IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation.** Cambridge and New York, p. 50, 2011.
- [65] LÓPEZ, I., ANDREU, J., CEBALLOS, S., DE ALEGRÍA, I. M., & KORTABARRIA, I. **Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment.** Renewable and sustainable energy reviews, 27, p. 413-434, 2013.
- [66] MACHADO, ALBINO PAIVA. **Geomorfologia, tipologia, vulnerabilidade erosiva e ocupação urbana das praias do litoral do Espírito Santo, Brasil.** Geografares, n. 2, 2001.
- [67] MARTINS, MAURO DANIEL SIMÕES SÃO BENTO. **Sistemas de aproveitamento da energia do mar.** 2009.
- [68] MARTINS, T. L.; VARGAS, VERA MF. **Riscos à biota aquática pelo uso de tintas anti-incrustantes nos cascos de embarcações.** Ecotoxicology and Environmental Contamination, v. 8, n. 1, p. 1-11, 2013.
- [69] MASUDA, YOSHIO; MCCORMICK, MICHAEL E. **Experiences in pneumatic wave energy conversion in Japan. In: Utilization of Ocean Waves - Wave to Energy Conversion.** ASCE, 1986. p. 1-33.
- [70] MAZZORANA, RAFAEL HILÁRIO FONSECA. **Modelagem dinâmica via fluxo de potência de reguladores de velocidade em usinas hidrelétricas.** Dissertação de Mestrado, Engenharia Mecânica, POSMEC/UFSC, 2008.
- [71] MICHELOTTI, ALVARO CANTO. **Modelagem dinâmica 1-D com validação experimental: estudo de caso no desenvolvimento de produto.** Dissertação de Mestrado, Engenharia Mecânica, POSMEC/UFSC, 2008.
- [72] MØRK, G., BARSTOW, S., PONTES, M. T. & KABUTH, A. **Assessing the global wave energy potential, in proceedings of OMAE 2010 (ASME), 29th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering',** Shangai, China, 2010.
- [73] NEWMAN, John Nicholas. **Marine hydrodynamics.** MIT press, 1977.

- [74] NEWMAN, JOHN NICHOLAS. **The exciting forces on fixed bodies in waves**. 2010.
- [75] O'CONNOR, M.; LEWIS, T.; DALTON, G. **Techno-economic performance of the Pelamis P1 and Wavestar at different ratings and various locations in Europe**. *Renewable energy*, v. 50, p. 889-900, 2013.
- [76] PAHL, GERHARD; BEITZ, WOLFGANG. **Engineering design: a systematic approach**. Springer Science & Business Media, 2013.
- [77] **PARKER**, disponível em: <
http://www.parker.com/literature/Brazil/Fluid_Connectors/4403-1_BR_altapressao.PDF > , acessado em: 15/05/2016.
- [78] PECHER, A., KOFOED, J. P., ESPEDAL, J., & HAGBERG, S. **Results of an experimental study of the langlee wave energy converter**. In The Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, (2010).
- [79] POLINDER, HENK; SCUOTTO, MATTIA. **Wave energy converters and their impact on power systems**. In: Future Power Systems, 2005. International Conference on. IEEE, 2005. p. 9 pp.-9.
- [80] PONTES, T. M. **Ocean energies: Resources and utilisation**. World Energy Council, 2001.
- [81] PRESS, F., SIEVER, R., GROTZINGER, J., & JORDAN, T. H. (2006). **Para entender a Terra**. Tradução Rualdo, Porto Alegre: Bookman, 2006.
- [82] **PROJEÇÃO DA DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA, Empresa de Pesquisa Energética (EPE)**, Ministério de Minas e Energia do Governo Federal, disponível em:
<<http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/DEA%2003-2015-%20Proje%C3%A7%C3%B5es%20da%20Demanda%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202015-2024.pdf> >. Acessado em: 11/01/2016.
- [83] RIBEIRO, LUCIANO MACIEL; DA COSTA BOTELHO, SILVIA SILVA; DUARTE FILHO, NELSON. **Avaliando a estratégia do Parque Tecnológico Oceantec a partir da utilização da ferramenta estrategigrama**. Simpósio de excelência em gestão e tecnologia, IX SEGET, 2012.

- [84] ROSA, PAULA BASTOS GARCIA. **Modelagem da dinâmica de um conversor hiperbárico de energia das ondas em energia elétrica.** Congresso Brasileiro de Automática, 2010.
- [85] ROSA, PAULA BASTOS GARCIA. **Modelagem dinâmica e otimização de sistemas de conversão de energia das ondas em energia elétrica.** 2013. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [86] SAINCHER, SHASWAT; BANERJEE, JYOTIRMAY. **Influence of wave breaking on the hydrodynamics of wave energy converters: A review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 58, p. 704-717, 2016.
- [87] SALCEDO, F., RUIZ-MINGUELA, P., RODRIGUEZ, R., RICCI, P., & SANTOS, M. (2009). **Oceantec: sea trials of a quarter scale prototype.** In *Proceedings of 8th European Wave Tidal Energy Conference* (pp. 460-5), 2009.
- [88] SANDERS, I., GARDINER, A., PENNY, G., & GORMAN, R. (2003). **New Zealand wave energy potential: Riding the crest of a wave or gone with the Wind,** 2003.
- [89] SANTOS-MUGICA, M., ROBLES, E., ENDEGNANEW, A. G., TEDESCHI, E., & GIEBHARDT, J.. **Grid integration and power quality testing of Marine Energy Converters: Research Activities in the MARINET project.** In *Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2014 Ninth International Conference on (pp. 1-9). IEEE, 2014.
- [90] SIFFERT, JOSÉ ROBERTO RUSCHEL. **Aspectos Regulatórios de Energia Renovável de Fontes Oceânicas.** 2010. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [91] SILVA, DINA; RUSU, EUGEN; SOARES, CARLOS GUEDES. **Evaluation of various technologies for wave energy conversion in the Portuguese nearshore.** Energies, v. 6, n. 3, p. 1344-1364, 2013.
- [92] SILVA, JONES SOUZA da. **Viabilidade de geração de energia elétrica através de ondas oceanicas no litoral norte do Rio Grande do Sul: estudo de um sistema híbrido de energias renováveis.** 2012.

- [93] SILVA, JONNY CARLOS da. **Virtual Environment for Dynamic Modelling of Multi-Domain Systems**. Proceedings of the 18th COBEM, 2005.
- [94] SO, R., CASEY, S., KANNER, S., SIMMONS, A., & BREKKEN, T. K. **PTO-Sim: Development of a power take off modeling tool for ocean wave energy conversion**. In *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting* (p. 1-5). IEEE, 2015.
- [95] SOUSA, J. B. C. D.; ARAUJO, T. D. ;FEITOSA, A. C., 2009. **Percepção ambiental na praia de boa viagem, são José de ribamar, maranhão**. Xiii Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada.
- [96] SOUZA, RONÍ de AZEVEDO. **Escolha de tecnologia de conversão da energia das ondas em energia elétrica**. 2011.
- [97] STRAUCH, J.C.S. **Estudo do clima ondulatório em Rio Grande**. Fundação Universidade Federal do Rio Grande do Sul – FURF. Rio Grande, 1999.
- [98] TEIXEIRA, L., SANTOS, P. R., PINTO, F. T., & RIBEIRO, J. P. **Estudo Experimental de um Novo Dispositivo de Aproveitamento da Energia das Ondas**. Doctoral dissertation, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Feup, Porto, 2012.
- [99] THORPE, TOM W. **A brief review of wave energy**. London, UK: Harwell Laboratory, Energy Technology Support Unit, 1999.
- [100] ULLMAN, DAVID G. **The mechanical design process**. New York: McGraw-Hill, p. 337, 1992.
- [101] VAN WYLEN, G. J., SONNTAG, R. E., BORGNAKKE, C. J., RICHARD, E. S., WHITTEN, K. W. D., GAILEY, R. E., ... & BROWN, C. J. T. L. **Fundamentos de termodinâmica** (No. 536.7). Limusa, 1995.
- [102] VEIGAS, M., LOPEZ, M., ROMILLO, P., CARBALLO, R., CASTRO, A., & IGLESIAS, G. **A proposed wave farm on the Galician coast**. *Energy Conversion and Management*, 99, 102-111, 2015.
- [103] VICINANZA, D., MARGHERITINI, L., KOFOED, J. P., & BUCCINO, M. **The SSG wave energy converter: Performance, status and recent developments**. *Energies*, 5(2), 193-226, 2012.

- [104] VON LINSINGEN, Irlan. **Fundamentos de sistemas hidráulicos**. Universidade Federal de Santa Catarina, editor UFSC, 4^o edição, 2013.
- [105] WATERS, R., STÅLBERG, M., DANIELSSON, O., SVENSSON, O., GUSTAFSSON, S., STRÖMSTEDT, E., ... & LEIJON, M. **Experimental results from sea trials of an offshore wave energy system**. Applied Physics Letters, , v. 90, n. 3, p. 034105, 2007.
- [106] **WAVE STAR ENERGY**, disponível em:
<<http://wavestarenergy.com/>>. Acessado em: 30/08/2015.
- [107] WEBER, J., MOUWEN, F., PARISH, A., & ROBERTSON, D. (2009). **Wavebob—research & development network and tools in the context of systems engineering**. In *Proc. Eighth European Wave and Tidal Energy Conference, Uppsala, Sweden, 2009*.
- [108] WEINSTEIN, A., FREDRIKSON, G., PARKS, M. J., & NIELSEN, K. (2004). **AquaBuOY—the offshore wave energy converter numerical modeling and optimization**. In *OCEANS'04. MTS/IEEE TECHNO-OCEAN'04* (Vol. 4, pp. 1854-1859). IEEE, 2004.
- [109] WHITTAKER, T., COLLIER, D., FOLLEY, M., OSTERRIED, M., HENRY, A., & CROWLEY, M. **The development of Oyster—a shallow water surging wave energy converter**. In *Proceedings of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference, Porto, Portugal* (p. 11-14), 2007.
- [110] WRIGHT, JOHN; COLLING, ANGELA; PARK, DAVE. **Waves, tides, and shallow-water processes**. Gulf Professional Publishing, 1999.
- [111] YANG, LIMIN; HALS, JORGEN; MOAN, TORGEIR. **Analysis of dynamic effects relevant for the wear damage in hydraulic machines for wave energy conversion**. Ocean Engineering, v. 37, n. 13, p. 1089-1102, 2010.
- [112] YANG, LIMIN; MOAN, TORGEIR. **Dynamic analysis of wave energy converter by incorporating the effect of hydraulic transmission lines**. Ocean Engineering, v. 38, n. 16, p. 1849-1860, 2011.
- [113] YU, Z.; FALNES, J. **State-space modelling of a vertical cylinder in heave**. Applied Ocean Research, v. 17, n. 5, p. 265-275, 1995.

8 ANEXO A: CONVERSORES DO TIPO CORPO OSCILANTE

Um conversor do tipo corpo oscilante flutuante foi projetado pela Universidade de Uppsala na Suécia em 2002. O projeto em escala real da usina de ondas foi instalada inicialmente a uma profundidade de 25 m, 2 km da costa oeste sueca na proximidade de Lysekil. Este sistema utiliza um gerador elétrico linear fixado ao fundo do oceano, uma mola é responsável por restaurar a posição inicial do flutuador após a passagem da onda e um cabo é conectado do gerador a boia localizada na superfície do oceano, o esquema de funcionamento é mostrado na Figura 8.1.

O movimento do ímã de translação varia em velocidade e direção quando a bóia sobe ou desce devido as ondas, este movimento resulta em uma forma pulsante da tensão de saída, como uma consequência direta da lei de Faraday. Por utilizar a conversão de energia através de um gerador linear o sistema não necessita de caixas de redução mecânica, sendo assim pode ser relativamente pequeno quando comparado com outros projetos. No entanto, a tensão gerada deve ser retificada de acordo com os requisitos da rede elétrica (WATERS *et al.*, 2007).

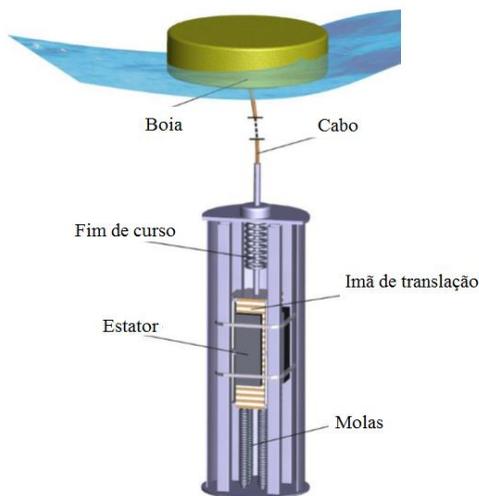


Figura 8.1: Conversor Sueco. Fonte: Walters *et al.*, 2007.

Seabased é um dispositivo do tipo corpo oscilante flutuante que utiliza um gerador elétrico linear fixado ao fundo do oceano para geração de energia elétrica. O gerador do sistema foi projetado para produzir 10kW de potência a uma velocidade de translação de 07 m/s, com uma eficiência de 86%.

A tensão gerada é retificada por pontes de diodos, as flutuações de potência são suavizadas utilizando capacitores. O sistema foi otimizado para operar na costa oeste da Suécia. Utilizando-se transmissão de potência através de geradores elétricos lineares é possível transmitir potência com uma menor quantidade de partes mecânicas, que possuem ciclo de vida limitado devido ao desgaste das superfícies moveis, sendo assim, o custo do projeto e as despesas com manutenção são reduzidas (BOSTRÖM *et al.*, 2009).

O Archimedes Wave Swing (AWS), um dispositivo totalmente submerso, foi desenvolvido na Holanda. O sistema é composto por uma parte oscilante superior (o flutuador) e uma parte inferior fixa-inferior. O flutuador é movido verticalmente devido a diferença de pressão criada pela passagem da onda, o movimento é convertido em energia através de um gerador elétrico linear, a pressão interna do ar atua como uma mola restaurando a posição de equilíbrio após a passagem da onda (Figura 8.2 (a)). Este tipo de dispositivo é implementado em zonas *offshore*, de profundidades que entre 40-80 m (DE SOUSA PRADO, 2006; MARTINS, 2009). Em 2004 o primeiro protótipo com capacidade de 2MW foi instalado na costa norte de Portugal (Figura 8.2 (b)) (GARDNER, 2005).

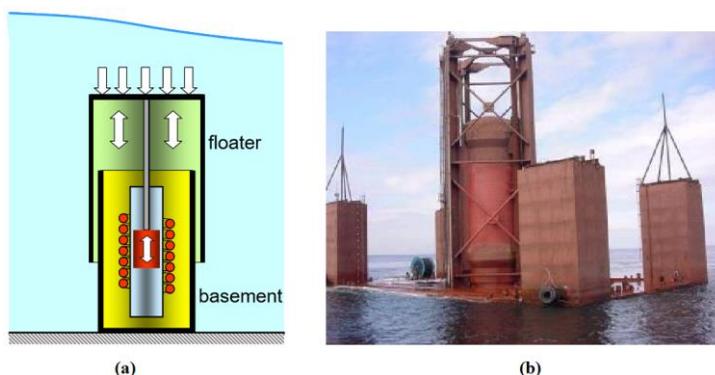


Figura 8.2: Arquimedes Wave Swing (AWS), (a) princípio de funcionamento, (b) protótipo instalado em Portugal. Fonte Gardner, 2005

Pontoon é um conversor do tipo corpo flutuante, com múltiplos flutuadores, conectados por uma estrutura submersa de referência. Os flutuadores são conectados a estrutura submersa por um sistema hidráulico que é responsável por transmitir potência (Figura 8.3). A área total estimada para o sistema é de 4800 m² e massa em torno de 5200 toneladas (BABARIT *et al.*, 2012).

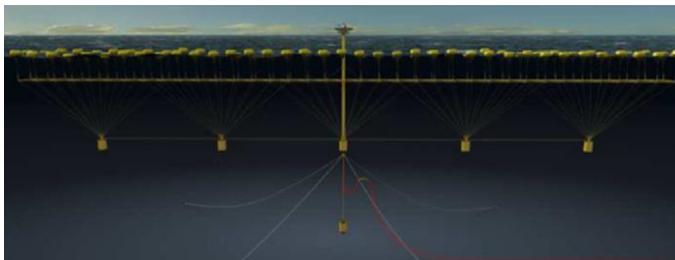


Figura 8.3: Pontoon. Fonte: Babarit *et al.*, 2012.

Wavebob é um projeto para produção de energia através de ondas oceânicas do tipo corpo oscilante flutuante que utiliza dois flutuadores para geração de energia. O flutuador externo, considerado como estrutural e atua como referência para o movimento do flutuador interno, o movimento relativo entre os flutuadores é convertido em potência através de um sistema hidráulico (Figura 8.4). O primeiro modelo em escala 1:4 foi testado no mar em 2007 (WEBER *et al.*, 2009).

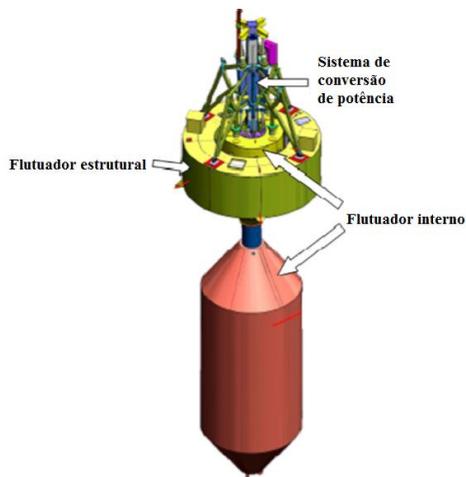


Figura 8.4: Wavebob Fonte: Weber *et al.*, 2009.

Langlee é conversor de energia de ondas oceânicas que extrai energia cinética do movimento orbital das partículas de água em uma onda através de pás que podem girar em torno de uma rótula comum. O sistema possui dois pares de pás dispostos simetricamente, montados em uma estrutura de referência, o sistema é fixo ao fundo do oceano através de cabos (Figura 8.5).

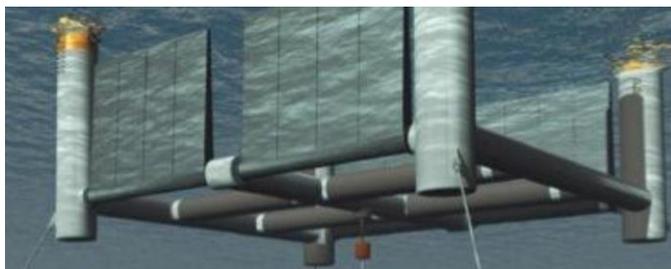


Figura 8.5: Langlee. Fonte: Pecher *et al.*, 2010.

Em 2010 um modelo em escala foi testado na Universidade de Aalborg na Dinamarca. As pás do modelo foram projetadas com dimensões de 1,25m x 1,25m. Os testes mostraram que a maior performance do dispositivo foi obtida com um período de 1,3 s e um comprimento de onda de 2,52 m (o dobro do tamanho das pás). Os testes realizados no modelo mostram que o aumento da amplitude das ondas incidentes não acarretou em aumento significativo da potência gerada

pelo dispositivo. A restrição ao movimento do sistema, proporcionado pelo sistema de amarração aumentou significativamente o desempenho do projeto. O ângulo de ataque da onda sobre as pás é crucial no desempenho do projeto. Observou-se que a máxima potência é extraída utilizando ondas paralelas ao movimento das pás (PECHER *et al.*, 2010).

CETO é um projeto do tipo Corpo Oscilante com flutuador totalmente submerso foi desenvolvido na Austrália, o movimento do flutuador devido a passagem da onda aciona um pistão que move a água em um circuito fechado até uma turbina do tipo Pelton (Figura 8.6). Em 2011 foi testado um dispositivo com 7 m de diâmetro com uma potência de 80 kW (ANTONIO, 2014).



Figura 8.6: CETO. Fonte: Antonio, 2014.

Na Figura 8.7 é mostrado o princípio de funcionamento do projeto Australiano, os com a passagem da onda o flutuador submerso varia de

posição verticalmente acionando um cilindro que pressuriza a água em um circuito fechado, a água a alta pressão é levada até uma turbina do tipo Pelton, a água a baixa pressão retorna ao circuito hidráulico onde será novamente bombeada pelos atuadores hidráulicos (CETO ENERGY, 2015).



Figura 8.7: Princípio de funcionamento. Fonte: CETO ENERGY, 2015.

Oceantec é um conversor de energia a partir de ondas oceânicas do tipo corpos oscilante flutuante. A transmissão de potência é baseada em um sistema giroscópio, que acoplado a um volante de inércia aciona um gerador elétrico convencional. O volante de inércia possui a função armazenar energia, proporcionando uma rotação contínua ao gerador elétrico. O sistema de conversão de energia localiza-se no interior da estrutura, ficando protegido contra condições oceânicas extremas.

Para maximizar a conversão de energia o giroscópio é alinhado à frente de onda. A estrutura externa é otimizada para maximizar o movimento oscilatório, para assim, gerar uma maior rotação do giroscópio, gerando assim uma maior quantidade de potência. O projeto foi concebido para atuar no clima de ondas da costa norte da Espanha, com períodos entre 10 e 12 s. Um protótipo em escala de 1:4 foi testado em 2009 (Figura 8.8).



Figura 8.8: Protótipo Ocean Tec. Fonte: Salcedo *et al.*, 2009.

O protótipo possui 11,25 m de comprimento, 1,875 m de largura e 1,313 m de altura com cerca de 18,5 toneladas, com potência entre 5 a 10 kW (SALCEDO *et al.*, 2009). Bracco *et al.* (2011) apresenta detalhes sobre o giroscópio utilizado neste tipo de concepção de projeto. A versão em tamanho real possui capacidade de 500kW com de 45 m de comprimento e 7,5 m de largura, o investimento total no projeto, da etapa de protótipo até a escala real foi cerca de 4,5 milhões de Euros (CHOZAS, 2009).

Aquabuoy é um conversor de energia do tipo corpo oscilante flutuante, o sistema consiste em um flutuador conectado a uma tubulação vertical aberta em ambas extremidades chamada de tubo de aceleração. A água do oceano move-se de acordo com o movimento do flutuador, o movimento do flutuador aciona uma bomba hidráulica que direciona o fluxo de água presente no tubo de aceleração a uma turbina Pelton (Figura 8.9). O flutuador possui dimensões entre 4,5 a 6 m. O conversor foi projetado para atuar em águas profundas, estima-se que se instalado na costa oeste do Canadá e USA, uma unidade do dispositivo pode gerar cerca de 250 kW de potência (WEINSTEIN, *et al.*, 2004).

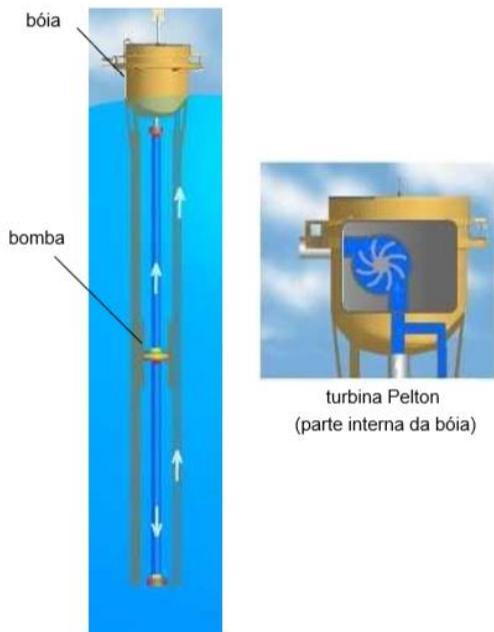


Figura 8.9: Projeto Aquabuoy. Fonte: Rosa, 2013.

9 ANEXO B: MATRIZES DE POTÊNCIA

De acordo com o binário altura significativa (H_s) e período (T_e ou T_p) é possível estimar a potência que será desenvolvida por um dado conversor em um determinado estado oceânico. Somando-se a quantidade de hora de cada estado oceânico, é possível estimar a energia gerada por um conversor ao longo do ano. As Tabelas de 9.1 a 9.15 representam a matrizes de potência dos dispositivos selecionadas, Aquabuoy, Arquimedes Wave Swing (AWS), CAO, CETO, Langlee, Oceantec, OE Buoy, Oyster, Pelamis P750, Pontoon, Seabased, SSG, Wave Dragon, Wavestar e Wavebob respectivamente. As unidades de potência estão em kW em todas as matrizes, na aba superior pode-se encontrar o nome do conversor e a classificação.

Tabela 9.1: Matriz de Potência do Projeto Aquabuoy (kW).

Fonte: Weinstein *et al.*, 2004.

Projeto: Aquabuoy		Classificação: Corpo Oscilante Flutuante															
		Tp(s)															
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17			
Hs(m)	1	0	0	8	11	12	11	10	8	7	0	0	0	0			
	1,5	0	13	17	25	27	26	23	19	15	12	12	12	7			
	2	0	24	30	44	49	47	41	34	28	23	23	23	12			
	2,5	0	37	47	69	77	73	64	54	43	36	36	36	19			
	3	0	54	68	99	111	106	92	77	63	51	51	51	27			
	3,5	0	0	93	135	152	144	126	105	86	70	70	70	38			
	4	0	0	0	122	176	198	188	164	137	112	91	91	49			
	4,5	0	0	0	223	250	239	208	173	142	115	115	115	62			
	5	0	0	0	250	250	250	250	214	175	142	142	142	77			
	5,5	0	0	0	250	250	250	250	250	211	172	172	172	92			

Tabela 9.2: Matriz de Potência do projeto Archimedes Wave Swing (kW).

Fonte: Diaconu *et al.*, 2013.

		Projeto: Archimedes Wave Swing Classificação: Corpo Oscilante Submerso																				
		Te(s)																				
Hs (m)		5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5	15
		0,5	0	7	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	2	15	28	19	26	34	41	48	58	68	81	93	105	118	131	144	153	163	183	203	213	0
1,5	4	26	49	41	56	72	85	99	121	143	173	203	226	248	266	285	309	334	357	380	389	0
2	15	43	78	73	100	127	150	172	210	247	292	337	366	395	418	442	482	523	543	563	579	0
2,5	25	61	111	113	159	205	234	263	320	376	438	499	531	563	603	643	675	708	741	774	785	0
3	35	92	155	161	227	293	339	386	453	521	600	680	722	765	827	888	897	906	945	984	996	0
3,5	35	114	194	218	305	391	454	517	605	694	772	851	913	975	1036	1096	1119	1141	1163	1185	1198	0
4	0	0	235	273	380	486	572	659	776	894	961	1027	1103	1179	1227	1275	1316	1357	1365	1374	1394	0
4,5	0	0	280	332	479	626	722	819	957	1096	1168	1240	1320	1401	1449	1497	1547	1598	1590	1583	1610	0
5	0	0	320	400	592	784	899	1014	1144	1274	1380	1487	1569	1651	1691	1731	1785	1838	1807	1777	1806	0
5,5	0	0	0	432	641	849	1033	1216	1331	1446	1568	1690	1778	1867	1919	1970	1977	1984	1994	2005	2017	0
6	0	0	0	0	680	944	1155	1367	1495	1623	1759	1895	1983	2072	2137	2202	2205	2207	2226	2246	2240	0
6,5	0	0	0	0	0	720	1123	1335	1547	1678	1809	1963	2116	2200	2284	2332	2380	2425	2470	2452	2434	2403

Tabela 9.3: Matriz de potência para um conversor do tipo CAO genérico utilizando uma turbina do tipo Wells (kW). Fonte: Veigas *et al.* (2015).

Projeto: CAO		Classificação: CAO com estrutura fixa e turbina Wells											
Hs(m)		Te(s)											
		5	6,2	7,3	8,4	9,5	10,6	11,8	12,9	14	15,1	16,2	17,4
Hs(m)	0,5	83,2	74,3	66,66	60	54,4	49,6	45,5	42	38,9	36,2	33,9	31,9
	1,5	0	74,3	66,66	60	54,4	49,6	45,5	42	38,9	36,2	33,9	31,9
	2,5	0	0	66,66	60	54,4	49,6	45,5	42	38,9	36,2	33,9	0
	3,5		0	0	0	54,4	49,6	45,5	42	38,9	36,2	33,9	0
	4,5		0	0	0	0	49,6	45,5	42	38,9	36,2	33,9	0
	5,5		0	0	0	0	0	0	42	38,9	36,2	0	0

Tabela 9.4: Matriz de Potência para o Projeto CETO (kW).

Fonte: Babarit *et al.* (2012).

Projeto: CETO		Classificação: Corpo Oscilante Submerso														
Hs(m)		Tp(s)														
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
Hs(m)	1	5	9	9	10	7	6	5	4	3	3	2	2	1		
	1,5	12	19	22	20	15	13	10	8	6	6	4	3	3		
	2	13	32	38	32	25	23	17	13	11	9	7	7	5		
	2,5	0	48	54	47	41	33	26	20	17	14	10	9	8		
	3	0	65	75	68	56	46	36	26	23	18	15	10	10		
	3,5	0	0	97	86	71	62	46	33	29	23	20	15	13		
	4	0	0	119	121	97	69	58	47	38	31	27	21	16		
	4,5	0	0	147	146	107	93	74	61	48	37	33	26	21		
	5	0	0	156	174	139	116	83	63	59	45	38	25	22		
	5,5	0	0	0	201	164	133	89	79	66	54	41	35	28		
	6	0	0	0	216	197	153	127	88	79	65	46	40	33		
	6,5	0	0	0	244	209	175	151	113	95	76	55	44	39		
	7	0	0	0	260	209	183	157	114	103	82	62	51	42		

Tabela 9.5: Matriz de Potência do Projeto Langlee (kW).

Fonte: Babarit *et al.* (2012).

Projeto: Langlee Classificação: Corpo Oscilante Submerso Rotacional																
		Tp(s)														
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
Hs(m)	1	19	29	47	57	52	37	29	20	17	13	9	7	7		
	1,5	42	63	92	111	109	65	56	38	29	22	19	13	11		
	2	66	99	151	201	165	105	85	59	52	41	23	21	19		
	2,5	0	160	242	262	226	166	118	83	70	57	39	29	26		
	3	0	213	319	372	327	211	152	116	94	75	66	45	42		
	3,5	0	0	436	503	408	293	203	148	115	93	75	58	44		
	4	0	0	554	540	521	355	261	192	144	123	84	81	56		
	4,5	0	0	645	746	587	379	302	236	190	154	106	90	74		
	5	0	0	796	926	695	486	341	287	211	168	136	111	94		
	5,5	0	0	0	955	808	603	430	343	231	201	150	120	97		
	6	0	0	0	1161	957	642	481	329	289	212	172	146	111		
	6,5	0	0	0	1476	1039	702	488	397	312	237	204	153	120		
	7	0	0	0	1665	1197	821	612	466	385	252	223	181	146		

Tabela 9.6: Matriz de Potência do Projeto Oceantec (kW).

Fonte: Diaconu *et al.*, 2013.

Projeto: Oceantec Classificação: Corpo Oscilante Rotacional												
		Tp(s)										
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Hs(m)	1	85	87	59	39	25	16	10	7	5	3	
	1,5	191	196	133	89	57	36	23	15	10	7	
	2	337	348	234	158	101	64	41	27	18	12	
	2,5	500	500	364	245	158	101	65	42	28	19	
	3	500	500	500	337	228	145	93	61	41	28	
	3,5	500	500	500	420	309	196	127	83	55	38	
	4	500	500	500	500	401	258	166	109	72	49	
	4,5	500	500	500	500	500	326	210	138	92	62	
	5	500	500	500	500	500	383	259	170	113	77	
	5,5	500	500	500	500	500	389	308	205	137	93	

Tabela 9.7: Matriz de Potência do Projeto OE Buoy (kW).

Fonte: Babarit *et al.* (2012).

Projeto: OE Buoy Classificação: CAO														
		Tp(s)												
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Hs(m)	1	8	17	27	42	56	59	52	44	40	38	40	38	30
	1,5	17	39	61	96	126	132	117	99	89	87	89	85	66
	2	30	69	108	170	224	235	208	177	159	154	159	151	118
	2,5	47	108	169	266	350	368	324	276	249	241	248	236	185
	3	68	155	244	383	504	530	467	398	358	347	357	340	266
	3,5	93	212	332	521	686	721	636	542	487	472	486	463	362
	4	121	276	433	680	896	942	831	708	636	616	634	605	473
	4,5	154	350	548	861	1130	1190	1050	896	805	780	803	765	599
	5	190	432	677	1060	1400	1470	1300	1110	994	963	991	945	739
	5,5	0	523	819	1290	1690	1780	1570	1340	1200	1170	1200	1140	894
	6	0	622	975	1530	2020	2120	1870	1590	1430	1390	1430	1360	1060
	6,5	0	730	1140	1800	2370	2490	2190	1870	1680	1630	1670	1600	1250
	7	0	847	1330	2080	2750	2880	2540	2170	1950	1890	1940	1850	1450

Tabela 9.8: Matriz de Potência do Projeto Oyster (kW).

Fonte: Babarit *et al.* (2012).

Projeto: Oyster Classificação: Corpos Oscilante Rotacional Submerso														
		Tp(s)												
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Hs(m)	1	27	39	57	76	87	104	109	100	101	98	94	94	87
	1,5	63	92	126	168	201	213	201	239	207	198	183	150	154
	2	75	160	233	301	380	408	383	399	329	365	319	265	259
	2,5	0	254	378	467	568	623	616	601	519	523	481	390	428
	3	0	368	503	693	799	824	876	792	759	704	546	579	554
	3,5	0	0	655	934	1032	1085	1241	1075	973	925	862	747	688
	4	0	0	843	1093	1352	1427	1430	1390	1158	1224	1139	1138	863
	4,5	0	0	1219	1408	1644	1677	1807	1641	1662	1562	1404	1370	1191
	5	0	0	1247	1670	1965	1962	2097	2002	1833	1798	1814	1459	1442
	5,5	0	0	0	1979	2339	2308	2115	2389	2120	2012	1940	1518	1587
	6	0	0	0	2406	2713	2776	2344	2705	2451	2396	2182	2414	2133
	6,5	0	0	0	2778	3044	3001	2989	3211	2986	2896	2716	2455	2309
	7	0	0	0	2871	3119	3131	3127	3176	3332	2877	2925	2676	2658

Tabela 9.9: Matriz de Potência do Projeto Pelamis P750 (kW).

Fonte: Modificado de Dalton *et al.*, 2010.

Projeto: Pelamis		Classificação: Corpo Oscilante Flutuante Rotacional.																	
		Te(s)																	
		5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	
Hs(m)	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	1	0	22	29	34	37	38	38	37	35	32	29	26	23	21	0	0	0	
	1,5	32	50	65	76	83	86	86	83	78	72	65	59	53	47	42	37	33	
	2	57	88	115	136	148	153	152	147	138	127	116	104	93	83	74	66	59	
	2,5	89	138	180	212	231	238	238	230	216	199	181	163	146	130	116	103	92	
	3	129	198	260	305	332	340	332	315	292	266	240	219	210	188	167	149	132	
	3,5	0	270	354	415	438	440	424	404	377	362	326	292	260	230	215	202	180	
	4	0	0	462	502	540	546	530	499	475	429	384	366	339	301	267	237	213	
	4,5	0	0	544	635	642	648	628	590	562	528	473	432	382	356	338	300	266	
	5	0	0	0	739	726	731	707	687	670	607	557	521	472	417	369	348	328	
	5,5	0	0	0	750	750	750	750	750	750	737	667	658	586	530	496	446	395	355
	6	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	711	633	619	558	512	470	415	
	6,5	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	750	743	658	621	579	512	481	
	7	0	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	750	750	676	613	584	525	
	7,5	0	0	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	750	750	686	622	593	
	8	0	0	0	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	750	750	690	625	

Tabela 9.10: Matriz de Potência do Projeto Pontoon (kW).

Fonte: Babarit *et al.* (2012).

Projeto: Pontoon		Classificação: Corpo Oscilante Flutuante															
		Tp(s)															
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16			
Hs(m)	1	180	166	153	171	125	87	72	65	85	85	37	29	16			
	1,5	223	195	157	148	261	192	223	139	155	155	74	67	46			
	2	0	0	214	227	396	335	237	235	172	138	115	104	70			
	2,5	0	0	0	440	598	514	379	342	204	169	142	128	95			
	3	0	0	0	681	801	735	594	486	199	174	151	134	121			
	3,5	0	0	0	904	1035	949	788	617	239	209	183	164	146			
	4	0	0	0	1131	1269	1163	982	743	285	248	216	195	175			
	4,5	0	0	0	1358	1488	1374	1187	869	330	287	250	225	201			
	5	0	0	0	1585	1712	1585	1392	988	380	334	285	263	226			
	5,5	0	0	0	1812	1937	1798	2138	1107	429	381	323	301	261			
	6	0	0	0	2040	2162	2010	2884	1234	439	416	361	336	295			
	6,5	0	0	0	2267	2386	2221	3143	1360	449	450	406	372	329			
	7	0	0	0	2494	2611	2433	3619	1483	506	464	451	408	363			

Tabela 9.11: Matriz de Potência do Projeto Seabased (kW).

Fonte: Babarit *et al.* (2012).

Projeto: Seabased		Classificação: Corpo Oscilante Flutuante													
		Tp(s)													
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
Hs(m)	1	1,2	1,3	1,2	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	0,7	
	1,5	2,6	2,5	2,3	2,2	2,3	2	1,9	1,7	1,4	1,5	1,2	1,2	1,2	
	2	4,4	4	3,7	3,6	3,5	3,1	2,8	2,5	2,3	2,2	2	1,8	1,7	
	2,5	0	6	5,2	4,5	4,6	4,3	3,9	3,6	3	2,8	2,5	2,7	2,6	
	3	0	7,4	6,7	6,2	5,7	5,4	4,7	4,1	4,1	3,7	3,3	3,3	3,2	
	3,5	0	0	8,4	7,3	6,9	5,8	5,4	4,9	4,4	4,2	3,7	3,4	3,6	
	4	0	0	8,9	8,6	7,6	6,8	6,2	5,6	5	4,6	4,5	4,3	3,6	
	4,5	0	0	11	9,5	8,7	7,6	7	6,1	5,9	5,4	5,1	5	4,7	
	5	0	0	12	11	9,8	8,6	7,3	7,2	6,3	5,9	5,7	5,4	5	
	5,5	0	0	0	11	10	8,9	8,1	7,5	6,8	6,4	6,1	5,5	5,8	
	6	0	0	0	13	11	10	9,1	8,3	7,5	6,7	6,9	6,4	5,8	
	6,5	0	0	0	14	12	10	9,8	9	7,6	7,3	7,5	6,2	6,4	
	7	0	0	0	15	13	11	10	8,8	8,6	8,2	7,6	7,3	6,8	

Tabela 9.14: Matriz de Potência do Projeto Wavebob (kW).

Fonte: Babarit *et al.* (2012).

Projeto: Wavebob		Classificação: Corpo Oscilante Flutuante														
		Tp(s)														
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
Hs(m)	1	6	11	19	25	30	44	50	53	44	34	22	20	17		
	1,5	13	25	43	55	68	90	102	92	91	66	65	45	37		
	2	24	45	65	100	121	153	175	151	122	126	87	61	58		
	2,5	0	65	104	141	191	179	243	255	190	181	135	99	83		
	3	0	96	137	205	244	357	293	353	260	248	184	137	120		
	3,5	0	0	192	254	291	431	385	424	314	285	239	222	172		
	4	0	0	256	366	403	551	536	531	473	420	289	268	179		
	4,5	0	0	327	418	574	678	708	665	509	415	386	244	249		
	5	0	0	358	514	658	824	828	618	638	512	452	384	333		
	5,5	0	0	0	610	774	880	936	905	805	603	456	397	311		
	6	0	0	0	711	952	974	1000	838	886	648	501	503	396		
	6,5	0	0	0	788	1000	1000	1000	979	1000	727	577	435	424		
	7	0	0	0	871	1000	1000	1000	1000	1000	959	748	574	472		

Tabela 9.15: Matriz de Potência do Projeto Wavestar (kW).
 Fonte: Babarit *et al.* (2012).

		Projeto: Wavestar Classificação: Corpo Oscilante Flutuante														
		Tp(s)														
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
Hs(m)	1	63	92	85	73	63	60	60	53	47	48	46	42	37		
	1,5	134	174	181	160	141	124	118	115	100	89	77	94	80		
	2	207	313	296	275	250	223	229	229	200	161	148	180	153		
	2,5	0	463	462	396	393	379	320	370	306	294	225	236	228		
	3	0	653	641	602	557	555	460	471	461	393	437	381	325		
	3,5	0	0	900	848	785	717	662	656	557	551	571	580	478		
	4	0	0	1123	1098	1030	984	799	857	821	830	637	592	652		
	4,5	0	0	1339	1339	1002	1181	1050	1140	1012	848	863	672	828		
	5	0	0	1689	1518	1403	1318	1248	1348	1115	1176	825	890	982		
	5,5	0	0	0	1943	1749	1517	1477	1374	1395	1376	1089	1212	1117		
6	0	0	0	2192	2144	1618	1789	1586	1634	1783	1585	1346	1313			
6,5	0	0	0	2335	2162	1975	1962	1857	1660	1491	1619	1336	1668			
7	0	0	0	2709	2437	2449	2262	2205	1900	2292	1785	1443	1750			

10 APÊNDICE A

Este apêndice trata-se de uma lista completa dos itens, submodelos e parâmetros utilizados nas simulações em AMESim versão 2014. A Tabela 10.1 mostra alguns itens, submodelos e parâmetros em comum entre os projetos CO-TLH e CO-TH. A Tabela 10.2 e 10.3 mostram os itens, submodelos e parâmetros do projeto CO-TLH e CO-TH, respectivamente. Os parâmetros não listados foram mantidos como padrão no software.

Tabela 10.1: Itens, submodelos e parâmetros comuns entre os projetos CO-TLH e CO-TH.

Projeto CO-TLH e CO-TH			
Item	Ícone	submodelo	Parâmetros modificados
Fluido hidráulico		FP04	
Reservatório		TK00	
Inércia com atrito		RL00	
Sensor de torque		MECTSOB	
Sensor de rotação		MECRSOB	
Porta de multiplicação		MUL00	
Função		FX00	
Ganho		GA00	K=0,104717, fator de conversão para kW.
Sink		SSINK	

Tabela 10.2: Itens, submodelos e parâmetros do projeto CO-THL.

Projeto CO-THL			
Item	Ícone	submodelo	Parâmetros modificados
Sinal senoidal		SIN0	Amplitude calculada conforme a equação 3.7, período de onda variado.
Transdutor de força		FORC	
Massa		MASS002	Massa total: 115087.2 kg Inclinação -90°
Conector mecânico		LCON13	
Mola		SPR00A	$k=126354 \text{ N/m}$, modela a força de restauração hidrodinâmica, calculada conforme seção 3.3.
Amortecimento viscoso		DAM0000	$B=1029491,9 \text{ N/(m.s)}$, calculado conforme equação 6.1.
Braço mecânico		LML031	L1=8 m L2=1 m
Atuador hidráulico (motor linear)		HJ021	Diâmetro do pistão = 280mm Diâmetro da haste = 200 mm Curso = 616mm
Tubulação hidráulica		HL001	comprimento =15 m diâmetro= 50mm
Válvula de retenção		CV002	
Válvula de alívio		RV00	Pressão de abertura = 450 bar
Acumulador hidráulico		HA001	Volume = 130 l Pré-carga = 200 bar Adiabático
Motor hidráulico		HYPFPM01M	Deslocamento volumétrico de: $160,4 \text{ cm}^3/\text{rot}$ Eficiência volumétrica de 0,9 Eficiência mecânica de 0,9

Tabela 10.3: Itens, parâmetros e submodelos do projeto CO-TH parte 1.

Projeto CO-TH			
Item	Ícone	submodelo	Parâmetros modificados
Sinal senoidal		SIN0	Amplitude calculada conforme a equação 3.7, período de onda variado.
Transdutor de força		FORC	
Massa		MASS002	Massa total: 115087.2 kg Inclinação -90°
Conector mecânico		LCON13	
Mola		SPR00A	k=126354 N/m, modela a força de restauração hidrodinâmica, calculada conforme seção 3.3.
Amortecimento viscoso		DAM0000	B=1029491,9 N/(m.s), calculado conforme equação 6.1.
Redução		RN001A	Relação de transmissão 4
Pinhão e cremalheira		RACK00A	
Bomba hidráulica bidirecional		HYDFPM01P	Deslocamento volumétrico de: 160,4 cm³/rot Eficiência volumétrica de 0,9 Eficiência mecânica de 0,9
Tubulação hidráulica		HL001	comprimento =15 m diâmetro= 50mm
Válvula de retenção		CV002	
Válvula de alívio		RV00	Pressão de abertura = 450 bar
Acumulador hidráulico		HA001	Volume = 130 l Pré-carga = 200 bar Adiabático
Motor hidráulico		HYPPFM01M	Deslocamento volumétrico de: 160,4 cm³/rot Eficiência volumétrica de 0,9 Eficiência mecânica de 0,9

