



**PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**ESTUDO DOS CONVERSORES DE ENERGIA  
ONDOMOTRIZ EM ENERGIA ELÉTRICA**

Por:  
**Carlos Eduardo Barretto Dantas**

Brasília, 26 de Junho de 2015.

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**ESTUDO DOS CONVERSORES DE ENERGIA  
ONDOMOTRIZ EM ENERGIA ELÉTRICA**

POR:

**Carlos Eduardo Barretto Dantas**

Relatório submetido como requisito para obtenção  
do grau de Engenheiro Mecânico.

**Banca Examinadora**

Prof. Jorge Luiz de Almeida Ferreira  
UnB/ ENM (Orientador)

---

Prof.<sup>a</sup> Aida Alves Fadel  
UnB/ ENM

---

Prof.<sup>a</sup> Dianne Magalhães Viana  
UnB/ ENM

---

Brasília, 26 de Junho de 2015.

## **Agradecimentos**

*Gostaria de agradecer primeiramente a Deus e aos santos que sempre me acompanham e me guiam em minhas jornadas juntamente com meus orixás. Agradeço a minha esposa Fabrícia por estar sempre ao meu lado me apoiando e me dando força sempre que necessito com muito amor, aos meus pais por me ajudarem, me criarem e por terem me ensinado tudo o que sei hoje, pois se hoje cheguei onde estou é por conta deles, aos meus irmãos que estão sempre ao meu lado quando preciso, aos meus amigos Fernando e Luís que lutaram junto comigo para que conseguíssemos formar e aos meus amigos e familiares que contribuíram para que eu conseguisse conquistar mais uma vitória. Um obrigado especial para minha tia Amélia que me ajudou muito quando precisei. Não pude agradecer a ela pessoalmente, mas tenho certeza que ela sabe o quanto estou agradecido, mesmo ela estando agora ao lado de Deus. Obrigado a todos de coração.*

*Carlos Eduardo Barretto Dantas*

---

## RESUMO

Um dos principais problemas encontrados hoje está relacionado à geração de energia no futuro, pois o crescente uso de combustíveis fósseis tem ocasionado um grande impacto ambiental. Estudos mostram que até o ano de 2030 será necessário o investimento em outras fontes de energia além das fósseis e usinas hidrelétricas, atualmente as mais utilizadas no Brasil, priorizando as fontes de energia renovável e o custo benefício. Diversos países podem suprir parte da demanda energética através da energia proporcionada pelas ondas oceânicas, pois alguns locais possuem ondas oceânicas com alto potencial energético. Através das análises destes trabalhos e estudos, este projeto irá apresentar quatro alternativas de conversores ondomotriz, que possuem uma melhor adaptação ao cenário brasileiro. A seguir será feita uma análise técnica e de custos destes conversores, determinando se é viável a instalação de uma usina ondomotriz no Brasil.

*Palavras chave: conversores de energia, energia renovável, ondas oceânicas, ondomotriz.*

---

## ABSTRACT

One of the main problems encountered today is related to power generation in the future, as the growing use of fossil fuels has caused a major environmental impact. Studies show that by the year 2030 will need investment in other energy sources beyond fossil and hydroelectric power plants, currently the most used in Brazil, prioritizing renewable energy and money. Several countries can meet part of the demand for energy through the energy afforded by ocean waves, because some places have ocean waves with high energy potential. Through of the analyzes these works and studies, this project will present four alternative of converters ondomotriz, which have a better adaptation to the Brazilian scenario. Following will be a technical analysis and cost of these converters, determining if is viable the installation of a plant ondomotriz in the Brazil.

*Keywords: energy converters, renewable energy, ocean waves, ondomotriz.*

# SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Tema em estudo e sua relevância .....	1
1.2	Revisão bibliográfica.....	2
1.3	Objetivos .....	4
1.4	Metodologia .....	5
1.5	Estrutura do relatório.....	5
2.	ESTUDO DAS ONDAS OCEÂNICAS .....	7
2.1	Formação das ondas oceânicas.....	7
2.2	Classificação das ondas .....	9
2.3	Obtenção do potencial energético.....	11
3.	CONVERSORES ONDOMOTRIZ .....	16
3.1	Coversores de energia por ondas oceânicas.....	16
3.1.1	Dispositivo Coluna de Água Oscilante (OWC) .....	17
3.1.2	Conversor de Onda Oscilante.....	18
3.1.3	Sistema bioWave .....	19
3.1.4	Sistema AWS (Archimedes Wave Swing).....	20
3.1.5	Sistema Wave Dragon .....	20
3.1.6	Outros Sistemas.....	22
3.2	Classificação dos Conversores.....	22
3.2.1	Dispositivos Costeiros (onshore) .....	22
3.2.2	Dispositivos próximos da costa (near-shore) .....	23
3.2.3	Dispositivos afastados da costa (offshore) .....	23
4.	DESCRIÇÃO DOS CONVERSORES A SEREM ANALISADOS .....	25
4.1	OWC OSPREY .....	25
4.2	Sistema LIMPET .....	26
4.3	Sistema COPPE/UFRJ .....	28
4.4	Pelamis .....	30
5.	METODOLOGIA .....	33
5.1	Custo Anual do Insumo Energético (CC).....	33

5.2	Custo Anual de Manutenção (CM) .....	34
5.3	Valor Anual do Subproduto (VS) .....	34
5.4	Vida Útil Efetiva (vE) .....	34
5.5	Análise Custo/Benefício (C/B) .....	34
6.	ANÁLISE FINANCEIRA.....	36
6.1	Sistema OWC OSPREY .....	38
6.1.1	Análise econômica OWC OSPREY.....	39
6.2	Sistema LIMPET .....	40
6.2.1	Análise econômica LIMPET .....	40
6.3	Sistema COPPE/UFRJ .....	41
6.3.1	Análise econômica COPPE/UFRJ .....	41
6.4	Sistema PELAMIS.....	42
6.4.1	Análise econômica Pelamis.....	43
7.	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	44
8.	CONCLUSÃO .....	47
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	50

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Formação das ondas pelo vento (Ambiente do Litoral Paranaense, Projeto Litoral Nota CEM, 2013) .....	8
Figura 2 – Modificação da amplitude da onda (Ambiente do Litoral Paranaense, Projeto Litoral Nota CEM, 2013) .....	9
Figura 3 – Classificação das ondas, Força Perturbadora, Força Restauradora e Energia Superficial com relação à frequência e período (ASSIS, 2010).....	10
Figura 4 – Ondas Capilares (Ondas, Faculdade de Oceanografia UFBA, 2014).....	11
Figura 5 – Distribuição do fluxo médio de energia das ondas no mundo em kW/m ou MW/km (Direção-Geral de Energia e Geologia, 2013) .....	15
Figura 6 – Dispositivo de Coluna de Água Oscilante (OWC), (Support Wave Energy, 2013)	18
Figura 7 – Dispositivo Conversor de Onda Oscilante (Aquaret, 2013) .....	19
Figura 8 – Dispositivo bioWave (Gizmag, 2011).....	19
Figura 9 – AWS – Archimedes Wave Swing (NNMREC, 2013).....	20
Figura 10 – Sistema Wave Dragon (Ambiente HSW, 2013).....	21
Figura 11 – Sistema, Wave Dragon, sendo testado em Nissum Bredning, Dinamarca (Direção-Geral de Energia e Geologia, 2004) .....	21
Figura 12 – Turbina Wells utilizada na Ilha do Pico - Açores, Portugal (Portal das Energias Renováveis, 2013).....	26
Figura 13 – Dispositivo Osprey (DIAS, 2013) .....	26
Figura 14 – Funcionamento de um dispositivo LIMPET (Efacec, 2013) .....	27
Figura 15 – Central LIMPET, instalada na Ilha de Islay, Escócia (Voith, 2013) .....	28
Figura 16 – Demonstração da usina de ondas da Coppe (Assis, 2010) .....	29
Figura 17 – Usina da Coppe instalada no porto de Pecém, Ceará (Mar Sem Fim, 2013).....	29
Figura 18 – Demonstração do interior dos tubos da Pelamis (Uma Nova Alternativa, 2013) .	31
Figura 19 – Na parte superior, a Pelamis em funcionamento em Aguçadoura, Portugal e na parte inferior, demonstrando o interior do Pelamis e a articulação do sistema (Energias como Bienes Comunes, 2012).....	32

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos Latinos

a	Amplitude	[m]
C/B	Custo/Benefício	[US\$/kWh]
CC	Custo Anual de Insumo Energético	[US\$/kWh]
CEM	Custo Específico de Manutenção	[US\$/kWh]
$C_g$	Velocidade de grupo	[m/s <sup>2</sup> ]
CM	Custo Anual de Manutenção	[US\$/kWh]
$E_c$	Densidade Média de Energia Cinética	[Nm/m <sup>2</sup> ]
$E_p$	Densidade Média de Energia Potencial	[Nm/m <sup>2</sup> ]
$E_T$	Densidade Média de Energia Total	[Nm/m <sup>2</sup> ]
f	Frequência	[Hz]
FC	Fator de Capacidade	[adimensional]
g	Aceleração da gravidade	[m/s <sup>2</sup> ]
H	Altura	[m]
$H_s$	Altura significativa	[m]
I	Investimento Inicial	[US\$]
i	Taxa de Juros	[aa]
k	Número de ondas	[adimensional]
mca	Metros de Coluna de Água	[mca]
P	Fluxo Médio de Energia	[kW/m]
PCI	Poder Calorífico do Combustível	[kWh/kg]
PEC	Preço Específico do Combustível	[US\$/kg]
PI	Potência Instalada	[kW]
R	Valor Residual	[US\$]
$S(f,\theta)$	Distribuição de Densidade de Energia	[kW/m <sup>2</sup> ]
T	Período	[s]
t	Tempo	[s]
$T_e$	Período Médio de Energia	[s]
u	Velocidade Horizontal	[m/s]
v	Velocidade Vertical	[m/s]
vE	Vida Útil Efetiva	[anos]
VES	Valor de Subproduto Específico	[US\$/kWh]
VS	Valor Anual de Subproduto	[US\$/kWh]
x	Comprimento	[m]
z	Altura	[m]



## Símbolos Gregos

$\lambda$	Comprimento de onda	[m]
$\eta$	Elevação da superfície	[m]
$\rho$	Massa específica	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\omega$	Frequência angular	[rad/s]
$\theta$	Direção	[adimensional]

## Siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AWS	Archimedes Wave Swing
CAO	Coluna de Água Oscilante
CBE	Congresso Brasileiro de Energia
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial
LIMPET	Land Installed Marine Power Energy Transmitter
LTS	Laboratório de Tecnologia Submarina
NNMREC	Northwest National Marine Renewable Energy Center
OPD	Ocean Power Delivery
OSPNEY	Ocean Swell Powered Renewable Energy
OWC	Oscillating Water Column
PCH'S	Pequenas Centrais Hidrelétricas
RBRH	Revista Brasileira de Recursos Hídricos
RS	Rio Grande do Sul
UFBA	Universidade Federal da Bahia
UFRJ	Universidade Federal do rio de Janeiro
UNPD	United Nations Procurement División

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Tema em estudo e sua relevância

No século XIX as formas mais utilizadas para produção de energia eram as fontes de biomassa, como lenha carvão e resíduo agrícola. A produção e utilização do carvão foram expandidas rapidamente ao longo do século tornando-o a principal fonte de geração de energia por vários anos. Em meados do século XX, houve um rápido crescimento na produção e utilização de derivados de petróleo, tornando-os a maior fonte de geração de energia nos últimos anos. E nos últimos 25 anos a produção do gás natural e da energia nuclear também tiveram um desenvolvimento acelerado (ASSIS, 2010).

Atualmente o mundo passa por grandes problemas ambientais como desmatamento, poluição, aquecimento global e entre outros, causando um desequilíbrio no ecossistema. Exemplos disso são as crescentes secas, ondas de calor e tornados cada vez mais frequentes. Muitos desses problemas ambientais são consequências do uso de alguns sistemas geradores de energia, como a queima de combustíveis fósseis, que é extremamente poluente. Este tipo de produtor energético, que é a termoelétrica, é disseminado pelo mundo, o que responde ao fato dele ser um grande contribuinte para alguns dos problemas apresentados.

O estudo, Matrizes Energéticas no Brasil: Cenário 2010-2030, apresentado no XVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, definiu um cenário econômico para o Brasil no período entre 2010 e 2030 e através dele foi possível projetar a capacidade de produção e a demanda para cada matriz energética no Brasil. Com os dados coletados, formulou-se um balanço energético a fim de identificar em quais fontes energéticas o Brasil terá um déficit de suprimento no futuro e como as fontes de energia alternativas e renováveis poderão supri-lo.

Segundo definição, a energia renovável é aquela produzida a partir de fontes naturais e que pode ser utilizada por diversas vezes, ou seja, estão disponíveis de forma cíclica.

Fazendo uma análise das matrizes energéticas no mundo, de acordo com a UNPD (2010) os combustíveis fósseis correspondem a 80% da energia produzida atualmente, sendo que 35% corresponde ao petróleo, o carvão é responsável por cerca de 23%, o gás natural por 21%, as fontes de energia sustentável respondem por 14%, a energia nuclear por 6% e as energias renováveis por cerca de 4,5%.

Devido ao problema da demanda energética, citado anteriormente, ouve um crescente avanço no desenvolvimento de novas formas de geração de energia alternativa, não só no Brasil como em todo o mundo. Entre os tipos mais conhecidos estão os geradores que convertem energia solar, que se beneficiam da incidência dos raios solares para a produção de energia elétrica, e eólica, que utilizam a força dos ventos. Entre as fontes de energia renováveis, que estão em crescente avanço, estão sistemas

que produzem energia a partir do movimento das ondas do mar com o uso de conversores ondomotriz.

De acordo com o trabalho *New Zealand Wave Energy Potential: Riding de Crest of a Wave or gone with the Wind?*, de Iain Sanders, Alister Gardiner, Guy Penny, e Richard Gorman, 2003 e com o documento de patente *Usina para Geração de Energia Elétrica pelas Ondas do Mar*, publicada no ano de 1899 na França, a energia das ondas já era utilizada para o acionamento de bombas, serras, moinhos e entre outros mecanismos pesados. Porém a conversão dessa energia em eletricidade só foi possível devido a eventos recentes que motivaram a procura pelo desenvolvimento de fontes alternativas e renováveis de energia. Um pequeno avanço nas pesquisas, com relação a essa energia, foi obtido na década de 70 devido à crise do petróleo, especialmente na Europa. Diversos países deste continente estão investindo na tecnologia de geração de energia ondomotriz, como a Holanda com o sistema AWS (Archimedes Wave Swing), com 2 MW de potência, Portugal com o sistema OWC (Oscillating Water Column), com 400 kW de potência, o Reino Unido com o sistema LIMPET, com 500 kW de potência e a Dinamarca com o sistema Wave Dragon, com 4 MW de potência. Outros países do mundo que utilizam esta tecnologia são Estados Unidos, Canadá, Austrália, Irlanda, Noruega, Nova Zelândia, Espanha, Suécia, Grécia, Índia, China, Coreia e Japão.

De acordo com ASSIS, 2010, no Reino Unido foi realizado um estudo que avaliou o potencial energético disponível nos oceanos e obteve como conclusão que aproximadamente 1 TW de energia, o que conseguiria suprir toda a demanda energética do planeta. Embora apenas uma pequena parte dessa energia possa ser convertida em eletricidade, este método de conversão terá um grande significado para os países que obtiverem essa tecnologia.

O Brasil possui um vasto litoral com 8000 km de extensão e pode se beneficiar dessa fonte de energia limpa e renovável. Apesar de não possuir valores energéticos altos em suas ondas oceânicas, sua regularidade e pouca ocorrência de fenômenos naturais que possam destruir os equipamentos, tornam economicamente viáveis a possibilidade de usufruir dessa fonte de energia, dependendo da tecnologia adotada para esse propósito (ESTEFEN, 2004).

De acordo com o projeto *O Futuro Sustentável (COPPE/UFRJ)*, o potencial energético das ondas oceânicas no Brasil é estimado em 87 GW. Testes da COPPE indicam que é possível converter cerca de 20% desse potencial em energia elétrica. O que equivale a 17% da capacidade total instalada no país. Com o avanço das pesquisas e o desenvolvimento de tecnologias nesta área é possível obter esse potencial energético para abastecer alguns centros urbanos e comunidades isoladas no Brasil, a um custo viável, e fazer com que o Brasil esteja apto a competir e exportar a tecnologia brasileira.

## **1.2 Revisão bibliográfica**

Esta parte do trabalho visa compilar uma revisão bibliográfica sobre este assunto. Dentre os trabalhos serão citados trabalhos acadêmicos, artigos e apresentação sobre projetos realizados por

empresas especializadas apresentando os resultados encontrados.

A COPPE apresenta um trabalho, em 2012, sobre O Futuro Sustentável o qual é subdividido em clima, energia e oceano, cidades sustentáveis e erradicação da pobreza. Dentro do primeiro ítem encontra-se a avaliação da energia que vem do mar, onde explicita a possibilidade do Brasil explorar o oceano como fonte de energia limpa e renovável. E uma forma de realizar isso é através do movimento das ondas do mar para geração de eletricidade. Essa idéia está sendo implementada no porto de Pecém, no Ceará. A usina-piloto é um projeto da Coppe idealizada e projetada pelo Laboratório de Tecnologia Submarina - LTS da Coppe. O objetivo dessa usina é inserir o Brasil no seletivo grupo de países que estão testando diferentes conceitos tecnológicos para comprovar que as ondas do mar podem produzir eletricidade com confiabilidade de suprimento e a custos viáveis. Além disso, o trabalho explica o funcionamento dessa usina-piloto a qual tem como diferencial das outras usinas por ondas do mar, o sistema de alta pressão para movimentar a turbina e o gerador.

O documento de patente da Coppe (2006) sob o título Usina para Geração de Energia Elétrica pelas Ondas do Mar apresenta o crescente estudo na área de geração de energia, alguns modelos de equipamentos utilizados pelo mundo como o holandês Archimedes Wave Swing, o do português Oscillating Water Column, o do Reino Unido LIMPET e o do dinamarquês Wave Dragon e suas respectivas potências e explica o funcionamento da usina projetada pela Coppe a qual tem como novidade o uso de uma câmara hiperbárica com válvulas reguladoras de vazão o qual pode produzir uma pressão que equivale a uma queda de água de até 1750 metros.

O artigo Coppe: Projeto Utiliza Ondas do Mar como Fonte de Energia, publicado em 2011, apresenta a evolução da geração de energia ondomotriz pelo mundo e fala de três projetos comandados pela Coppe para geração de energia utilizando o oceano, entre eles o sistema instalado no porto de Pecém, no Ceará. Com tecnologia feita pela Coppe. Mostra também que o Ceará foi um ponto estratégico para a construção da usina, pois aquela região apresenta ventos constantes, que torna a região um dos maiores potenciais de energia eólica do país e esses ventos têm consequência na formação de ondas constantes. Este fato é importante, pois para obter um bom funcionamento da usina as ondas devem ser constantes e mais regulares possível. Os outros dois projetos citados no artigo são o de energia maré-motriz que ocorre quando a maré aumenta ou diminui, criando um fluxo que passa por turbinas e acionam geradores para a produção de energia, que está sendo utilizado em São Luís, no Maranhão. E o terceiro projeto é o de turbinas submersas, que está sendo implantado na região norte do Brasil, mas não especifica o funcionamento destas turbinas. O artigo ainda cita que o investimento em fontes de energia na costa brasileira pode suprir a demanda em centros urbanos ou até em comunidades isoladas do Brasil e com essa tecnologia brasileira o país entra no seletivo grupo de nações com capacidade desenvolvida de pesquisa para competição e exportação no mercado das energias renováveis.

O trabalho acadêmico Avaliação e Aproveitamento da Energia de Ondas Oceânicas no Litoral do

Rio Grande do Sul (2010) apresenta um estudo relacionado ao potencial energético das ondas oceânicas e a viabilidade de seu aproveitamento causando poucos impactos ambientais. Um ondógrafo foi utilizado para a coleta de dados, como altura significativa e período das ondas, no litoral do Rio Grande do Sul e através destes dados foi realizado o trabalho analisando o potencial energético das ondas naquela região. Também são apresentados alguns equipamentos que convertem energia oceânica em energia elétrica.

O artigo da Revista Brasileira de Recursos Hídricos apresenta um estudo de potencial energético realizado no litoral do Rio Grande do Sul e demonstra alguns dispositivos conversores de energia e alguns geradores ondomotriz.

O documento de patente Energia Oceânica, do Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) que apresenta a classificação dos conversores de energia das ondas em energia elétrica e demonstra a classificação dos sistemas geradores com relação a sua localização no oceano, levando em consideração a profundidade do mar.

O trabalho acadêmico Energia das Ondas do Mar para Geração de Eletricidade, apresentado em 2004 por Paulo Roberto da Costa, que apresenta estudos com relação ao oceano, como obtenção do potencial energético das ondas e apresenta a classificação de conversores de energia e alguns modelos de geradores.

O trabalho acadêmico Uma Contribuição para Conhecimento do Comportamento de Âncoras em Leitões Marinhos Arenosos para Estruturas Flutuantes, apresentado em 2013 por Helena Raquel Ferreira Dias, que relata um estudo com relação aos leitões marinhos arenosos para estruturas flutuantes. Entre estas estruturas alguns sistemas geradores de energia elétrica que se beneficiam das ondas oceânicas são citados no trabalho, demonstrando seu funcionamento.

### **1.3 Objetivos**

Após a análise de trabalhos publicados sobre o tema e os resultados encontrados, foi possível determinar os objetivos que serão desenvolvidos neste trabalho e como seus resultados podem ser utilizados para o desenvolvimento de novos projetos.

Este trabalho irá reunir as características dos conversores de energia ondomotriz selecionados, fazendo uma análise técnica e financeira dos quatro seguintes tipos de geradores: o dispositivo de Coluna de Água Oscilante OWC OSPREY, o dispositivo LIMPET, o protótipo da COPPE/UFRJ e o dispositivo PELAMIS. Esses quatro geradores foram selecionados, pois já estão sendo testados por alguns países e por isso se encontram com uma tecnologia mais desenvolvida do que outros geradores, possuindo, assim, um pouco mais de dados para serem analisados do que outros dispositivos.

Estes dispositivos serão analisados para o Estado do Rio Grande do Sul, pois esta região já possui alguns estudos mais específicos sobre o potencial energético das ondas do mar naquela região.

Essas análises devem ser suficientes para concluir se é viável o Brasil investir nessa tecnologia e qual conversor ondomotriz melhor se adapta as condições brasileiras.

- Fazer uma análise técnica e financeira dos quatro dispositivos selecionados;
- Esta análise será feita para o Estado do Rio Grande do Sul;
- Com estas análises verificar se é viável o Brasil investir nessa tecnologia e qual dispositivo melhor se adapta às condições brasileiras.

## **1.4 Metodologia**

Este trabalho visa apresentar a viabilidade do Brasil investir na tecnologia de geração de energia por ondas do mar e qual conversor, dentre os analisados, é mais adequado para o Brasil utilizar. Mas para isso é necessário fazer uma pequena análise das ondas do litoral brasileiro, no caso deste trabalho na região do estado do Rio Grande do Sul, para finalmente poder fazer um estudo da geração de energia ondomotriz.

Primeiramente será feita uma exposição do funcionamento de vários sistemas e dispositivos de geradores ondomotriz e em quais locais esses sistemas podem ser aplicados, como na costa do litoral, em uma região próxima à costa ou longe da costa.

Uma apresentação sobre cada gerador ondomotriz selecionado será feita para demonstrar a motivação em propô-los como objeto de estudo para suprir parte da necessidade energética que está surgindo no decorrer dos anos. E mostrar que esta é uma opção viável técnica e financeiramente, assim como as usinas eólicas, que estão em pleno desenvolvimento em todo o mundo.

Para finalizar, será feito um levantamento de alguns ambientes que poderiam abrigar um sistema conversor de energia ondomotriz, fazendo uma análise técnica e financeira dos geradores selecionados, incluindo custos com instalação e manutenção dos equipamentos, custo para produção de energia, e concluir qual gerador melhor se adapta à região selecionada do Brasil.

## **1.5 Estrutura do relatório**

No capítulo 2 serão apresentados alguns geradores ondomotriz utilizados no mundo, qual deles estão em uma fase mais desenvolvida para uma posterior análise destes geradores no trabalho e como é feita a classificação deles.

No capítulo 3 são apresentadas as principais características dos conversores ondomotriz selecionados, a qual classificação eles pertencem e qual está mais avançado em suas pesquisas. A seguir são mostrados os equipamentos e materiais utilizados na instalação de cada gerador ondomotriz, com suas principais especificações e condições de uso. Para concluir, uma breve descrição de como é

a disposição desta instalação e como ela funcionará.

No capítulo 4 será descrita a metodologia para a análise financeira dos dispositivos estudados. Serão apresentadas as fórmulas e o método de cálculos, utilizando o potencial energético das ondas, para verificar qual sistema obterá o melhor custo benefício.

No capítulo 5 serão apresentados os dados necessários para a realização das análises técnicas e financeiras de cada sistema em estudo para posteriormente ser feita a comparação e determinar o melhor sistema a ser utilizado.

No capítulo 6 serão apresentados os resultados das análises realizadas no capítulo anterior e será determinado qual sistema e dispositivo melhor se adaptam às condições do litoral do Rio Grande do Sul e qual possui o melhor custo benefício. Determinando assim se o Brasil tem ou não condições de instalar o sistema de Energia Ondomotriz.

Para finalizar será apresentada a conclusão deste trabalho, atendendo aos objetivos iniciais. Ou seja, apresentar se é viável a instalação de um sistema de geração ondomotriz no litoral do estado do Rio Grande do Sul e apresentar o custo benefício dos sistemas estudados. As referências utilizadas para a pesquisa e desenvolvimento deste relatório serão listadas.

## 2. ESTUDO DAS ONDAS OCEÂNICAS

Este capítulo explicará como ocorre a formação das ondas mostrando quais fenômenos naturais influenciam para sua formação e quais as suas classificações. Em seguida mostrará as formas utilizadas para extração e aproveitamento do recurso energético de ondas oceânicas. E para concluir serão apresentadas as equações que fazem possível determinar o fluxo de energia e que por sua vez pode ser convertida em energia elétrica através dos geradores ondomotriz.

### 2.1 Formação das ondas oceânicas

Um dos fenômenos naturais que influenciam para a formação das ondas é o ar em movimento ou fluxo de ar, conhecido como brisa ou vento, dependendo de sua intensidade.

O vento, para entrar em movimento, precisa de uma força atuando sobre a massa de ar e essa força ocorre devido a um gradiente de pressão, onde uma região encontra-se em alta pressão e desloca a massa de ar para outra região que está com baixa pressão. E este fenômeno ocorre devido à capacidade calorífica de cada região (ASSIS, 2010).

Pode-se considerar a energia presente nas ondas do mar como uma forma concentrada de energia solar (COSTA, 2004).

Todos os elementos têm a capacidade de absorver e liberar calor, sendo que alguns absorvem mais e outros menos, logo, cada elemento tem a sua capacidade calorífica. Uma forma destes elementos se aquecerem é através da radiação solar, onde uma maior intensidade de radiação aquece o elemento e uma menor radiação permite o resfriamento dele (ASSIS, 2010).

O ar atmosférico tem sua capacidade calorífica e o calor absorvido pelo ar vem também da radiação solar, mas parte deste calor é contribuído pela superfície a qual o ar está em contato. Então uma superfície com menor capacidade calorífica faz com que o ar ao seu redor aqueça e expanda rapidamente e de forma oposta ocorre com o ar que se encontra próximo a uma superfície com maior capacidade calorífica. Dessa forma uma região obterá uma maior pressão e outra região, menor pressão. E como dito anteriormente essa diferença de pressão faz o ar entrar em movimento, tendendo ao equilíbrio. Mas este fluxo de ar é alterado dependendo da altitude em que se encontra o ar, onde em altitudes ao nível do solo o fluxo de ar ocorre do sentido de alta pressão para o de baixa pressão e ocorre o fluxo contrário em altas altitudes (ASSIS, 2010).

Mas não é apenas a intensidade com que o vento atua sobre a água que influencia a formação da onda pelo vento. Outros motivos faz a transferência de energia do vento para a água, como o fluxo turbulento do ar, o tempo e a distância em que ocorre o contato do vento com o oceano (GONÇALVES, 2003).



Isto responde como o vento entra em movimento. E esse vento entrando em contato com a superfície do oceano, transfere parte de sua energia para a água, que por sua vez começa a se movimentar e ocorre a formação das ondas. Ou seja, as ondas oceânicas são em última análise uma forma de energia solar, onde um potencial solar da ordem de  $100 \text{ W/m}^2$  pode eventualmente se transformar em ondas com mais de  $1000 \text{ W}$  por metro de comprimento de crista da onda (COSTA, 2004) e (ASSIS, 2010).

Essa formação das ondas pelo vento pode ser visualizada na Figura 1 abaixo, que mostra o movimento das moléculas de água pela atuação do vento, onde as moléculas, na superfície tem um maior movimento circular devido à ação do vento sobre a superfície da água e conforme a molécula vai para o fundo ela passa a ter um menor movimento circular (AQUARET, 2015). E a ação do vento cria uma zona de alta pressão na parte frontal do vale e uma zona de baixa pressão na parte de trás do vale, esta diferença de pressão também influencia na formação da onda, mas para isto ocorrer a velocidade do vento deve ser superior à velocidade da onda (Ondas, Faculdade de Oceanografia UFBA, 2014). O movimento circular das moléculas e essa diferença de pressão sobre a superfície do mar acarreta na formação das ondas. Esta figura também mostra as nomenclaturas de cada parte da onda (Ambiente do Litoral Paranaense, Projeto Litoral Nota CEM, 2013).

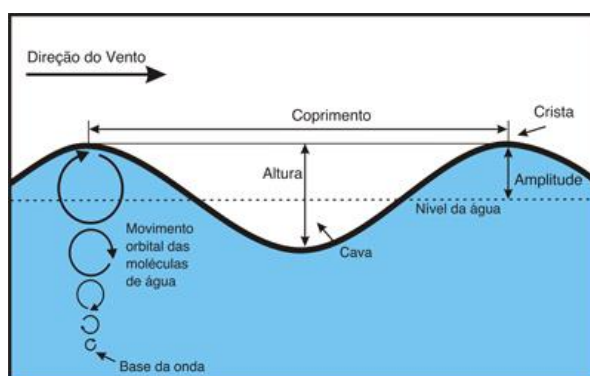


Figura 1 – Formação das ondas pelo vento (Ambiente do Litoral Paranaense, Projeto Litoral Nota CEM, 2013)

De acordo com o texto Ambiente do Litoral Paranaense, Projeto Litoral Nota CEM, 2013, a Figura 2 abaixo mostra a variação da amplitude da onda conforme ela se aproxima do litoral, onde no ponto A a onda se encontra em um local profundo, então a amplitude é menor, no ponto B a onda está em um local de profundidade média, então ocorre um aumento da amplitude e no ponto C a onda está em um local mais raso, onde normalmente ocorre a quebra da onda. Isto ocorre devido à repentina mudança de profundidade que força a água a subir, aumentando, assim, a amplitude da onda.

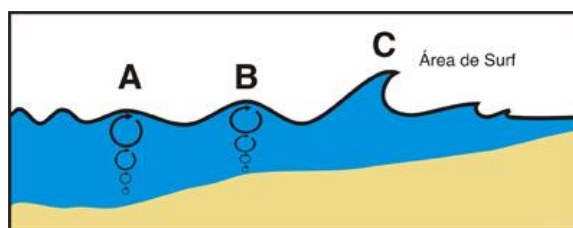


Figura 2 – Modificação da amplitude da onda (Ambiente do Litoral Paranaense, Projeto Litoral Nota CEM, 2013)

## 2.2 Classificação das ondas

A classificação das ondas é feita utilizando critérios como período ou frequência e as forças perturbadoras e restauradoras. Ou seja, para uma onda com um determinado período ou frequência, um tipo de força perturbadora irá iniciar a formação da onda e com o intuito de equilibrar o sistema, uma força restauradora irá atuar sobre a onda (ASSIS, 2010).

Ondas com menor período têm o vento como sua principal força perturbadora. O vento transfere energia da atmosfera para o oceano formando uma agitação marítima, que é o movimento irregular da superfície do oceano. Para restaurar a condição de equilíbrio do sistema a força da gravidade atua como força restauradora (ASSIS, 2010).

As ondas com maior período têm as tempestades e tsunamis como os principais sistemas de forças perturbadoras juntamente com os movimentos de translação e rotação da Terra e o movimento da Lua ao redor da Terra. E como principal força de restauração tem-se a força de Coriolis (BRYANT, 2001) e (ASSIS, 2010).

O tsunami é uma onda longa originada no oceano, mares e lagos por abalos sísmicos, vulcanismo, deslizamento de terra submarino, fenômenos meteorológicos e diversos outros motivos que provoquem uma grande perturbação do sistema (BRYANT, 2001). Este tipo de onda possui entre 10 km e 500 km de comprimento de onda (SILVEIRA e VARRIALE, 2004).

Segundo ASSIS, 2010 consideram-se ondas de gravidade superficiais as ondas do mar cuja força perturbadora é o vento e a força restauradora é a gravidade, visto serem as que apresentam maior conteúdo energético.

As ondas de tensão superficial são pequenas ondas, menor que 1 centímetro, de alta frequência e pequeno período, formadas na interface líquido-gás e como o próprio nome diz são originadas devido a tensões superficiais. Mas a influência deste tipo de onda sobre as outras ondas marítimas são desprezíveis, pois para ser perceptível quando a onda se movimenta, o comprimento de onda deve ser superior a centímetro (ASSIS, 2010).

A Figura 3, abaixo, apresenta a classificação das ondas, suas respectivas forças perturbadoras e restauradoras e a energia superficial. Todos estes itens foram colocados na figura com relação à

frequência e período de cada classificação (Ondas, Faculdade de Oceanografia UFBA, 2014).

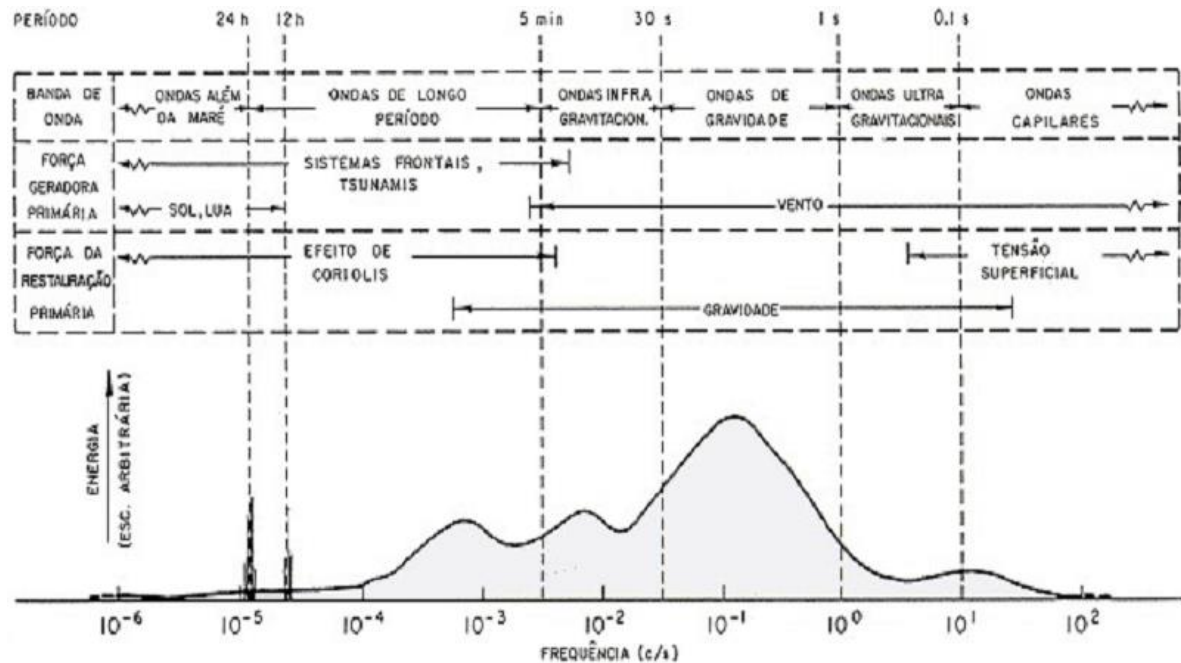


Figura 3 – Classificação das ondas, Força Perturbadora, Força Restauradora e Energia Superficial com relação à frequência e período (ASSIS, 2010)

A classificação é demonstrada abaixo com suas respectivas características, iniciando com a onda de maior período para a de menor período. Para essa classificação foi utilizada as fontes Costa, 2004, Beserra, 2007 e Assis, 2010.

- As *ondas além da maré* têm como origem as forças causadas pelo Sol, pela Lua, por sistemas frontais e tsunamis, como força restauradora o Efeito de Coriolis, possuem alta energia e possuem baixa energia superficial. Pois possuem baixa frequência, um alto período e uma baixa amplitude em alto mar.
- As *ondas de longo período* são originadas principalmente por sistemas frontais e tsunamis, como força restauradora o Efeito de Coriolis e possuem frequência e energia superficial maior do que as ondas além da maré.
- As *ondas infragravitacionais* são originadas principalmente pelo vento, como força restauradora a gravidade e possuem frequência e energia superficial maior do que as ondas de longo período.
- As *ondas de gravidade* são originadas principalmente pelo vento, se propagam na interface líquido-gás, como força restauradora tem a força gravitacional, possui frequência maior do que as ondas infragravitacionais e possuem alta energia superficial, sendo a maior dentre todos os outros tipos de onda.
- As *ondas ultragravitacionais* são originadas principalmente pelo vento, como força restauradora a força gravitacional, possui frequência maior do que as ondas de gravidade e

energia superficial maior apenas que as ondas além da maré, ou seja, possuem baixa energia superficial.

- As *ondas capilares* são originadas pelo vento, são formadas na interface líquido-gás, possuem como força restauradora as tensões superficiais, possuem a maior frequência entre todas as outras ondas e energia superficial maior apenas que as ondas além da maré.



Figura 4 – Ondas Capilares (Ondas, Faculdade de Oceanografia UFBA, 2014)

Dentre os tipos de ondas citados, as ondas gravitacionais são as que possuem maior energia superficial (ASSIS, 2010 e BESERRA, 2007), logo é este tipo de onda a mais favorável para utilizar no sistema de geração de energia por ondas do mar. Sendo que para a geração de energia elétrica também deve ser analisada a regularidade com que ocorrem as ondas, como no caso brasileiro, onde as ondas não possuem alto potencial energético, mas possuem uma regularidade ao longo do ano que favorece na geração de energia (ASSIS, 2010).

### 2.3 Obtenção do potencial energético

A obtenção do potencial energético das ondas do mar devem seguir alguns critérios, entre eles a análise de suas energias, pois é através da conservação de energia que será obtido o potencial energético, utilizando a velocidade da onda que gera a energia cinética, a amplitude da onda que gera a energia potencial, e através de seu somatório tem-se a energia total. Outro fator é a potência de ondas, que se baseia no fluxo de energia da onda, ou seja, na quantidade de energia que a onda possui que se propaga por unidade de comprimento de crista. A análise espectral que, devido à agitação marítima, deve-se fazer esta análise verificando a distribuição da densidade de energia através da frequência e da direção das ondas. E para finalizar, a forma de extração do potencial energético da onda, que é o fluxo de energia por unidade de comprimento de frente de onda.

Esta metodologia de avaliação do recurso energético das ondas oceânicas foi baseada na fonte de pesquisa (RBRH-2013).

Para obtenção das energias cinéticas, potencial e total, seguem as respectivas análises.

Um sistema com oscilações de pequena amplitude e dinamicamente conservativo tem a energia cinética e energia potencial, iguais. A densidade média de energia cinética pode ser obtida calculando a energia cinética de um elemento de fluido de altura  $dz$ , comprimento  $dx$  e de largura unitária, ao ser realizada a integração entre a superfície e o fundo, como é demonstrado na Equação (1).

$$E_c = \frac{1}{\lambda} \int_0^\lambda dx \int_0^\eta \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2) dz \quad (1)$$

Sendo que as incógnitas desta equação têm as seguintes nomenclaturas,  $E_c$  é a densidade média de energia cinética,  $u$  e  $v$  são as componentes horizontal e vertical da velocidade das partículas de água,  $dz$  é a altura do elemento fluido,  $dx$  é o comprimento do elemento fluido,  $\eta$  é a elevação da superfície,  $\rho$  é a massa específica da água e  $\lambda$  é o comprimento de onda.

Substituindo estas componentes pelas expressões que as definem em águas profundas, obtêm-se as Equações (2) e (3), onde  $a$  é a amplitude de onda,  $\omega$  é a frequência angular,  $k$  é o número de onda e  $t$  é o tempo.

$$u = a\omega \exp kz \cos(kx - \omega t) \quad (2)$$

$$v = a\omega \exp kz \sin(kx - \omega t) \quad (3)$$

A densidade média de energia cinética  $E_c$  é fornecida pela Equação (4), onde  $g$  é a aceleração da gravidade, em  $m/s^2$ , e  $a$  é a amplitude, em metros. Tendo sua unidade, no Sistema Internacional de Unidades, representada por  $Nm/m^2$ .

$$E_c = \frac{1}{4} \rho g a^2 \quad (4)$$

A densidade média de energia potencial ( $E_p$ ) em relação ao nível médio ( $z=0$ ) é dada pela Equação (5), onde a unidade da densidade média de energia potencial é representada, no Sistema Internacional de Unidades, por  $Nm/m^2$ .

$$E_p = \frac{1}{\lambda} \int_0^\lambda dx \int_0^\eta \rho g z dz = \frac{1}{2} \rho g \frac{1}{\lambda} \int_0^\eta \eta^2 dx \quad (5)$$

Usando as Equações (4) e (5), obtêm-se a densidade média de energia total para ondas de

gravidade, dada pela Equação (6), onde  $E_T$  é a densidade média de energia total expresso em Nm/m<sup>2</sup>.

$$E_T = E_c + E_p = \frac{1}{2} \rho g a^2 \quad (6)$$

Com a obtenção das energias cinética, potencial e total, pode-se fazer a análise da potência de onda, como mostrado a seguir.

O fluxo médio de energia é a taxa que a energia das ondas se propaga por unidade de comprimento de crista, através de um plano vertical perpendicular à direção de propagação da onda. É obtida a partir da velocidade de grupo  $C_g$  e da densidade de energia total  $E_T$ , conforme aparece na Equação (7).

$$P = E_T C_g \quad (7)$$

A velocidade do perfil da onda, também conhecido como Celeridade, é dada pela Equação (8).

$$C_g = \frac{gT}{4\pi} \quad (8)$$

Assim, o fluxo médio de energia  $P$  é calculado através da Equação (9).

$$P = \frac{1}{32} \rho g^2 H^2 T \quad (9)$$

Assim, utilizando a análise espectral, consegue-se fazer a extração do potencial energético da onda oceânica, como mostrado a seguir.

O mar pode ser modelado como um processo aleatório, resultado da superposição de um grande número de componentes monocromáticas. Assim, parâmetros de ondas como período, altura e direção devem ser tratados por métodos estatísticos. Os parâmetros estatísticos mais utilizados são a altura significativa  $H_s$  e o período médio de energia  $T_e$ . O fluxo de energia para um mar real é calculado através da Equação (10), onde  $S(f,\theta)$  é a distribuição de densidade de energia em termos de frequência e direção.

$$P = \frac{\rho g^2}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} S(f, \theta) f^{-1} df d\theta \quad (10)$$

A integração da Equação (10) leva a uma expressão da potência por unidade de comprimento de crista de onda conforme mostrado na Equação (11).

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_S^2 T_e \quad (11)$$

Como  $\rho g^2/64\pi$  equivale a 490,60, a potência em kW/m será finalmente expressa pela Equação (12).

$$P = 0,4906 H_S^2 T_e \quad (12)$$

Esta é a equação utilizada para avaliação do recurso energético das ondas oceânicas.

Esta metodologia de avaliação do recurso energético das ondas oceânicas foi baseada na fonte de pesquisa (RBRH-2013).

O Reino Unido realizou um estudo do potencial energético em todo o mundo e dessa forma obteve o resultado de 1TW de energia disponível no oceano (COSTA, 2004).

As ondas viajam por milhares de quilômetros e sua energia pode frequentemente exceder 50 kW de energia por metro de frente de onda. Como outras fontes de energia, ela também está desigualmente distribuída pelo planeta, sendo que as maiores intensidades estão localizadas nas latitudes de 30° e 60° devido à ocorrência dos ventos de oeste que ocorrem nessas regiões (ASSIS, 2010 e COSTA, 2004).

Esta distribuição energética pode ser verificada na Figura 5 seguinte:

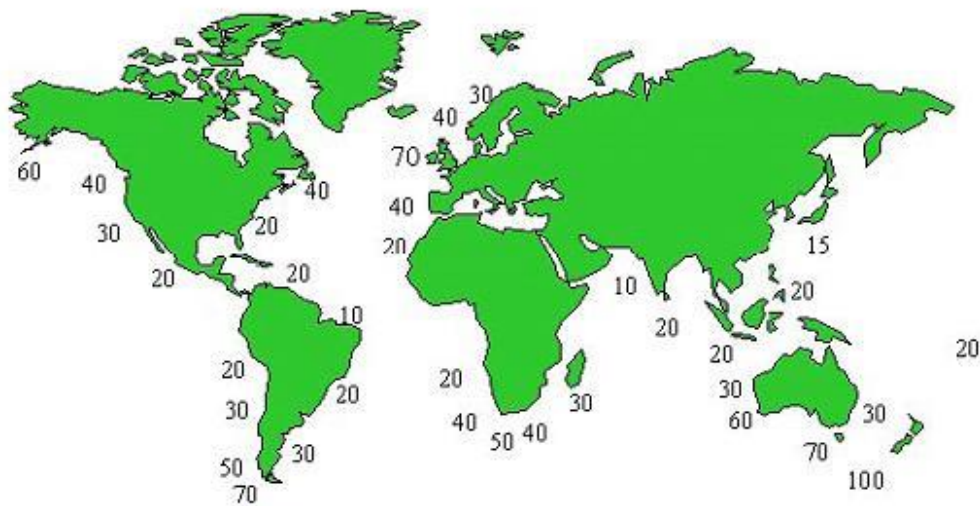


Figura 5 – Distribuição do fluxo médio de energia das ondas no mundo em kW/m ou MW/km (Direcção-Geral de Energia e Geologia, 2013)

Se a tecnologia que vem sendo desenvolvida atualmente fosse largamente utilizada, a energia das ondas contribuiria em mais de 10% da eletricidade mundial produzida. Isto corresponderia a cerca de 2.000 TWh anualmente, ou seja, a soma da produção das hidrelétricas de todo o mundo. (COSTA, 2004).



## 3. CONVERSORES ONDOMOTRIZ

Este capítulo terá por finalidade demonstrar vários sistemas de conversores de energia que utilizam as ondas do mar que estão em processo de desenvolvimento e alguns que já estão em fase de teste prático pelo mundo. Também serão explicados os tipos de classificação dos geradores ondomotriz. E quais geradores serão analisados mais especificamente no trabalho.

### 3.1 Conversores de energia por ondas oceânicas

O processo de estudo e desenvolvimento dos conversores ondomotriz estão, no decorrer de cada ano, evoluindo rapidamente. Atualmente, Portugal é o país que se encontra na frente com relação a estes estudos, tendo eles instalado alguns sistemas geradores em pontos de sua costa litorânea para uma melhor análise.

Mas não só Portugal está investindo nessa tecnologia. De acordo com o documento Energia Oceânica apresentada pela INPI, outros países também têm se mostrado promissores o estudo de seus respectivos equipamentos, como Holanda, Noruega, Reino Unido, Dinamarca e entre outros países, não só da Europa como da Ásia, América e Oceania também estão crescendo muito.

Exemplo disto tudo é a diversidade de conversores que utilizam a energia do mar como produção de eletricidade que já estão sendo analisados, tendo alguns modelos já em utilização pelo mundo, como a Holanda com o sistema AWS (Archimedes Wave Swing), Portugal com o sistema OWC (Oscillating Water Column), o Reino Unido com o sistema LIMPET, a Dinamarca com o sistema Wave Dragon e o Brasil com um sistema projetado pela Coppe, que está sendo utilizado no porto de Pecém no Ceará e já tem outro projeto em vista para gerar energia em alto-mar, tendo como objetivo suprir as necessidades energéticas do Farol da Ilha Rasa (AGÊNCIA GESTÃO CT&I, 2013). E outro projeto tem o planejamento de construir uma usina que também utilize as ondas do mar para gerar energia para as plataformas de pré-sal que se encontram afastadas da costa.

Os principais dispositivos utilizados para conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica serão relatados em seguida.

Atenuadores são dispositivos flutuantes, com articulações e posicionados perpendicularmente à frente de onda. E quando a onda passa ao longo de seu comprimento, as articulações se movimentam fazendo o dispositivo gerador de energia entrar em funcionamento (Energia Oceânica, INPI). Um exemplo deste dispositivo é o sistema Pelamis, utilizado em Portugal.

O dispositivo Coluna de Água Oscilante utiliza o movimento da onda para criar variação de pressão em um reservatório de ar. Essa diferença de pressão faz o ar passar por turbinas, que por sua vez acionam o gerador de eletricidade (Energia Oceânica, INPI). Exemplo deste dispositivo é o sistema LIMPET, utilizado no Reino Unido.

O dispositivo Oscilante de Simetria Axial, que diferentemente dos Atenuadores, podem ser posicionados de qualquer forma, conseguindo obter energia independente da direção em que a onda passe por ele. Utiliza um sistema flutuante que absorve energia do movimento da superfície do mar acionando um dispositivo gerador de energia que fica submerso (Energia Oceânica, INPI).

O dispositivo Conversor Oscilante de Translação das Ondas são equipamentos submersos que se beneficiam do movimento de translação das partículas de água criada pela onda para movimentar um braço oscilatório de movimento pendular invertido, acionando, dessa forma, o sistema gerador de energia (Energia Oceânica, INPI). Um sistema baseado nesse dispositivo é o bioWave, sendo projetado para ser utilizado na Austrália.

Os dispositivos de Galgamento utilizam o galgamento das ondas que passam por sua estrutura semi-submersa, onde suas pontas possuem rampas por onde a água é elevada para um reservatório localizado acima do nível do mar e em seguida passa por uma turbina de baixa pressão acionando o dispositivo gerador de energia (Energia Oceânica, INPI). Um exemplo deste dispositivo é o sistema Wave Dragon, utilizado na Dinamarca.

Os dispositivos Submersos de Diferença de Pressão, como o próprio nome diz, são estruturas que ficam submersas e se beneficiam da pressão criada pela onda ao passar sobre o dispositivo. Quando a crista da onda passa sobre o dispositivo, a pressão aumenta fazendo o flutuador ser pressionado para baixo, e quando o vale da onda passa sobre o dispositivo, o flutuador retorna a posição inicial. Esse movimento de subir e descer aciona o dispositivo conversor de energia (Energia Oceânica, INPI). Um exemplo deste dispositivo é o sistema AWS (Archimedes Wave Swing), utilizado na Holanda.

A seguir serão demonstrados alguns sistemas que se beneficiam destes dispositivos e de outros para realizar a obtenção de energia elétrica.

### **3.1.1 Dispositivo Coluna de Água Oscilante (OWC)**

O OWC (Oscillating Water Column), que em português significa Coluna de Água Oscilante (CAO), é um dispositivo que utiliza o fluxo de ar para movimentar as turbinas que por sua vez estão conectadas nos geradores de energia elétrica.

Sua estrutura fica parcialmente submersa tendo uma abertura na parte inferior, a qual fica em uma linha abaixo do nível do mar e em contato com a água. A região no interior da estrutura é composta por uma câmara pneumática, demonstrado na Figura 6 pela numeração 3, onde um fluxo de ar é formado devido à variação de amplitude das ondas do mar (Support Wave Energy, 2013).

Esse fluxo de ar é criado utilizando o movimento das ondas, que conforme passam pelo dispositivo com uma amplitude acima do nível do mar, aumentam a pressão do ar contido em um recipiente e é forçado a passar pela turbina, quando a amplitude fica abaixo do nível do mar, o recipiente é despressurizado e é preenchido por ar novamente.

O fluxo de ar ao ser pressurizado passa pela turbina, especialmente criada para este dispositivo, fazendo a turbina girar e gerar energia elétrica através do gerador conectado a esta turbina.

A turbina desenvolvida para esta finalidade é a Turbina de Wells, com pás simétricas. Independente da direção do fluxo de ar que passa por ela, esta turbina gira apenas para um lado. Não prejudicando, dessa forma, a produção de energia.

Para evitar sobrecarga na turbina, uma válvula de alívio é utilizada cuja sua abertura pode ser variada entre 0% (totalmente fechada) e 100% (totalmente aberta) (Site, [www.pico-owc.net](http://www.pico-owc.net), 2013).

Um dispositivo OWC foi projetado e instalado na Ilha do Pico, em Açores, Portugal. Ela está em funcionamento e é utilizada para realizar pesquisas na área de geração de energia por ondas do mar, por exemplo, além de ser utilizada para seu aperfeiçoamento e gerar energia para a ilha onde está instalada (Energia Oceânica, 2013).

Um dispositivo OWC pode ser visto na Figura 6, abaixo.

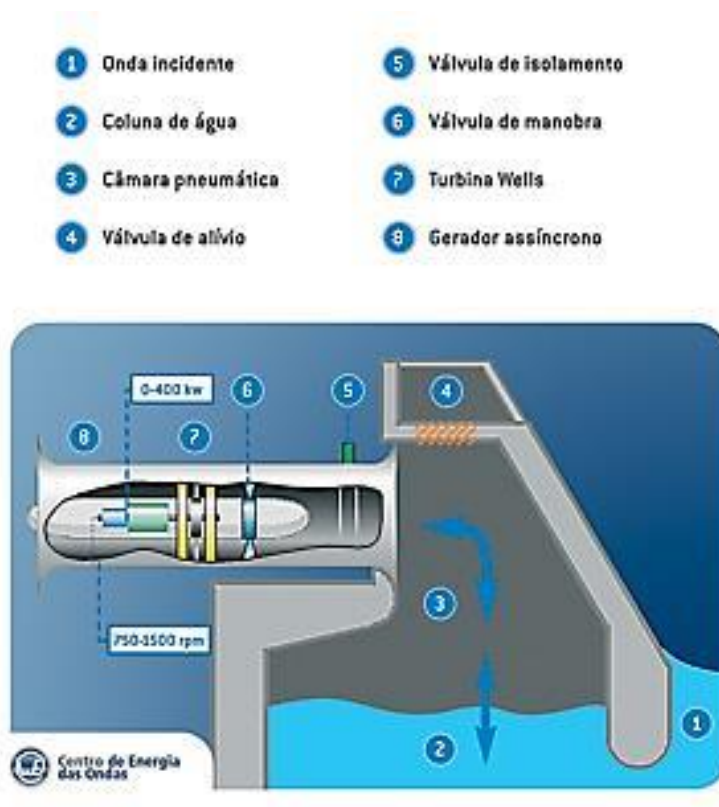


Figura 6 – Dispositivo de Coluna de Água Oscilante (OWC), (Support Wave Energy, 2013)

### 3.1.2 Conversor de Onda Oscilante

O conversor oscilante de ondas é um equipamento que fica submerso, mas perto da superfície. Sua estrutura é composta por um coletor, que fica sobre um braço, que fica sobre equipamento próximo ao fundo do mar. O movimento da onda entra em contato com o coletor realizando um

movimento de translação. Esse movimento é utilizado para a produção de energia (AQUARET, 2013).

O dispositivo pode ser visualizado na Figura 7, abaixo:

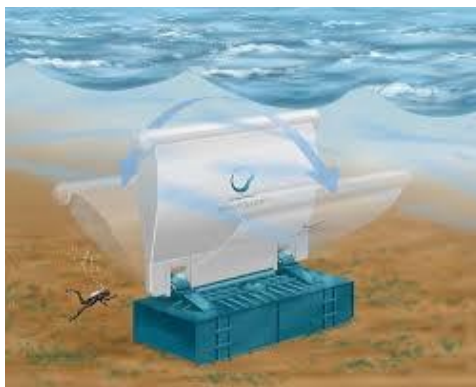


Figura 7 – Dispositivo Conversor de Onda Oscilante (Aquaret, 2013)

### 3.1.3 Sistema bioWave

O sistema bioWave foi inventado com base nos movimentos que algumas algas, como a *Nereocystis*, realizam devido ao deslocamento de água realizado pelas ondas. Este tipo de gerador de energia se baseia no Conversor Oscilante de Translação das Ondas (Gizmag, 2011).

A estrutura é formada por uma base triangular onde está localizado o reservatório de óleo, a caixa de distribuição de óleo, os acumuladores, onde ocorre a união dos fluidos de óleo que vêm das bombas e o motor hidráulico, que está ligado ao gerador de energia elétrica. Uma coluna, perpendicular à base, é conectada às pás cilíndricas e flutuantes, em um formato que lembra as algas dita anteriormente. Por essas colunas passam as linhas do fluido de óleo, que vem do reservatório, e são levadas para as bombas, localizadas ao lado do eixo. Essas bombas levam o fluido para os acumuladores, onde ocorre a união dos óleos das duas bombas, e é direcionado para o motor hidráulico, que está conectado a um gerador elétrico (Gizmag, 2011).

Este dispositivo está sendo implementado no estado de Vitória, na Austrália (Gizmag, 2011).

O sistema pode ser visualizado na Figura 8 a seguir.



Figura 8 – Dispositivo bioWave (Gizmag, 2011)

### 3.1.4 Sistema AWS (Archimedes Wave Swing)

O sistema Archimedes Wave Swing, baseia-se no dispositivo conversor de energia denominado Dispositivos Submersos de Diferença de Pressão.

Possui uma estrutura cilíndrica, que fica totalmente submersa, com ar sob pressão em seu interior. A parte inferior do cilindro, denominada pontão, fica ancorada ao fundo do mar para não ser deslocado com o movimento da água e a parte superior, denominada flutuador, fica flutuando e é movimentada para cima e para baixo, como um êmbolo, conforme as ondas passam sobre o dispositivo.

Quando a crista da onda passa pelo dispositivo, ocorre um aumento de pressão sobre o mesmo e dessa forma a parte superior do cilindro é pressionada para baixo sobre a parte inferior. Dessa forma, o ar sob pressão, que se encontra dentro do sistema, também é pressionado, aumentando ainda mais sua pressão, e quando a onda termina sua passagem, ou seja, quando passa o vale da onda, este ar reestabiliza o cilindro, empurrando o flutuador para cima novamente.

O dispositivo encontra-se ligado a um gerador de indução linear, o qual consegue converter diretamente a energia mecânica produzida pelo movimento do cilindro em energia elétrica (NNMREC, 2013).

A empresa holandesa, Teamwork Technology BV, desenvolveu, em 2006, um projeto-piloto de 2 MW, instalado ao largo da Póvoa de Varzim (NNMREC, 2013).

O sistema AWS, Archimedes Wave Swing, pode ser visualizado na Figura 9, abaixo.



Figura 9 – AWS – Archimedes Wave Swing (NNMREC, 2013)

### 3.1.5 Sistema Wave Dragon

O Wave Dragon é um sistema flutuante, baseado no dispositivo de conversão de energia

Dispositivos de Galgamento.

É um sistema dinamarquês que utiliza um método de acumular água sobre o dispositivo, em um reservatório, denominado dispositivo de alagamento.

Ele tem uma disposição em arco onde suas pontas possuem uma estrutura em forma de rampa, onde se encontram dispositivos parabólicos que concentram a onda incidente aumentando o desnível, dessa forma quando a onda passa, a água é empurrada para o reservatório, localizado em um nível superior ao do mar, onde é acumulada e depois passa pelas turbinas hidráulicas de baixa pressão que estão posicionadas no centro do sistema. Ao passar pelas turbinas, é acionado o gerador elétrico e a eletricidade é conduzida para terra por cabos submarinos (Ambiente HSW, 2013).

Está prevista a instalação de um sistema com 1,5 MW de potencial energético, em águas com profundidade entre 50 e 80 metros e localizadas a 500 metros de distância do litoral de Um Mess, na Escócia (Ambiente HSW, 2013).

Este sistema pode ser visualizado na Figura 10 a seguir.

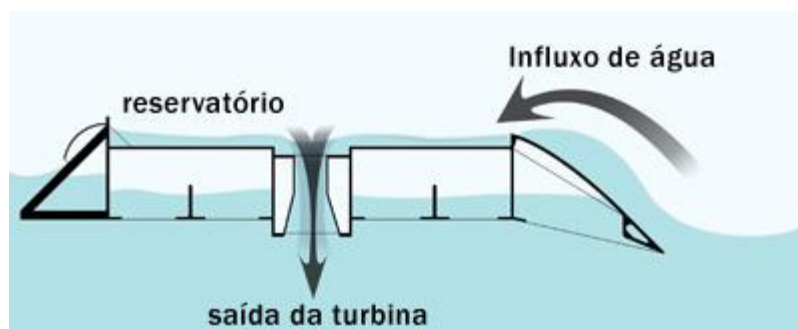


Figura 10 – Sistema Wave Dragon (Ambiente HSW, 2013)

Na Figura 11, demonstrada a seguir, um protótipo, do sistema Wave Dragon, está sendo testado em Nissum Bredning, na Dinamarca.



Figura 11 – Sistema, Wave Dragon, sendo testado em Nissum Bredning, Dinamarca (Direcção-Geral de Energia e Geologia, 2004)

### **3.1.6 Outros Sistemas**

Outros sistemas também são utilizados, podendo eles serem baseados nas tecnologias citadas acima ou possuindo sua tecnologia e sua específica forma de conversão de energia. Cada um com seus custos devido a instalação, manutenção e geração de energia e seus respectivos desenvolvimentos para obtenção da energia elétrica.

Os modelos atualmente mais desenvolvidos e que já possuem ao menos uma planta-piloto para realização de testes são o OWC OSPREY, que utiliza o dispositivo de Coluna de Água Oscilante, o sistema LIMPET, que também utiliza o dispositivo de Coluna de Água Oscilante, o sistema projetado pela Coppe, que utiliza o movimento de braços mecânicos e de uma câmara hiperbárica para pressurizar o fluido, e o sistema PELAMIS, utilizado em Portugal.

Estes sistemas serão explicados mais profundamente no próximo capítulo e será feita uma análise técnica e financeira no capítulo 6 utilizando a metodologia descrita no capítulo 5.

## **3.2 Classificação dos Conversores**

Cada dispositivo ondomotriz possui uma respectiva tecnologia, o que favorece a diversificação de geradores ondomotriz obtidos atualmente. Para uma melhor compreensão e para facilitar as pesquisas e desenvolvimentos de dispositivos que utilizam métodos parecidos para obtenção de energia, foi criada uma classificação baseada na forma de utilização destes equipamentos, como a região onde a usina é implantada e se está em alto mar, qual a profundidade em que se encontram e sua distância com relação à costa, sendo a profundidade mais relevante do que a distância. Estes dispositivos tem a seguinte classificação, baseado na conferência Européia de energia de ondas (INPI).

### **3.2.1 Dispositivos Costeiros (onshore)**

São dispositivos fixos ou embutidos na linha costeira, sujeitos à rebentação (Energia Oceânica, INPI).

Devido a sua proximidade, alguns benefícios são obtidos como não precisar de cabos submersos para condução de eletricidade, maior facilidade para instalação e manutenção dos equipamentos e maior facilidade de acesso ao equipamento, não necessitando de embarcações. Porém algumas desvantagens também são relevantes quanto à utilização deste dispositivo, como a profundidade do mar que se tem na orla, possuindo menor potencial energético, a degradação devido às condições climáticas e devido à rebentação das ondas, que também causa perda energética, como perda de energia devido ao contato da onda com o fundo do mar, a degradação ambiental devido a sua construção e a poluição visual.

Todas essas vantagens e desvantagens devem ser levadas em consideração em um projeto de uma

usina de gerador ondomotriz.

Os efeitos de dissipação de energia devidos ao atrito, fruto da interação da onda com o fundo do mar, manifestam-se para profundidades inferiores a 80 metros e os associados à rebentação das ondas são dominantes para profundidades inferiores a 10 metros, pelo que em média um dispositivo costeiro tem apenas disponível entre 25% e 50% do recurso disponível para um recurso afastado da costa (CRUZ e SARMENTO, 2004).

Neste dispositivo costeiro, o tipo de dispositivo mais utilizado é o de Coluna de Água Oscilante (OWC) onde países como Escócia, Japão e Portugal e a região do Reino Unido possuem sistemas como esse sendo projetados e construídos.

Outro tipo de dispositivo é o com câmara hiperbárica, com tecnologia brasileira, tendo um sistema de teste instalado no porto de Pecém, no Ceará.

### **3.2.2 Dispositivos próximos da costa (near-shore)**

Os dispositivos near-shore são instalados em águas pouco profundas, tendo aproximadamente entre 20m e 25m de profundidade (Energia Oceânica, INPI). Ou seja, estão localizados em regiões próximas da zona de rebentação das ondas. Teoricamente, estão situados em uma região de médio potencial energético.

Estes dispositivos podem ser considerados uma boa alternativa para o dispositivo onshore, caso o local de instalação tenha restrições quanto ao meio ambiente. (RHINEFRANK et al., 2005).

Exemplos de sistemas que são utilizados por esse dispositivo é o Conversor Oscilante de Translação de Ondas, como o bioWave. E um sistema que pode ser classificado nesta categoria é o de Coluna de Água Oscilante quando instalado em quebra-mares, como o OWC OSPREY.

### **3.2.3 Dispositivos afastados da costa (offshore)**

Os dispositivos offshore são instalados em águas mais profundas, tendo acima de 25 metros de profundidade. Ou seja, são dispositivos que costumam estar muito longe da costa, em média depois de 500 metros da costa (Energia Oceânica, INPI).

Pelo fato de estar em águas profundas, consegue-se um maior potencial energético, pois as ondas nessa região possuem mais energia e não sofrem tantas perdas, como as ondas próximas do litoral. E por este motivo recebem o nome de Terceira Geração, além de serem mais recentes que os dispositivos onshore e near-shore.

As vantagens deste dispositivo são que pode se obter uma quantidade de energia maior do que os outros sistemas, não têm problemas com relação à poluição visual e degradação do ambiente, como o



dispositivo onshore. E possui algumas desvantagens como custos elevados de manutenção, difícil acesso ao dispositivo, necessitando de embarcações, dificuldade em levar a energia elétrica à costa, necessitam de um sistema de ancoragem e alguns desses sistemas possuem problemas com relação às rotas de embarcações (INPI).

Por possuírem elevados custos e perdas de energia, o valor de produção de energia elétrica também é elevado.

Alguns exemplos de dispositivos que utilizam esse dispositivo são o PELAMIS, utilizado em Portugal e que possuem um sistema de atuadores, o AWS (Archimedes Wave Swing), que são submersos e se beneficiam das pressões criadas pelas ondas, e o Wave Dragon, que são dispositivos flutuantes que se beneficiam do galgamento das ondas.

## 4. DESCRIÇÃO DOS CONVERSORES A SEREM ANALISADOS

Como demonstrado anteriormente existem diversos sistemas de conversão de energia, sendo eles classificados pela localização de instalação de suas usinas e pelo tipo de tecnologia utilizada. Muitos países estão investindo nessa fonte de energia renovável e se especializando em alguns desses tipos de conversores ondomotriz. O país que se encontra na frente com relação às pesquisas é Portugal, mas outros países já possuem um sistema projetado e em fase de testes, como o Reino Unido, Dinamarca e Noruega. E outros países estão criando e desenvolvendo suas respectivas tecnologias como o Brasil, que projetou o sistema utilizando uma câmara hiperbárica e está sendo utilizada no Ceará. (Usina para Geração de Energia Elétrica pelas Ondas do Mar, Documento de Patente, 2006).

Foram selecionados, devido estarem mais desenvolvidos e já sendo utilizados em testes, quatro sistemas, o OWC OSPREY, o LIMPET, o sistema da COPPE/UFRJ e o PELAMIS, para serem realizadas as análises financeiras. Podendo, estes sistemas, ser comparados com Pequenas Centrais Hidrelétricas.

Estes sistemas serão descritos neste capítulo e serão analisados tecnicamente e economicamente. Determinando, assim, o objetivo desse projeto que é verificar se o Brasil possui condições de instalar uma usina de Gerador Ondomotriz e qual sistema melhor se adapta às condições brasileiras.

### 4.1 OWC OSPREY

O sistema OWC OSPREY (Ocean Swell Powered Renewable Energy) foi projetado pela empresa Wavegen, na Escócia em torno do ano de 1990. Este sistema é classificado como um dispositivo de coluna de água oscilante e, com relação à localização de sua usina no mar, como nearshore. Apesar de usar um dispositivo de Coluna de Água Oscilante, que normalmente é classificado como onshore, esse gerador é instalado em um quebra-mar, estando localizado em uma região com profundidade maior do que o dispositivo onshore. Podendo produzir 400 kW de potencial energético (ASSIS, 2010).

Era constituído por uma estrutura metálica de parede dupla, que deveria ser rebocada até ao local de instalação, onde seria fundeada através do enchimento de suas paredes ocas, com materiais densos, ficando assentada no mar. A ocorrência de um acidente na fase de fundeamento levou à interrupção do projeto. Nos anos seguintes, o projeto foi retomado com a possibilidade de inclusão de uma turbina eólica offshore, como pode ser visualizado na Figura 13. (ASSIS, 2010).

A turbina criada para esse sistema chama-se Turbina Wells, Figura 12, e independente do sentido em que o ar passa por ela, a produção de energia elétrica não é prejudicada. Esta turbina foi desenvolvida na década de 70, recebendo o nome de seu idealizador, o professor Alan Wells, da Queens University of Belfast, no Reino Unido (COSTA, 2004).

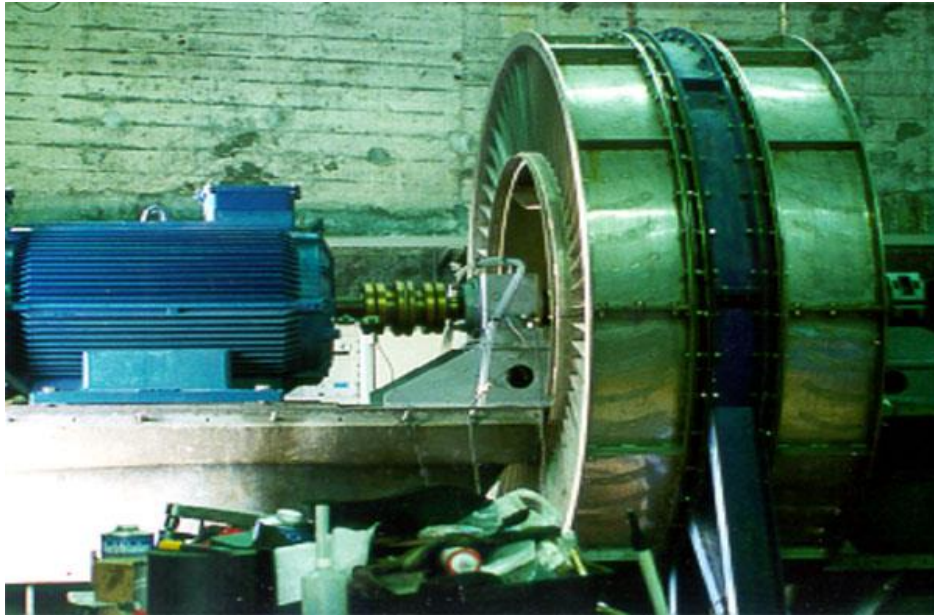


Figura 12 – Turbina Wells utilizada na Ilha do Pico - Açores, Portugal (Portal das Energias Renováveis, 2013)

Após o ar passar pela turbina, ele retorna para a câmara de ar, devido à despressurização criada pela onda, e a turbina faz o dispositivo gerador iniciar a produção de energia elétrica.



Figura 13 – Dispositivo Osprey (DIAS, 2013)

## 4.2 Sistema LIMPET

O sistema LIMPET (Land Installed Marine Power Energy Transmitter) foi projetado no Reino Unido e foi o primeiro dispositivo de conversão de energia utilizado comercialmente. Ele surgiu como uma continuação do protótipo instalado na Ilha de Islay, na Escócia, que produzia 500 kW de potência (ASSIS, 2010).

Este conversor de energia ondomotriz também utiliza o dispositivo de Coluna de Água Oscilante

para conversão de energia, mas diferente do sistema OWC OSPREY, o LIMPET é um sistema onshore, instalado na costa do litoral. Porém sua instalação foi modificada para obter um custo menor de implantação e uma maior facilidade de instalação.

Para a construção de sua instalação é feita uma escavação em terra firme e, depois de concluída a concretagem, é feita uma abertura para a entrada da água do mar, retirando-se o material que bloqueia a água (COSTA, 2004).

O conversor funciona também com uma câmara de ar situada dentro de uma estrutura instalada na costa do litoral. Quando uma onda entra e sai da estrutura ocorre uma variação de pressão na câmara de ar forçando o ar a passar pelas Turbinas Wells, que estão conectadas a um gerador elétrico. E seu potencial energético pode ser obtido pelo produto da vazão de ar que passa pela turbina e a pressão obtida na câmara de ar. O funcionamento deste conversor pode ser visualizado na Figura 14.

A central de energia atual, denominada Limpet II, teve seu início no ano 2000 e está equipada com duas turbinas tipo Wells de 2,6 metros de diâmetro e com 250 kW cada uma, conseguindo produzir um total de 500 kW (COSTA, 2004).

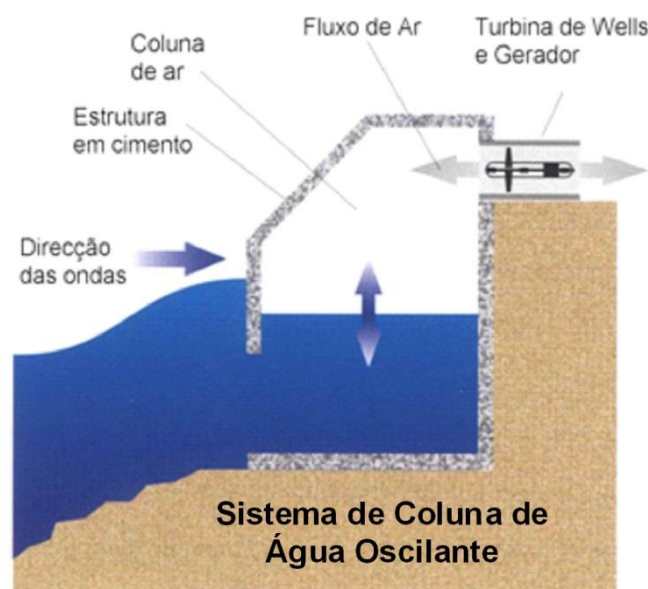


Figura 14 – Funcionamento de um dispositivo LIMPET (Efacec, 2013)

Um dispositivo como este está sendo utilizado no mesmo local do protótipo que iniciou o projeto, ou seja, na Ilha de Islay, Escócia. Este dispositivo pode ser visualizado na Figura 15 a seguir:



Figura 15 – Central LIMPET, instalada na Ilha de Islay, Escócia (Voith, 2013)

### 4.3 Sistema COPPE/UFRJ

O dispositivo da Coppe foi projetado no Laboratório de Tecnologia Submarina (LTS) na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), recebendo o apoio de algumas empresas. Sendo projetada para produzir 50 kW de potencia e tendo o objetivo de ser ampliada com a agregação de módulos para produzir 500 kW (ASSIS, 2010).

Este sistema utiliza o método de conversão de energia com uma câmara hiperbárica, tecnologia desenvolvida pela própria Coppe, a qual teve sua patente publicada em 2006. Ele pode classificado como um dispositivo onshore, quando utiliza um píer instalado na região costeira, ou nearshore, quando utiliza uma plataforma apoiada no fundo do mar, próxima ao litoral, e ainda pode ser adaptada para offshore, quando instalada em regiões mais profundas.

Uma usina teste foi instalada no porto de Pecém no Ceará, onde entrou em funcionamento no ano de 2011. Ela foi instalada no quebra-mar, então a classificação desta usina é nearshore.

A usina opera pelo movimento de flutuadores horizontais acoplados a uma estrutura de viga treliçada, que aciona uma bomba hidráulica de movimentos alternados, a qual injeta água em uma câmara hiperbárica. A câmara então fornece um jato de água com pressão e vazão pré-determinados, através de uma válvula reguladora de vazão, para acionar uma turbina convencional, que acoplada a um gerador, fornece energia elétrica.

Na Figura 16, pode-se observar cada componente da usina de ondas da Coppe: A – Flutuador, B – Braço treliçado, C – Bomba hidráulica, D – Plataforma de sustentação e fixação, E – Câmara hiperbárica, F – Válvula reguladora de vazão, G – Turbina hidráulica e H – Gerador Elétrico.

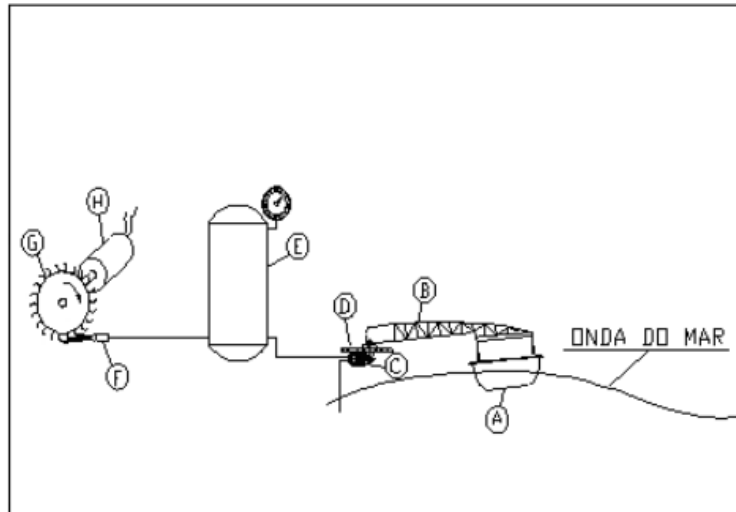


Figura 16 – Demonstração da usina de ondas da Coppe (Assis, 2010)

Os flutuadores podem ter formas variáveis, mas é recomendado o uso de flutuadores retangulares, os quais são fixos em braços treliçados horizontais e com articulações na extremidade oposta aos flutuadores. Quando a onda passa sob os flutuadores, os braços são movimentados para cima e quando o vale da onda passa pelos flutuadores, os braços descem. O movimento de subir e descer dos braços acionam bombas hidráulicas, de movimentos alternados, que têm como objetivo abastecer e manter elevada a pressão no interior das câmaras hiperbáricas, previamente pressurizadas com gás nitrogênio ou ar e água, caracterizando acumuladores hidráulicos.



Figura 17 – Usina da Coppe instalada no porto de Pecém, Ceará (Mar Sem Fim, 2013)

Ao passar pelas câmaras hiperbáricas, a água é liberada por uma válvula, resistente a altas pressões, reguladora de vazão para acionar uma turbina. A válvula opera com pressões de até 2600 psi (175 bar ou 1750 mca) e vazões de 0,05 m<sup>3</sup> e 0,3 m<sup>3</sup> e foi projetada especialmente para atender ao controle de potência durante as variações de demanda elétrica, assim como a parada da usina para manutenção ou emergência. Quando a água entra em contato com a turbina, ela começa a girar, acionando um gerador e iniciando o processo de conversão de energia mecânica em energia elétrica. Um sistema eletro-eletrônico de controle, monitora a tensão e frequência da eletricidade produzida, fornecendo uma alimentação adequada da rede elétrica (Patente Coppe, 2006).

O potencial energético da usina pode ser obtido multiplicando a vazão pela pressão produzida pela câmara hiperbárica durante a operação. A pressão que a câmara consegue produzir pode ser comparada a uma queda de água utilizada em hidrelétricas, que utilizam a energia potencial para geração de energia. As faixas de pressão de operação da usina estão associadas às condições de mar predominantes em cada local, tais como frequência e altura média das ondas, podendo assumir valores entre 350 metros de coluna de água e 1750 metros de coluna de água (Patente Coppe, 2006).

A água utilizada na usina pode ser diretamente adquirida do mar ou pode ser criado um reservatório, fazendo um sistema fechado de circulação de água tratada.

#### **4.4 Pelamis**

O Pelamis é um sistema offshore desenvolvido pela Ocean Power Delivery, na Escócia, e se enquadra como um conversor de energia do tipo atenuador. Pois são flutuadores colocados perpendicularmente à direção das ondas e possuindo articulações que bombeiam óleo para o sistema gerador de energia. Este dispositivo foi desenvolvido para conseguir atingir uma produção de 750 kW.

Desde 1998, o programa de desenvolvimento Pelamis cobriu todos os aspectos do projeto a partir do conceito de refinamento fundamentais através de testes de ciclo acelerado de componentes individuais para a confiabilidade. Durante a primeira fase de desenvolvimento Pelamis, antes das operações em larga escala, em 2004, uma extensa análise, modelagem numérica e uma gama de modelos de demonstração de tecnologia em diferentes escalas foram utilizados para entender as características de sobrevivência em ondas extremas e verificar a precisão das simulações. Modelagem e escala numérica de testes conua a ser uma parte importante da pesquisa e desenvolvimento de tecnologia Pelamis.

Em 2006, o protótipo foi atualizado para a mesma especificação como as máquinas de produção utilizados no projeto Aguçadoura. Outros testes no mar foram realizados. A máquina, em seguida, completou mais uma extensa fase de testes, atendendo a um grande número de objetivo de teste críticos. O protótipo tem 120 metros de comprimento, em quatro seções, 3,5 metros de diâmetro e é compasta de tubos ligados por três, mais curtos, módulos de conversão de energia. Testes desta

máquina provou o conceito Pelamis, manuseio da máquina, ligação à rede, e que a geração de energia e o comportamento foram combinados com modelos numéricos (Site, [www.energiasrenovaveis.com](http://www.energiasrenovaveis.com)).

A máquina Pelamis P2 é a uma máquina de segunda geração e inclui uma série de melhorias significativas no projeto. A máquina de desenho P2 foi vendida para clientes de serviços públicos E.ON e Scottish Power Renewables, e as máquinas P2 estão sendo testadas atualmente para uma série de projetos em escala comercial. Possuem 180 metros de comprimento, com cinco cilindros, 4m de diâmetro e aproximadamente 1.350 toneladas. O Pelamis P2 é maior, mais longo e mais pesado do que a máquina de desenho P1. Isso permite que o Pelamis produza mais energia, reduzindo, substancialmente, o custo por MW. É composto por cinco tubos e, portanto, quatro articulações, possuindo uma seção de tubo extra e um módulo de potência extra. A melhoria da tomada de força do sistema para o P2 permite maior eficiência, maior resolução de controle e maior confiabilidade. O ângulo da articulação do envelope foi aumentado permitindo maior movimento articular para aumentar, significativamente, a absorção de energia entre os estados do mar. Ao invés das seções separadas do P1, os módulos de potência estão agora integrados nas secções tubulares principais. A junta universal permitindo dois graus de liberdade substitui o único grau de articulação do P1 (Site, [www.docsetools.com](http://www.docsetools.com)).

Essas mudanças reduzem os números das caras fabricações das máquinas. O processo de conexão do tubo foi simplificado, ampliando as opções de cadeia de suprimentos estruturais e mecânicas.

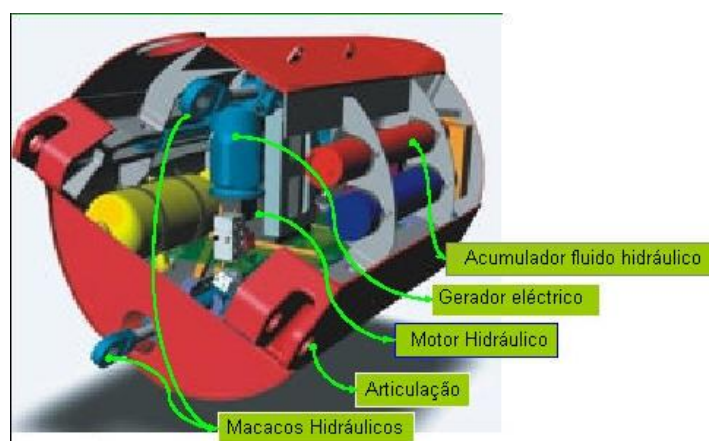


Figura 18 – Demonstração do interior dos tubos da Pelamis (Uma Nova Alternativa, 2013)

O dispositivo Pelamis (PELAMIS WAVE POWER, 2011) é classificado como offshore e possui uma estrutura semi-submersa composta por vários cilindros horizontais, ligados entre si por articulações e dispostos segundo a direção de incidência das ondas. O movimento das articulações provocado pela ondulação é resistido por cilindros hidráulicos que bombeiam óleo em alta pressão para motores hidráulicos. Os motores hidráulicos acionam geradores elétricos, sendo a energia transportada por um único cabo umbilical para um ponto de ligação no fundo. Os componentes podem ser visualizados na Figura 18.



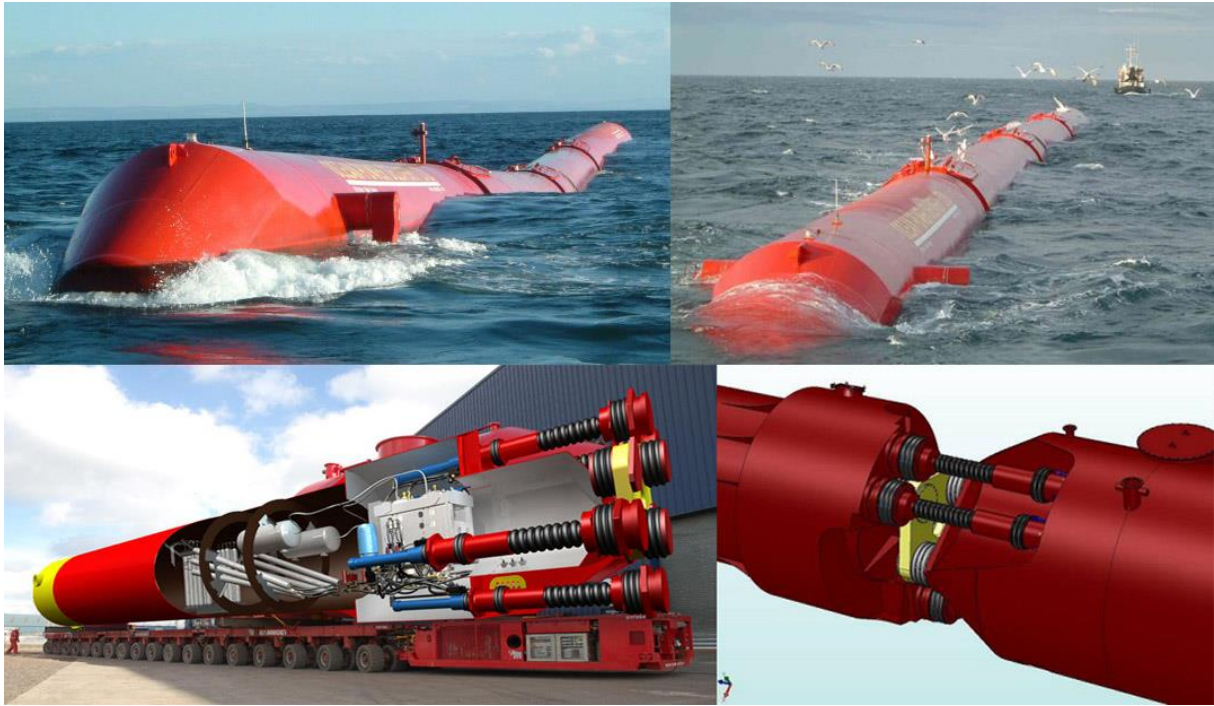


Figura 19 – Na parte superior, a Pelamis em funcionamento em Aguçadoura, Portugal e na parte inferior, demonstrando o interior do Pelamis e a articulação do sistema (Energias como Bienes Comunes, 2012)

## 5. METODOLOGIA

Para um planejamento energético eficiente, que viabilize a tomada de decisões no setor de energia, considerando suas peculiaridades, é necessário descrever uma metodologia para realizar uma análise econômica de projetos de energia.

A análise que será apresentada servirá de base para fazer as comparações de custo/benefício entre os sistemas selecionados. Para realizar essas análises alguns dados deverão ser utilizados como investimentos iniciais, custos de operação e manutenção, taxa de juros, vida útil e entre outros critérios que serão demonstrados a seguir. Desta forma consegue-se verificar o custo/benefício de cada sistema analisado.

Na sequência, reuniram-se informações para auxiliar no processo de seleção de tecnologias para o aproveitamento. Estas informações incluem aspectos tecnológicos e econômicos tais como: fator de capacidade, custos de investimento, de operação, de manutenção, de sistemas de transmissão e construção civil, que servirão como base para seleção de uma tecnologia.

O modelo que será apresentado na metodologia para realizar a análise econômica será a de Custo/Benefício, que é utilizada para uma Avaliação Econômica de Projetos de Energia, apresentada por Carvalho no projeto Avaliação Econômica de Projetos de Energia – Análise Custo-Benefício, X CBE – Congresso Brasileiro de Energia, 2004. Pois este é um modelo simples que permite fácil comparação entre as alternativas consideradas.

De acordo com a apresentação Análise Econômica de Projetos de Energia – Análise Custo-Benefício, apresentada por Carvalho no X Congresso Brasileiro de Energia – CBE, 2004, para realizar a análise de Custo/Benefício, deve-se calcular o Custo Anual do Insumo Energético (CC), que é calculado em US\$/kWh, o Custo Anual de Manutenção (CM), que é calculado em US\$/kWh, o Valor Anual do Subproduto (VS), que é calculado em US\$/kWh e a Vida Útil Efetiva (vE). Além desses valores calculados, deve-se saber também o Investimento Inicial (I) em US\$, o Valor Residual (R), que é calculado em US\$ e a Taxa de Juros ( $i$ ) ao ano [aa].

Cada um destes itens serão demonstrados na metodologia e será obtida a fórmula final de Custo/Benefício que será utilizada para a realização dos cálculos de comparação financeira das alternativas selecionadas.

### 5.1 Custo Anual do Insumo Energético (CC)

Para iniciar os cálculos, deve-se verificar o Custo Anual do Insumo Energético (CC) em função do Preço Específico do Combustível (PEC) em US\$/kg, da Potência Instalada (PI) em kW, do Fator de Capacidade de Energia (FC) [adimensional], a quantidade de horas anual (8760) em horas, do

Rendimento da Tecnologia Geradora de Energia ( $\eta$ ) [adimensional] e do Poder Calorífico do Combustível (PCI) em kWh/kg, como demonstrado na Equação (13).

$$CC = \frac{PEC \times PI \times FC \times 8760}{\eta \times PCI} \text{ [US\$/kWh]} \quad (13)$$

## 5.2 Custo Anual de Manutenção (CM)

Em seguida, verifica-se o Custo Anual de Manutenção (CM) em função do Custo de Manutenção Específico (CEM) em US\$/kWh, do Potencial Instalado (PI) em kW, do Fator de Capacidade (FC) [adimensional] e da quantidade de horas anual (8760) em horas, como demonstrado na Equação (14).

$$CM = CEM \times PI \times FC \times 8760 \text{ [US\$/kWh]} \quad (14)$$

## 5.3 Valor Anual do Subproduto (VS)

Em seguida, verifica-se o Valor Anual do Subproduto (VS) em função do Valor do Subproduto Específico (VES) em US\$/kWh, do Potencial Instalado (PI) em kW, do Fator de Capacidade (FC) [adimensional] e da quantidade de horas anual (8760) em horas, como demonstrado na Equação (15).

$$VS = VES \times PI \times FC \times 8760 \text{ [US\$/kWh]} \quad (15)$$

## 5.4 Vida Útil Efetiva (vE)

Em seguida, verifica-se a Vida Útil Efetiva (vE) em função da Vida (v) em anos e do Fator de Capacidade (FC) [adimensional], como demonstrado na Equação (16).

$$vE = \frac{v}{FC} \quad (16)$$

## 5.5 Análise Custo/Benefício (C/B)

A fórmula do Custo/Benefício é obtida com o somatório dos Custos e dividida pela Produção Anual de Energia. Desta forma, fazendo o somatório do Custo Anual do Insumo Energético (CC), mais o Custo Anual de Manutenção (CM), menos o Valor Anual do Subproduto (VS), mais o Investimento Inicial (I) vezes a Taxa de Juros ( $i$ ), mais os valores relacionados com o Investimento

Inicial, Valor Residual ( $R$ ), Vida ( $v$ ) e a Taxa de Juros e dividir esses valores pela Potência Instalada ( $PI$ ), pelo Fator de Capacidade ( $FC$ ) e as horas anual, obtem-se a fórmula de Custo/Benefício, como demonstrado na Equação (17).

$$\frac{C}{B} = \left( CC + CM - VS + I x i + \frac{(I - R)xi}{(1 + i)^{vE} - 1} \right) x \frac{1}{PIxFCx8760} \quad (17)$$

Substituindo as fórmulas demonstradas nos subitens 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4, deste capítulo, na Equação (17), obtem-se a seguinte fórmula demonstrada na Equação (18):

$$\frac{C}{B} = \frac{PEC}{\eta x PCI} + CEM - VES + \left( I x i + \frac{(I - R)xi}{(1 + i)^{\frac{v}{FC}} - 1} \right) x \frac{1}{PIxFCx8760} \quad (18)$$

Onde,  $C/B$  é a relação Custo/Benefício [US\$/kWh],  $PEC$  é o Preço Específico do Combustível [US\$/kg],  $PCI$  é o Poder Calorífico do Combustível [kWh/kg],  $\eta$  é o Rendimento da Tecnologia Geradora de Energia,  $CEM$  é o Custo de Manutenção Específico [US\$/kWh],  $VES$  é o Valor do Subproduto Específico [US\$/kWh],  $R$  é o Valor Residual [US\$],  $I$  é o investimento inicial [US\$],  $FC$  é o Fator de Capacidade Energia,  $v$  é a vida [anos],  $PI$  é a Potência Instalada [kW] e  $i$  é a taxa de juros [aa].

Como os conversores de energia por ondas do mar não utilizam combustível e não existe um subproduto produzido, além do produto que é a energia elétrica, então os valores do Preço Específico do Combustível  $PEC$ , o Poder Calorífico do Combustível ( $PCI$ ) e o Valor do Subproduto Específico ( $VES$ ) podem ser considerados nulos.

Logo, a fórmula final que será utilizada para os cálculos de Custo/Benefício para as alternativas selecionadas é a equação seguinte:

$$\frac{C}{B} = CEM + \left( I x i + \frac{(I - R)xi}{(1 + i)^{\frac{v}{FC}} - 1} \right) x \frac{1}{PIxFCx8760} \quad (19)$$

Onde,  $C/B$  é a relação Custo/Benefício [US\$/kWh],  $CEM$  é o Custo de Manutenção Específico [US\$/kWh],  $R$  é o Valor Residual [US\$],  $I$  é o investimento inicial [US\$],  $FC$  é o Fator de Capacidade da Energia,  $v$  é a vida [anos],  $PI$  é a Potência Instalada [kW] e  $i$  é a taxa de juros [aa].

## 6. ANÁLISE FINANCEIRA

Para viabilizar este estudo serão feitas análises técnicas e de custos para verificar se é rentável a instalação de uma usina ondomotriz no litoral do Rio Grande do Sul. Para isto, deve-se analisar alguns pontos como eficiência dos modos de conversão da energia, custos de investimentos, operação, manutenção, sistemas de transmissão e construção civil. Desta forma, pode-se complementar a análise explicitada no capítulo 5 referente à metodologia.

As tecnologias analisadas neste estudo foram classificadas como Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH'S de 20 MW de potência instalada), segundo os critérios estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, que assim classificam as PCH'S segundo a potência instalada (potências entre 1MW e 30 MW).

Em seguida, foi adotado o esquema de Custo/Benefício da Avaliação Econômica de Projetos de Energia – Análise Custo-Benefício, apresentada por Carvalho no X CBE – Congresso Brasileiro de Energia, 2004, onde foram realizadas análises comparativas das alternativas tecnológicas para a área selecionada. Na sequência, procedeu-se a uma análise econômica preliminar com o propósito de selecionar uma alternativa para explorar os recursos disponíveis no litoral do Rio Grande do Sul. Local avaliado para a instalação da usina.

Os critérios adotados para a seleção prévia das tecnologias para explorar o recurso energético foram: eficiência dos modos de conversão de energia, disponibilidade, avanços nas usinas testes e forma de fixação do dispositivo na costa. As tecnologias pré-selecionadas foram:

1. Sistema OWC OSPREY, com potência nominal de 0,5MW;
2. Sistema LIMPET, com potência nominal de 0,5 MW;
3. Sistema COPPE, com potência nominal de 50 kW, a ser expandido com a agregação de módulos para atingir 0,5 MW;
4. Sistema PELAMIS, potência nominal de 0,75 MW.

O nível de potência de 0,5 MW tem a ver com as amplitudes de pressão de ar que normalmente são possíveis de se criar utilizando estes tipos de centrais, sendo adequadas para gerar potências nominais em torno deste valor. (WAVE ENERGY CENTER, 2004).

Para este trabalho foram consideradas usinas com uma Capacidade da Planta de 20.000 kW aproximadamente. Na Tabela 01, mostrada em seguida, tem a relação de cada Capacidade Nominal e da Planta para cada sistema com suas respectivas quantidades de aparelhos, que são as partes que geram a energia, e os módulos, que são as partes como um todo que geram a energia. Como exemplo, um módulo com 4 cilindros da Pelamis, tem 3 aparelhos. Sendo assim, cada planta foi configurada da seguinte forma:

Sistemas	Aparelhos/Módulos	Capacidade Nominal	Capacidade da Planta
OWC OSPREY	10 aparelhos	2.000 kW (0,5 ondas+2,5 eólica)	20.000 kW
LIMPET	40 aparelhos	500 kW	20.000 kW
COPPE/UFRJ	40 aparelhos	500 kW (10 módulos)	20.000 kW
PELAMIS	27 aparelhos / 9 módulos	750 kW	20.250 kW

Tabela 01 – Capacidade Nominal e da Planta para cada sistema (ASSIS, 2010, Adaptado)

A preferência por dispositivos onshore e nearshore se deu devido à existência dos molhes, que são os quebra mares nos portos, na zona avaliada em Rio Grande, que poderia ser aproveitado para fixação dos aparelhos. Esta estrutura existente confere-lhes vantagens imediatas: uma maior facilidade de instalação e manutenção, ausência de grandes extensões de cabos submarinos e de sistemas de fixação complexos, visto que a possibilidade de aproveitar a estrutura existente causará reduções significativas no investimento (CRUZ, 2004). Mas para realizar uma análise mais efetiva, também foi selecionada uma tecnologia offshore, podendo assim, realizar uma comparação entre todos os tipos de classificação dos dispositivos.

Os aparelhos pré-selecionados estão em plena fase de desenvolvimento e apresentam eficiência em torno de 35%, no item modo de conversão da energia e disponibilidade superior a 95%. (THORPE, 1999).

Após a pré-seleção, a escolha entre as alternativas foi feita tomando-se a de menor Custo/Benefício, de acordo com a Avaliação Econômica de Projetos de Energia – Análise Custo-Benefício, apresentada por Carvalho no X CBE – Congresso Brasileiro de Energia em 2004. Desta forma, pode-se utilizar a seguinte expressão para o cálculo do Custo/Benefício:

$$\frac{C}{B} = CEM + \left( I x i + \frac{(I - R)xi}{(1 + i)^{\frac{v}{FC}} - 1} \right) x \frac{1}{PI x FC x 8760} \quad (20)$$

Onde:

C/B – Custo/Benefício (US\$/kWh);

CEM – Custo de Manutenção Específico (US\$/kWh);

I – Investimento inicial (US\$);

i – Taxa de Juros ao ano (aa);

R – Valor Residual (US\$);

v – Vida (anos);

FC – Fator de Capacidade de Energia (adimensional);

PI – Potência Instalada (kW);

8760 - número de horas no ano.

A Tabela 02, apresentada a seguir demonstra os valores de cada item utilizado na fórmula apresentada anteriormente, onde o CM é o Custo de Operação e Manutenção em US\$ e a taxa de juros foi obtida de acordo com a taxa utilizada para investimentos em geração de energias renováveis pelo BNDES. Os dados desta tabela serão explicados no decorrer das análises financeiras de cada sistema neste capítulo.

Item/Tecnologia	OWC OSPREY	LIMPET	COPPE/UFRJ	PELAMIS
CM (US\$)	1.831.011,60	1.514.296,08	1.752.000,00	2.522.880,00
CME (US\$/kWh)	0,0190	0,0157	0,0182	0,0259
I (US\$)	60.703.808,00	56.085.040,00	56.400.000,00	75.359.311,20
i (aa)	0,082	0,082	0,082	0,082
R (US\$)	6.070.380,80	5.608.504,00	5.640.000,00	0,00
v (anos)	30	30	30	30
FC (adimensional)	0,55	0,55	0,55	0,55
PI (kW)	20.000	20.000	20.000	20.250
C/B (US\$/kWh)	0,0713	0,0640	0,0668	0,0901

Tabela 02 – Dados para os cálculos de Custo/Benefício de cada sistema (Assis 2010, Beserra 2007, BNDES 2015 e Javier 2012, adaptado)

## 6.1 Sistema OWC OSPREY

A empresa Wavegen é a fabricante desta tecnologia e tem utilizado sua experiência adquirida no primeiro protótipo OSPREY (Ocean Swell Powered Renewable energy), para melhorar muitos aspectos funcionais deste protótipo. Contudo, existem diversos aspectos do esquema que originam algumas incertezas sobre o desempenho técnico do aparelho.

Os estudos realizados pelo fabricante pretendem solucionar os inconvenientes e limitações do design convencional das OWC's, a saber: altos custos estruturais (no caso de grandes extensões) e eficiência moderada de captura da energia. Desta forma, nem todos os aspectos técnicos estão finalizados (THORPE, 1999).

O protótipo OSPREY consiste em uma estrutura de concreto ou aço com vida útil maior que 60 anos, no caso da estrutura de concreto, e 25 anos, para a estrutura em aço, sendo projetada para ser instalada em profundidades de aproximadamente 15 metros (ASSIS, 2010).

Há uma grande tendência em escolher o design de concreto, pois este oferece extensa possibilidade de redução de custos, através do uso de técnicas alternativas de construção. Ambos podem vir equipados com uma torre e turbina de 1.5 MW de potência. A condição de operação da turbina é semelhante às usadas nas unidades offshore (THORPE, 1999).

### **6.1.1 Análise econômica OWC OSPREY**

A avaliação foi feita para uma planta contendo 10 aparelhos, sendo o aparelho a unidade geradora de energia, possuindo um total de 20.000 kW instalados, e segundo Assis, 2010, é possível a instalação com mais de 10 aparelhos em um único local, recebendo aprovação ambiental. Se um maior número de aparelhos for incorporado em uma única planta, os custos de geração poderão ser reduzidos devido à queda nos custos de transmissão elétrica e conexão que podem ser custeados a partir de uma grande saída de energia (THORPE, 1999).

Utilizando o sistema OWC OSPREY aproximadamente 31% dos custos capitais podem ser evitados. Adicionalmente, aproximadamente 50% dos custos elétricos podem ser recuperados usando as linhas de transmissão elétrica do sistema OWC OSPREY (ASSIS, 2010).

LEGERTON, em 1997, ao estudar um sistema configurado para apresentar simultaneamente, a máxima saída para as turbinas Wells, acionadas pelas ondas, e para as turbinas eólicas, acionadas pelo vento, obteve um custo resultante para este esquema de US\$ 60.703.808,00. Neste custo estão incluídas 10 turbinas eólicas.

A disponibilidade do OSPREY é estimada em 95%. Estudos têm sido realizados com turbinas Wells e equipamentos de conversão de potência alcançando progressos, de modo que a mais recente estimativa de disponibilidade usando a mesma credibilidade do modelo é de 97% (THORPE, 1995).

O custo anual de operação e manutenção oriundo de todas as fontes descritas é superior a US\$ 1.831.011,60 ou aproximadamente US\$ 183.451,60 por aparelho, o que equivale a aproximadamente 3% do investimento total (ASSIS, 2010).

O valor residual foi calculado de acordo com os valores obtidos de outros sistemas de conversão de energia ondomotriz devido à falta de dados deste sistema em específico. Os sistemas analisados obtiveram como Valor Residual (R) um resultado aproximado de 10% do valor de investimento do respectivo sistema. Logo, utilizando esta taxa para este sistema obteve-se um Valor Residual de US\$ 6.070.380,80.

Este sistema possui uma vida de 60 anos para uma estrutura de concreto e 25 anos para uma estrutura de metal. A Eletrobrás estabelece como vida útil para projetos de energias renováveis, fotovoltaicas e eólicas, um período de 20 a 30 anos. (BESERRA, 2007). Logo, para este projeto foi selecionada uma vida útil de 30 anos.

De acordo com as situações apresentadas e fazendo os cálculos dos custos e da produção anual de energia de acordo com a fórmula Avaliação Econômica de Projetos de Energia demonstrada na metodologia, obteve-se um Custo/Benefício de 0,0713 US\$/kWh.



## 6.2 Sistema LIMPET

Muitos aspectos do sistema têm sido desenvolvidos no decorrer de mais de uma década de trabalho, como também, a cooperação com outros pesquisadores e indústria. Contudo, existe somente um número limitado de áreas de incerteza, a maioria delas só pode ser respondida através de testes do aparelho:

1) A remoção de muitas rochas soltas é essencial para prevenir a entrada de cascalhos na câmara do aparelho quando em serviço;

2) A eficiência de captura do sistema tem sido provada em testes de modelo, mas ela é preferivelmente válida para um lugar específico;

3) A área selecionada tem um perfil costeiro com paredões que aumentam a eficiência de captura (HUNTER, 1991);

4) As turbinas estão situadas na saída de ar da câmara (saída de aproximadamente duas vezes o diâmetro da turbina) que poderia resultar numa corrente não linear de fluxo de ar e consequente perda de eficiência (CURRAN, RAGHUNATHAN and WHITTAKER, 1995). A empresa Wavegen, que fabrica o dispositivo, tem estudado simultaneamente os aspectos teóricos e práticos visando à redução deste efeito.

O aparelho foi projetado para ter uma vida útil de mais de 30 anos para a estrutura, mas a planta mecânica e elétrica terá uma vida útil menor. O método tem sido usar componentes robustos e confiáveis, obtendo a qualidade adequada quando usada em outras situações similares. (ASSIS, 2010).

### 6.2.1 Análise econômica LIMPET

Este é um campo que ainda está em desenvolvimento. Há grandes incertezas na estimativa dos custos, oriunda da falta de informações detalhadas, conduzindo a previsões entre US\$ 1.402.126,00 a 2.639.296,00 para um aparelho com capacidade nominal de 0,5MW (ASSIS, 2010). Para o presente projeto foi utilizado 40 aparelhos totalizando 20.000 kW de capacidade da planta. Como uma produção em larga escala diminui os custos, então foi considerado o menor custo, totalizando um investimento inicial de US\$ 56.085.040,00 para a planta.

Os custos anuais de operação e manutenção foram estimados em aproximadamente US\$ 37.934,88, por aparelho, o que equivale a 2,7% do investimento. O sistema está sendo desenvolvido com possibilidade de receber manutenção em localidades remotas, utilizando-se de mão de obra nativa (ASSIS, 2010).

O valor residual foi calculado de acordo com os valores obtidos de outros sistemas de conversão de energia ondomotriz devido à falta de dados deste sistema em específico. Os sistemas analisados obtiveram como Valor Residual (R) um resultado aproximado de 10% do valor de investimento do

respectivo sistema. Logo, utilizando esta taxa para este sistema obteve-se um Valor Residual de US\$ 5.608.504,00.

A Eletrobrás estabelece como vida útil para projetos de energias renováveis, fotovoltaicas e eólicas, um período de 20 a 30 anos (BESERRA, 2007). Logo, para este projeto foi selecionada uma vida útil de 30 anos.

De acordo com as situações apresentadas e fazendo os cálculos dos custos e da produção anual de energia de acordo com a fórmula Avaliação Econômica de Projetos de Energia demonstrada na metodologia, obteve-se um Custo/Benefício de 0,0640 US\$/kWh.

### **6.3 Sistema COPPE/UFRJ**

A usina proposta envolve os principais elementos: Flutuadores, braço para acionamento da bomba hidráulica, câmara hiperbárica, turbina e gerador elétrico. Os testes realizados em Laboratório, utilizando diferentes configurações entre dois flutuadores iguais, trabalhando simultaneamente nos mesmos parâmetros de onda, não apresentaram diferenças significativas nos seus desempenhos, para ondas com incidência frontal. Para as ondas com ângulo de incidência de 45°, observou-se uma sensível redução nos desempenhos dos flutuadores, nas três configurações testadas (COSTA, 2004).

Os testes foram realizados utilizando um modelo reduzido do sistema de geração, na escala 1:6,5. Nos ensaios feitos com ondas monocromáticas, o modelo demonstrou capacidade de conversão de 35% do potencial energético da onda, percentual equivalente aos melhores desempenhos alcançados até o momento por tecnologias de aproveitamento da mesma fonte (ASSIS, 2010).

Uma vantagem do sistema é sua característica modular, que possibilita alternativas de formas geométricas para o flutuador. Além do formato retangular, também foi testado um flutuador de desenho circular, que permite igual absorção de energia para diferentes direções de propagação das ondas. Sendo assim mais viável a utilização do flutuador de formato circular.

Os resultados obtidos nos testes indicaram que a concepção proposta é promissora, podendo se constituir um dispositivo eficiente para o aproveitamento da energia das ondas.

Atualmente está em fases de testes na costa do Ceará (Porto de Pecém), onde estão sendo realizados os testes e aprimoramentos da tecnologia, contribuindo para uma possível comercialização da tecnologia para conversão da energia das ondas.

#### **6.3.1 Análise econômica COPPE/UFRJ**

Como este sistema é novo, ainda tem que se realizar alguns testes para obter um melhor desempenho do sistema. Um dos aspectos que se busca com o projeto é a redução dos custos de geração de eletricidade, semelhante ao que aconteceu com a energia eólica. O custo por MW instalado

é de US\$ 2.820.000,00 (ASSIS, 2010). Como a planta testada para este projeto possui 20.000 kW, então o investimento inicial para esta planta é de US\$ 56.400.000,00.

Segundo ESTEFEN, 2004, os custos de implantação são altos, com grande possibilidade de serem reduzidos conforme o desenvolvimento da tecnologia.

Os custos de operação e manutenção estão em torno de 10 US\$/MWh, o que equivale a 9,7% do custo de geração, que de acordo com Assis, 2010, é de 0,103 US\$/kWh. A previsão do fator de capacidade do protótipo é de 55% (ASSIS, 2010). Para este projeto, utilizando a proporção demonstrada de 10 US\$/MWh, é obtido um custo de operação e manutenção de US\$ 1.752.000,00.

O valor residual foi calculado de acordo com os valores obtidos de outros sistemas de conversão de energia ondomotriz devido à falta de dados deste sistema em específico. Os sistemas analisados obtiveram como Valor Residual (R) um resultado aproximado de 10% do valor de investimento do respectivo sistema. Logo, utilizando esta taxa para este sistema obteve-se um Valor Residual de US\$ 5.640.000,00.

A Eletrobrás estabelece como vida útil para projetos de energias renováveis, fotovoltaicas e eólicas, um período de 20 a 30 anos (BESERRA, 2007). Logo, para este projeto foi selecionada uma vida útil de 30 anos.

De acordo com as situações apresentadas e fazendo os cálculos dos custos e da produção anual de energia de acordo com a fórmula Avaliação Econômica de Projetos de Energia demonstrada na metodologia, obteve-se um Custo/Benefício de 0,0668 US\$/kWh.

## **6.4 Sistema PELAMIS**

O sistema Pelamis possui três aparelhos de conversão de energia totalmente independentes (250 kW cada) somando um total de 750 kW de potência para cada módulo. Este dispositivo foi projetado para ser ancorado em águas de 50 a 60 metros de profundidade, o que equivale a uma distância de aproximadamente 100 km da costa de Rio Grande - RS (ASSIS, 2010).

Outra variável importante na concepção do Pelamis foi a tentativa de utilização de componentes já existentes na indústria offshore, no sentido de tornar o dispositivo economicamente viável, com um custo de produção de seus componentes mais reduzido.

O dispositivo apresenta uma limitação hidrodinâmica de potência para um período de onda de 8 s, representativo de um estado de mar típico. Para elevadas alturas de ondas, a potência é limitada, dadas as características do Pelamis, sendo um requisito fundamental para a sobrevivência de qualquer máquina em condições hostis.

### 6.4.1 Análise econômica Pelamis

O custo de investimento de um protótipo de 750 kW é de aproximadamente US\$ 10.466.571,00. Obtendo US\$ 94.199.139,00 para uma planta com 20.250 kW de capacidade instalada. Mas com o desenvolvimento da tecnologia é comum obter-se reduções de custos em torno de 20% com a duplicação da potência, como se verifica atualmente com a energia fotovoltaica (CRUZ e SARMENTO, 2004).

Em 2005, a Ocean Power Delivery (OPD) assinou um acordo para fornecimento de três módulos Pelamis, com capacidade instalada de 2,25 MW a um custo de 8 M€, sendo o normal de 15 M€ (OPD, 2005). Isto indica a real tendência de redução de custos, com o aumento da potência instalada, uma redução em torno de 53% nos custos de investimento, quando comparada com a instalação de um único módulo de conversão Pelamis (ASSIS, 2010).

Desta forma, com o desconto de 20% para os 9 módulos utilizados para a planta deste projeto, o Investimento Inicial reduz para US\$ 75.359.311,20.

O custo de operação e manutenção para este equipamento ainda é alto, devido ser um equipamento offshore. Desta forma tem muitos gastos devido a manutenções em alto mar, manutenção dos cabos subaquáticos, do transporte do módulo para a terra, para efetuar uma manutenção mais específica. Desta forma, este equipamento ainda está em desenvolvimento para a redução deste custo. De acordo com Assis, 2010, o Custo de Operação e Manutenção é 8% do custo de geração, que é 0,18 US\$/kWh. Desta forma o Custo de Manutenção fica em 14,4 US\$/MWh, obtendo, assim, para a planta avaliada neste projeto um Custo de Manutenção de US\$ 2.522.880,00.

Um dos problemas de grande magnitude para os sistemas offshore é o Valor Residual. As leis marítimas internacionais (IMO) determinam a remoção total de estruturas instaladas após o ano de 1999, depois do tempo de vida útil da estrutura. Remoções parciais não são admissíveis. (BESERRA, 2007). Portanto, o Valor Residual para este sistema offshore é de 0 US\$.

A Eletrobrás estabelece como vida útil para projetos de energias renováveis, fotovoltaicas e eólicas, um período de 20 a 30 anos (BESERRA, 2007). Logo, para este projeto foi selecionada uma vida útil de 30 anos.

De acordo com as situações apresentadas e fazendo os cálculos dos custos e da produção anual de energia de acordo com a fórmula Avaliação Econômica de Projetos de Energia demonstrada na metodologia, obteve-se um Custo/Benefício de 0,0901 US\$/kWh.

## 7. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nos estudos preliminares, a comparação das alternativas teve por objetivo a eliminação das que não são competitivas, sob o ponto de vista econômico-energética. A seleção foi feita seguindo-se a Avaliação Econômica de Projetos de Energia, utilizando a equação (19) de Custo/Benefício, presente no capítulo 5, de Metodologia. Com esta análise foi possível concluir qual alternativa, entre as quatro selecionadas, sendo elas a OWC OSPREY, LIMPET, COPPE/UFRJ e PELAMIS, possui o menor custo com relação à produção anual de energia.

Entre as tecnologias em desenvolvimento, o protótipo construído pela COPPE/UFRJ, foi avaliado com vistas a identificar a sua competitividade com as tecnologias que estão num estágio de desenvolvimento mais avançado.

Para todas as alternativas, o Custo/Benefício foi expresso em [US\$/kWh], enquanto que os Custos de Operação e de Manutenção foram expressos em [US\$] e o Custo de Manutenção específico em [US\$/kWh].

Também foi listado o investimento para implantação das usinas. Onde no caso da Pelamis foi efetuado um desconto de 20% devido à compra em lote de vários módulos. Pois, segundo Assis 2010, a empresa Ocean Power Delivery assinou um acordo para o fornecimento de 3 módulos com este desconto.

No caso da tecnologia COPPE, foram agregados 10 módulos para alcançar 0,5 MW de potência (cada módulo possui potência nominal de 50 kW). E para a planta foram utilizados 40 aparelhos totalizando uma Potência Instalada de 20.000 kW.

Estas estimativas foram feitas para uma taxa de juros de 8,2%, de acordo com o BNDES, para Projetos de Energia Renovável.

A vida útil utilizada foi a determinada pela Eletrobrás para sistemas de Energia Renovável, entre 20 e 30 anos (BESERRA, 2007). Com o objetivo de obter o menor custo/benefício, foi selecionada a vida útil de 30 anos.

O Fator de Capacidade para a região do Porto do Rio Grande – RS é de 0,55 (ASSIS, 2010). Desta forma, como todas as alternativas estão sendo testadas para a mesma região, então foi selecionado o Fator de Capacidade de 0,55 para todas elas.

A Tabela 03 seguinte apresenta uma estimativa de custos de investimentos possibilitando uma análise comparativa das alternativas e o resultado da análise financeira de Custo/Benefício para cada alternativa.

Item\Tecnologia	OWC OSPREY	LIMPET	COPPE/UFRJ	PELAMIS
Capacidade Nominal (kW)	2.000 (500 ondas + 1500 eólica)	500	500 (10 módulos)	750
Potência Instalada da Planta (kW)	20.000	20.000	20.000	20.250
CM (US\$)	1.831.011,60	1.514.296,08	1.752.000,00	2.522.880,00
CME (US\$/kWh)	0,0190	0,0157	0,0182	0,0259
Investimento Inicial da Planta (US\$)	60.703.808,00	56.085.040,00	56.400.000,00	75.359.311,20
Taxa de Juros (aa)	0,082	0,082	0,082	0,082
Valor Residual (US\$)	6.070.380,80	5.608.504,00	5.640.000,00	0,00
Vida (anos)	30	30	30	30
Fator de Capacidade	0,55	0,55	0,55	0,55
C/B (US\$/kWh)	0,0713	0,0640	0,0668	0,0901

Tabela 3 – Tabela comparativa entre os dispositivos avaliados (ASSIS, 2010, adaptado)

O sistema OWC OSPREY - foi projetada para aplicações em profundidades de 15 m aproximadamente. Esta tecnologia apresenta uma elevada eficiência de captura para um mar com período de 8 segundos, coincidindo com o clima ondulatório da região que apresenta um período médio anual em torno deste valor. (ASSIS, 2010). E mesmo possuindo a maior parte de sua energia gerada por energia eólica e possuir o maior Valor Residual, esta alternativa não foi bem sucedida na avaliação de Custo/Benefício. Pois, esta alternativa apresenta um elevado Custo/Benefício, comparado com as outras alternativas, sendo ele de 0,0713 US\$/kWh, o que a torna inviável.

O sistema LIMPET foi a alternativa que apresentou os melhores resultados comparado com as outras alternativas. A tecnologia está em uma fase avançada de desenvolvimento, de modo a oferecer algumas vantagens, principalmente no que se refere ao desempenho do protótipo em situações reais de operação. Com a utilização de materiais alternativos para a construção da usina, podem-se conseguir reduções significativas no custo total do investimento. Este sistema, que também utiliza o dispositivo de Coluna de Água Oscilante, obteve o menor valor de Investimento Inicial, menor Custo de Operação e Manutenção e obteve uma pequena desvantagem apenas no Valor Residual, comparado ao sistema OWC OSPREY e COPPE/UFRJ. Desta forma este sistema levou vantagem, de forma geral, comparada às outras alternativas com relação ao Custo/Benefício, sendo ele de 0,0640 US\$/kWh.

O sistema da COPPE/UFRJ pode ser montado nos molhes, que são os quebra mares, existentes no canal de entrada do Porto de Rio Grande, para gerar eletricidade. Testes de modelo revelaram que o protótipo converte o recurso energético com eficiência em torno de 35%, o que é muito bom, equiparando-se aos equipamentos mais eficientes. (ASSIS, 2010). Este sistema, apesar de ser novo e ainda ter muitos testes a serem realizados para seu aperfeiçoamento, obteve o segundo melhor resultado comparado com as outras três alternativas avaliadas. Ele obteve resultados muito próximos ao sistema LIMPET, que obteve os melhores resultados. Tendo um valor do Investimento Inicial da Planta e do Valor Residual bem próximo ao do LIMPET e um Custo de Operação e Manutenção um pouco mais elevado, também comparado ao LIMPET. Desta forma, o sistema da COPPE/UFRJ obteve

um Custo/Benefício de 0,0668 US\$/kWh. O que não é ruim, devido a utilizar um dispositivo novo que é o da Câmara Hiperbárica e podendo assim, com testes, efetuar uma melhora do sistema.

Entre as alternativas, o sistema PELAMIS apresenta o maior Custo de Operação e Manutenção, sendo mais de US\$ 1.000.000,00 mais caro que o sistema LIMPET, que obteve o melhor resultado neste quesito.

Esta tecnologia foi projetada para aplicações offshore, onde a sua instalação deve ser feita a uma distância de aproximadamente 100 km da costa (que equivale a 50 metros de profundidade na região). Neste caso, o custo para transmissão (por cabos submarinos) da eletricidade gerada é bastante elevado. Esta alternativa pode tornar-se inviável devido ao sistema de transmissão que estaria sujeito a danos, causados pelo fluxo de navios que se dirigem para o Porto de Rio Grande – RS.

Este sistema também leva desvantagem com relação ao Valor Residual, pois sendo um sistema offshore as leis marítimas internacionais (IMO) determinam a remoção total de estruturas instaladas após o ano de 1999, depois do tempo de vida útil da estrutura. Remoções parciais não são admissíveis. (BESERRA, 2007).

O que poderia melhorar seu resultado seria a compra em larga escala dos módulos deste sistema, pois segundo ASSIS, 2010, com o aumento da potência instalada, uma redução em torno de 53% nos custos de investimento pode ser obtido, quando comparada com a instalação de um único módulo de conversão Pelamis.

No caso deste projeto foi utilizado um desconto de 20% sobre o Valor de Investimento Inicial e mesmo o mar sendo muito propício para este sistema, devido a Altura Significativa da Onda e o Período da Onda, o PELAMIS obteve o menor Custo/Benefício, sendo ele de 0,0901 US\$/kWh. Mas, caso realmente seja possível reduzir o valor de Investimento Inicial de acordo com o aumento da Potência Instalada da Planta em até 53%, como afirma Assis, 2010, este sistema irá apresentar um Custo/Benefício de 0,0636. Tornando-se um sistema com melhor custo/benefício.

Como foi abordado anteriormente, o sistema LIMPET apresenta o menor Custo/Benefício, sendo o seu resultado bem próximo ao da COPPE/UFRJ. Desta forma, esta é a alternativa mais competitiva nos aspectos avaliados.

Nesta perspectiva, as análises fundamentam a pré-seleção da tecnologia da LIMPET para o aproveitamento do recurso energético da região do Porto de Rio Grande - RS. Do ponto de vista econômico, este protótipo atende as expectativas, contudo como o sistema COPPE/UFRJ obteve resultado bem próximo, com sua evolução em testes que podem ser executados, esta tecnologia pode se tornar mais viável que o LIMPET.

## 8. CONCLUSÃO

As pesquisas sobre energias renováveis estão se desenvolvendo rapidamente e os países que obtiverem estas tecnologias desenvolvidas a seu favor, terão grandes benefícios no futuro. Este desenvolvimento tecnológico pôde ser observado neste trabalho devido à diversidade de dispositivos de geradores ondomotriz e a quantidade de países que estão investindo neste sistema. Inicialmente os custos, não só dos geradores ondomotriz, mas de todos os dispositivos de energias renováveis, ainda estão com custos muito elevados. Mas ao longo dos anos, com o avanço tecnológico, estes dispositivos se tornarão mais viáveis financeiramente. Então os países não podem deixar de investir em uma tecnologia apenas por conta de seu custo em curto prazo. Desta forma, ficou cada vez mais necessária a realização de um estudo dos conversores de energia ondomotriz em energia elétrica.

Este projeto tem como objetivo o estudo técnico e financeiro dos sistemas de conversão de energia ondomotriz e a realização de uma análise do litoral brasileiro para verificar a viabilidade de instalação de uma usina ondomotriz no Brasil.

Desta forma, com o estudo de vários projetos e trabalhos, entre eles o projeto de mestrado de Paulo Roberto da Costa, realizado em 2004, o projeto de doutorado de Eliab Ricarte Beserra, realizado em 2007, o projeto de Leandro Eduardo de Assis, realizado em 2010, o documento Energia Oceânica do INPI, documento Direção-Geral de Energia e Geologia, realizado em 2013 e entre outros documentos, foi possível ver vários estudos do Potencial Energético das ondas do mar e do Fator de Capacidade de Energia no litoral brasileiro, determinando que os locais mais propícios para a instalação de uma usina de energia ondomotriz é na região nordeste do país, seguido da região sul/sudeste.

De acordo com estes estudos também foi feita uma estimativa do Fator de Capacidade de Energia, que de acordo com MARTÍN, 2012, é a relação entre a energia firme e a capacidade de geração de energia efetiva em uma usina. Este Fator de Capacidade no litoral brasileiro foi de 55%, o que é um bom resultado comparado a outros valores do planeta, já que a média mundial é de 58%. E no nordeste este fator foi avaliado em 70%, que é na região onde o sistema COPPE/UFRJ está sendo testado.

Com estas avaliações e devido à disponibilidade de dados coletados em diversos testes já realizados na região sul do país, o local selecionado para realizar o estudo financeiro dos sistemas selecionados neste projeto foi o Porto de Rio Grande no Rio Grande do Sul.

Assim, o segundo item que foi avaliado de acordo com o objetivo deste projeto, foi a seleção dos sistemas conversores de energia ondomotriz em energia elétrica para, posteriormente, fazer a análise financeira de Custo/Benefício para então concluir qual sistema melhor se adapta a todos os itens avaliados.

Logo, de acordo com a análise técnica que tem como quesitos: a maior facilidade para construção



das estruturas, o tipo de dispositivo que o sistema usa para realizar a conversão de energia ondomotriz em energia elétrica, o sistema ser onshore, nearshore ou offshore, o avanço tecnológico em pesquisas já realizadas com cada sistema, a eficiência de conversão de energia ondomotriz em energia elétrica de cada equipamento, facilidade de manutenção do sistema e dentre outros, os sistemas selecionados foram o OWC OSPREY, que utiliza o dispositivo de Coluna de Água Oscilante para efetuar a conversão de energia do mar em energia elétrica, o sistema LIMPET, que também utiliza o dispositivo de Coluna de Água Oscilante, o sistema da COPPE/UFRJ, que utiliza o dispositivo de Câmara Hiperbárica, projetada por eles mesmos e o sistema PELAMIS, que utiliza o dispositivo Atenuador como conversor de energia.

O sistema OWC OSPREY foi selecionado por ter a vantagem de utilizar tanto o potencial energético das ondas do mar quanto o potencial energético dos ventos, pois além de possuir o dispositivo de Coluna de Água Oscilante para a conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica, neste sistema ainda pode ser instalada uma torre eólica para a conversão da energia dos ventos para energia elétrica, onde 500 kW são produzidos pelo dispositivo de ondas e 1500 kW são produzidos pela torre eólica.

A empresa Wavegen é a fabricante desta tecnologia e tem utilizado sua experiência adquirida no primeiro protótipo OSPREY (Ocean Swell Powered Renewable energy), para melhorar muitos aspectos funcionais deste protótipo. Contudo, existem diversos aspectos do esquema que originam algumas incertezas sobre o desempenho técnico do aparelho. E ainda como inconveniente, este sistema possui altos custos estruturais e eficiência moderada, comparada com as outras tecnologias selecionadas. Mas a empresa também está realizando estudos para a solução destes problemas.

Um das vantagens deste sistema é a possibilidade de instalar mais que 10 aparelhos geradores de energia em um único local, desta forma os custos poderão ser reduzidos devido à queda nos custos de transmissão elétrica e conexão que podem ser custeados a partir de uma grande saída de energia.

O sistema LIMPET foi selecionado por ter uma boa eficiência e possuir uma tecnologia de construção de sua estrutura fora do mar, sendo construída na terra, fazendo uma escavação e, após a conclusão da construção, a terra é removida para a entrada da água do mar. Isto diminui os custos para construção deste sistema. Mas algumas dúvidas ainda precisam ser sanadas, como a quantidade de rochas que deve ser removida da câmara de ar do sistema para não prejudicar a eficiência, pois algumas rochas vão se soltando com o tempo na câmara de ar.

O sistema COPPE/UFRJ ainda é um sistema novo, que utiliza a Câmara Hiperbárica para a conversão de energia. Mas de acordo com os estudos teóricos realizados pela Coppe o sistema possui uma eficiência de 35% o que é muito bom comparado com outros sistemas de conversão de energia ondomotriz. Outra vantagem que também determinou sua seleção para o estudo foi a possibilidade da instalação deste sistema nos quebra mares dos portos, se tornando assim um sistema nearshore, que possui um potencial energético superior ao sistema onshore. Mas estudos estão sendo realizados com a

usina teste no porto de Pecém no Ceará para a confirmação dos dados estimados.

O quarto e último sistema selecionado foi o PELAMIS fabricado em Portugal. Este sistema foi selecionado por ser um sistema offshore, que possui um potencial energético superior aos sistemas onshore e nearshore e por possuir um estudo mais avançado desta tecnologia de conversão de energia das ondas do mar. Pois Portugal foi o pioneiro nesta tecnologia, de acordo com o documento de patente apresentado pelo INPI. Suas desvantagens são o de ser prejudicado devido às rotas de navio, se este sistema for instalado perto de portos, e de ter um alto custo de manutenção, devido à dificuldade de manutenção em alto mar e das estruturas de transmissão de energia submersas para a condução da eletricidade até o litoral.

Desta forma, pôde-se fazer o próximo passo determinado pelo objetivo deste projeto, que é a análise de Custo/Benefício destas quatro tecnologias e determinar qual sistema possui a melhor avaliação financeira.

O sistema OWC OSPREY apresentou um Custo/Benefício de 0,0713 US\$/kWh, o LIMPET 0,0640 US\$/kWh, o COPPE/UFRJ 0,0668 US\$/kWh e o PELAMIS 0,0901 US\$/kWh.

Desta forma, pode-se concluir que o sistema com melhor aspecto financeiro é o LIMPET seguido de perto pelo COPPE/UFRJ.

Portanto, o sistema que apresenta a melhor solução para realizar a conversão de energia ondomotriz em energia elétrica é o LIMPET.

Este sistema pode ser instalado para abastecer regiões mais afastadas dos grandes centros urbanos e que possuem dificuldades de obter energia através de transmissão por postes de energia. Um exemplo disto é o projeto apresentado pela COPPE para a utilização da energia do mar para suprir a demanda energética do Farol da Ilha Rasa.

Estes dispositivos ainda possuem um elevado valor para sua instalação, mas não devem ser abandonados, pois com o desenvolvimento da tecnologia e com a produção em larga escala, os custos podem ser reduzidos, como o exemplo demonstrado neste projeto, onde o sistema Pelamis pode ter seus custos reduzidos em até 53%, segundo Assis, 2010.

E pelos estudos realizados neste projeto, o sistema LIMPET é o que melhor atende os itens técnicos e financeiros para suprir parte da demanda energética que será necessária ser atendida de acordo com o estudo Matrizes Energéticas no Brasil: Cenário 2010-2030, apresentado no XVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEEOLICA. Associação Brasileira de Energia Eólica, 2010, Disponível em: <<http://www.abeeolica.org.br>>. Acesso: 23/10/2014.

AGÊNCIA GESTÃO CT&I. FURNAS QUER GERAR ENERGIA A PARTIR DO APROVEITAMENTO DE ONDAS EM ALTO-MAR, 2013.

AQUARET. TECNOLOGIA DE ENERGIA DAS ONDAS, Disponível em: <[http://www.aquaret.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=131&Itemid=274&lang=pt](http://www.aquaret.com/index.php?option=com_content&view=article&id=131&Itemid=274&lang=pt)>. Acesso: 20/11/2013.

Assis, L.E., AVALIAÇÃO E APROVEITAMENTO DA ENERGIA DE ONDAS OCEÂNICAS NO LITORAL DO RIO GRANDE DO SUL, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil, 2010.

Beserra, E.R., AVALIAÇÃO DE SÍTIOS PARA O APROVEITAMENTO DOS RECURSOS ENERGÉTICOS DAS ONDAS DO MAR, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.

BNDES. ENERGIA – GERAÇÃO DE VAPOR E ENERGIA RENOVÁVEL, Disponível em: <[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes\\_pt/Institucional/Apoio\\_Financeiro/Produtos/FINE M/energia\\_geracao\\_vapor\\_renovavel.html](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Institucional/Apoio_Financeiro/Produtos/FINE M/energia_geracao_vapor_renovavel.html)>. Acesso em: 18/05/2015.

BNDES. ENERGIA ELÉTRICA – ENERGIA RENOVÁVEL – BNDES, Disponível em: <[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes\\_pt/Institucional/Apoio\\_Financeiro/Produtos/FINE M/energia\\_geracao\\_renovavel.html](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Institucional/Apoio_Financeiro/Produtos/FINE M/energia_geracao_renovavel.html)>. Acesso em: 18/10/2014.

BNDES. TAXA DE JUROS DE LONGO PRAZO - TJLP, Disponível em: <[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes\\_pt/Institucional/Apoio\\_Financeiro/Custos\\_Financieiros/Taxa\\_de\\_Juros\\_de\\_Longo\\_Prazo\\_TJLP/index.html](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Institucional/Apoio_Financeiro/Custos_Financieiros/Taxa_de_Juros_de_Longo_Prazo_TJLP/index.html)>. Acesso em: 18/05/2015.

Carvalho, M.O.M., AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE PROJETOS DE ENERGIA – ANÁLISE CUSTO-BENEFÍCIO, X CBE – Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.

CENTRO DE ESTUDOS DO MAR. ONDAS, Disponível em: <[http://www.cem.ufpr.br/praiapagina/pagina.php?menu=ondas\\_formacao](http://www.cem.ufpr.br/praiapagina/pagina.php?menu=ondas_formacao)>. Acesso: 24/10/2013.

COPPE. COPPE: PROJETO UTILIZA ONDAS DO MAR COMO FONTE DE ENERGIA, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.

COPPE/UFRJ. O FUTURO SUSTENTÁVEL, Rio de Janeiro, Brasil, 2012.

COPPE/UFRJ. USINA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PELAS ONDAS DO MAR, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

Costa, P.R., ENERGIA DAS ONDAS DO MAR PARA GERAÇÃO DE ENERGIA, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.

Cunha, J.F., Onofrei, R. ENERGIA OCEÂNICA, Instituto Nacional da Propriedade Industrial, Rio de Janeiro, Brasil.

Dias, H.R.F., UMA CONTRIBUIÇÃO PARA CONHECIMENTO DO COMPORTAMENTO DE ÂNCORAS EM LEITOS MARINHOS ARENOSOS PARA ESTRUTURAS FLUTUANTES, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.

DIRECÇÃO-GERAL DE ENERGIA E GEOLOGIA. ENERGIA DAS ONDAS, Disponível em: <<http://www.dgeg.pt/aaaDefault.aspx?f=1&back=1&codigono=636364426443AAAAAAAAAAAA>>. Acesso: 20/11/2013.

ENERGIAS RENOVÁVEIS. ENERGIA DAS ONDAS, Disponível em: <[http://www.energiasrenovaveis.com/images/upload/flash/anima\\_como\\_funciona/ondas13.swf](http://www.energiasrenovaveis.com/images/upload/flash/anima_como_funciona/ondas13.swf)>. Acesso: 22/10/2013.

FACULDADE DE OCEANOGRAFIA UFBA. ONDAS, Universidade Federal da Bahia, Bahia, 2014.

Fleming, F. P., AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE ENERGIAS OCEÂNICAS NO BRASIL, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2012.

LABORATÓRIO DE TECNOLOGIA SUBMARINA. ENERIGA DAS ONDAS, Disponível em: <[http://www.lts.coppe.ufrj.br/index\\_br/index.php](http://www.lts.coppe.ufrj.br/index_br/index.php)>. Acesso: 10/11/2013.

MANUAL DE INVENTÁRIO DA ELETROBRÁS, Disponível em: <<http://www.eletronbras.com/elb/data/Pages/LUMISF99678B3PTBRIE.htm>>. Acesso: 02/09/2014.

Martín, J. J. N., AVALIAÇÃO ECONÔMICA DOS RECURSOS ENERGÉTICOS DAS ONDAS DO MAR, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2012.

PELAMIS WAVE POWER. DEVELOPMENT HISTORY, Disponível em: <<http://www.pelamiswave.com/development-history/>>. Acesso: 25/11/2013.

PROJETO LITORAL NOTA CEM. AMBIENTE DO LITORAL PARANAENSE, 2013, Disponível em: < <http://www.cem.ufpr.br/litoralnotacem/textos.htm>>. Acesso em: 19/11/2013.

SEAHORSE WAVE ENERGY, 2015, Disponível em: <[http://www.seahorseenergy.com.br/sistemas\\_conversao/](http://www.seahorseenergy.com.br/sistemas_conversao/)>. Acesso em: 10/05/2015.

WAVEC OFFSHORE RENEWABLE. ENERGIAS MARINHAS, Disponível em: <[http://www.wavec.org/energias\\_marinhas#.Up2pARVTtMs](http://www.wavec.org/energias_marinhas#.Up2pARVTtMs)>. Acesso: 10/11/2013.