

## ESTUDO DE VIABILIDADE PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ONDOMOTRIZ EM DETERMINADAS REGIÕES DO BRASIL

### FEASIBILITY STUDY FOR GENERATION OF WAVING ENERGY IN CERTAIN REGIONS OF BRAZIL

Antonionne Silva de Oliveira\*  
Hugo Madeira Dias\*\*  
Geraldo Furtado Neto\*\*\*

#### RESUMO

Com a crescente demanda por fontes de energias alternativas e aumento do consumo de energia elétrica no mundo, cada vez mais se faz necessário os estudos para obtenção de fontes de geração de energia sustentáveis, com potencial de suprir ou até mesmo substituir demais fontes que causam impactos ambientais ou são condicionadas. Este trabalho tem por objetivo analisar as diferentes formas e tipos de sistemas de geração de energia através das ondas do mar, com base nas características das tecnologias, e a verificação de onde melhor se aplicam no litoral e qual melhor se encaixa para a geração na costa brasileira. Este estudo foi realizado através de um levantamento bibliográfico sobre o tema. Como resultado para este, espera-se contribuir com informações que possam incentivar o investimento em geração de energia ondomotriz no país.

**Palavras-chave:** Geração de energia; Sustentáveis; Viabilidade.

#### ABSTRACT

With the growing demand for alternative energy sources and increased consumption of electricity in the world, studies are increasingly needed to obtain sustainable sources of energy generation, with the potential to supply or even replace other sources that cause impacts environmental or are conditioned. This work aims to analyze the different forms and types of energy generation systems through sea waves, based on the characteristics of the technologies, and the verification of where they best apply on the coast and which best fits for the generation on the coast Brazilian. This study was carried out through a bibliographic survey on the topic. As a result, it is expected to contribute with information that can encourage investment in the generation of ondomotriz energy in the country.

**Keywords:** Power generation; Sustainable; Viability.

\*Rede de Ensino Doctum Cataguases - exemplo574@gmail.com - graduando em Engenharia Civil

\*\*Rede de Ensino Doctum Cataguases - hugo.madeirad@gmail.com - graduando em Engenharia Civil

\*\*\*Rede de Ensino Doctum Cataguases - geraldo.neto@doctum.edu.br - Professor Orientador

## 1. Introdução

A utilização de energia elétrica se tornou essencial para o desenvolvimento do mundo, sendo esta responsável por gerar luz, movimentar motores e pelo funcionamento de inúmeros equipamentos elétricos e/ou eletrônicos. Porém, para se utilizar deste recurso, é importante entender quais são as fontes e como é gerado.

Durante a Revolução Industrial, os geradores transformavam a energia mecânica das máquinas a vapor em energia elétrica. Depois, ainda no séc. XIX, o uso da energia hidráulica foi popularizado com a instalação da hidrelétrica nas Cataratas do Niágara, na América do Norte. A partir do séc. XX, outras fontes de energia elétrica começaram a ser exploradas, como a nuclear e a eólica, e a preocupação do esgotamento energético começou a surgir no mundo.

Os tipos de fontes de geração de energia podem ser subdivididos em dois grupos, renováveis e não renováveis. São considerados exemplos de fontes de energia renováveis: energia hidráulica, energia solar, energia eólica, biomassa e ondomotriz. Exemplos de energia não-renováveis: energia nuclear e energia termoelétrica (fontes fósseis).

Atualmente, a matriz energética nacional está representada por: 64% hidroelétricas, 27% termoelétricas, 7% eólica, 1% nuclear, 0,1% solar, ou seja, aproximadamente 28% da energia elétrica gerada no país procede de fontes não-renováveis (KIELING 2018).

O Brasil possui cerca de 8 mil quilômetros de extensão de litoral, o que proporcionaria uma geração de energia elétrica total de 87 gigawatts (GW), ou seja 17% da capacidade de geração total hoje instalada (BAILTZ, 2018).

Cada vez mais se torna importante a exploração de fontes renováveis, uma vez que estas utilizam recursos da natureza que não se esgotam ou regeneram, não agredindo assim ao meio ambiente.

O objetivo geral deste estudo é analisar os tipos de conversores de energia ondomotriz e verificar as regiões do Brasil onde melhor se aplicaria cada um, de acordo com as características técnicas de cada dispositivo e características geográficas e sazonais de cada região.

Os objetivos específicos são: Detalhar as características e funcionamento dos tipos de conversores de energia ondomotriz, *onshore*, *nearshore* e *offshore*; Evidenciar dados de período, energia e amplitude das ondas em locais litorâneos do

Brasil; Analisar quais os tipos sistemas de conversão seriam melhores aplicados em quais regiões, através dos dados obtidos.

Além dos benefícios ambientais por se tratar de uma fonte de energia renovável, o investimento em geração de energia ondomotriz gera empregos na região, trazendo assim maior benefício social, além de chamar a atenção a mais pesquisadores, por se tratar de um tipo de geração não tão comum no país.

## **2. Energia ondomotriz**

Gerada através da conversão de energia cinética do movimento das ondas em energia elétrica, a energia ondomotriz é uma fonte de energia limpa, renovável e alternativa, porém ainda pouco explorada no mundo conforme Borges (2020).

### **2.1. Tipos de construções para geração de energia ondomotriz**

Os tipos de construção para geração de energia marítima são classificados em construção *onshore*, *nearshore* e *offshore*.

#### **2.1.1. Onshore**

Segundo Barreto (2015) o sistema *onshore* é o tipo de construção onde seus dispositivos são instalados fixos ou incorporados à costa, situados em áreas sujeitas à rebentação das ondas, local de menor potencial energético. O dispositivo *onshore* mais utilizado é o tipo Coluna de Água Oscilante.

#### **2.1.2. Nearshore**

Tipo de construção onde os conversores de energia são instalados em distâncias de até 500m próximos a costa e profundidades entre 20 e 25m (BARBOSA E ANDRADE, 2015), próximos à zona de rebentação das ondas, região considerada de médio potencial energético. Exemplos de dispositivos *nearshore* são de coluna oscilante e o Waveroller.

#### **2.1.3. Offshore**

Tipo de construção *offshore*, onde os conversores de energia são localizados afastados da costa, a profundidades acima de 25m, em localização de maior potencial energético (BARRETO, 2015). Exemplo de dispositivo *offshore* é o Pelamis.

## 2.2. Ondas

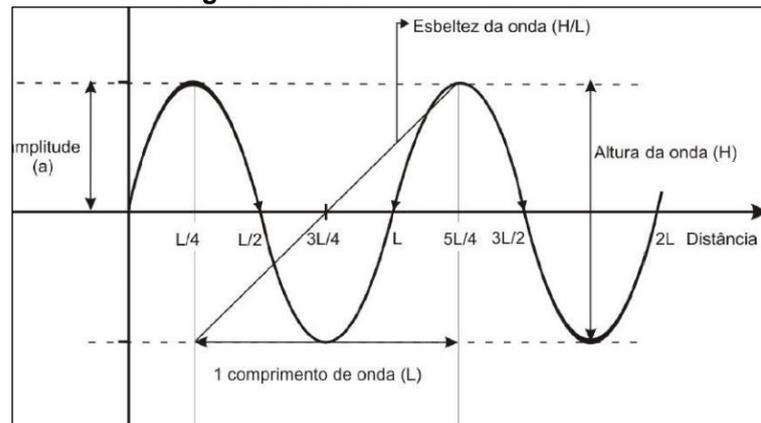
As ondas oceânicas necessitam de um meio físico para se propagar, são ondas mecânicas, regidas pelas leis de Newton. Estas resultam da ação de forças sobre o fluido, que perturbam o seu estado inicial, provocadas por agentes físicos como a ação dos ventos, perturbação de objetos, entre outros. Uma vez perturbado o meio, a propagação das ondas dá-se sob a ação de forças gravíticas e da tensão superficial (Halliday, D.; Resnick, R.; Walker, J. 2006).

Entre todas as ondas oceânicas, as geradas pelos ventos são as que possuem maior concentração de energia. As ondas que possuem maior amplitude vêm de enormes distâncias, da ordem de milhares de quilômetros desde sua região de formação, possuindo uma forma mais regular (GEOFISICA, 2006).

Segundo Dantas (2015), o vento precisa de uma força atuando sobre a massa de ar para entrar em movimento. Esse movimento é devido a diferença de pressão entre duas áreas, na qual, a com maior pressão, desloca a massa de ar para a de menor pressão.

Nos oceanos as ondas superficiais são geradas pela interação dos ventos com a superfície. Ao soprarem paralelos à superfície, os ventos transferem energia cinética para o mar e uma parte desta energia acaba por gerar as ondas. A quantidade de energia transferida do vento vai depender de três valores principais que contribuem para o tamanho e força das ondas, que são: a intensidade do vento, o tempo de atuação deste vento e a área sobre a qual está atuando. Sendo assim, quanto maior for o período durante o qual soprar o vento e quanto mais intenso este for, maior será a altura das ondas que se formam (FLEMING, 2012).

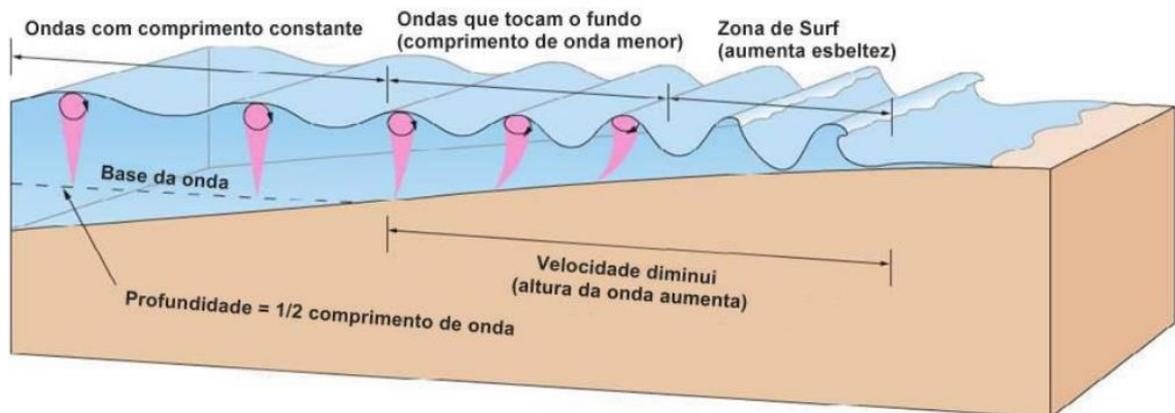
As principais características de uma onda estão na figura 1, sendo o comprimento de onda ( $L$ ), que é a distância horizontal entre duas cristas, a altura ( $H$ ), que é a distância vertical entre a crista e o cavado, e o período, que é o tempo de passagem de duas cristas. Outra característica importante é a esbelteza, que é a altura sobre o comprimento de onda ( $H/L$ ) (VIOLANTE, 2007).

**Figura 1:** Características das ondas

Fonte: VIOLANT, 2007

Segundo Trujillo e Thurman (2011), onda é o transporte de energia sem que ocorra transporte significativo de matéria. As partículas sofrem uma força de deslocamento e uma de restauração ao passar das ondas no mar, contendo energia cinética e energia potencial, dependendo do estágio do movimento.

Ainda de acordo com Trujillo e Thurman (2011), as ondas podem percorrer grandes distâncias sem perdas significativas de energia, pois as perdas começam quando há interação da onda com o fundo. No trajeto de diminuição da profundidade do mar, as ondas começam a perder velocidade e comprimento, aumentando sua altura até o momento de quebra das ondas, conforme figura 2:

**Figura 2:** Deslocamento das ondas

Fonte: FLEMING, 2012

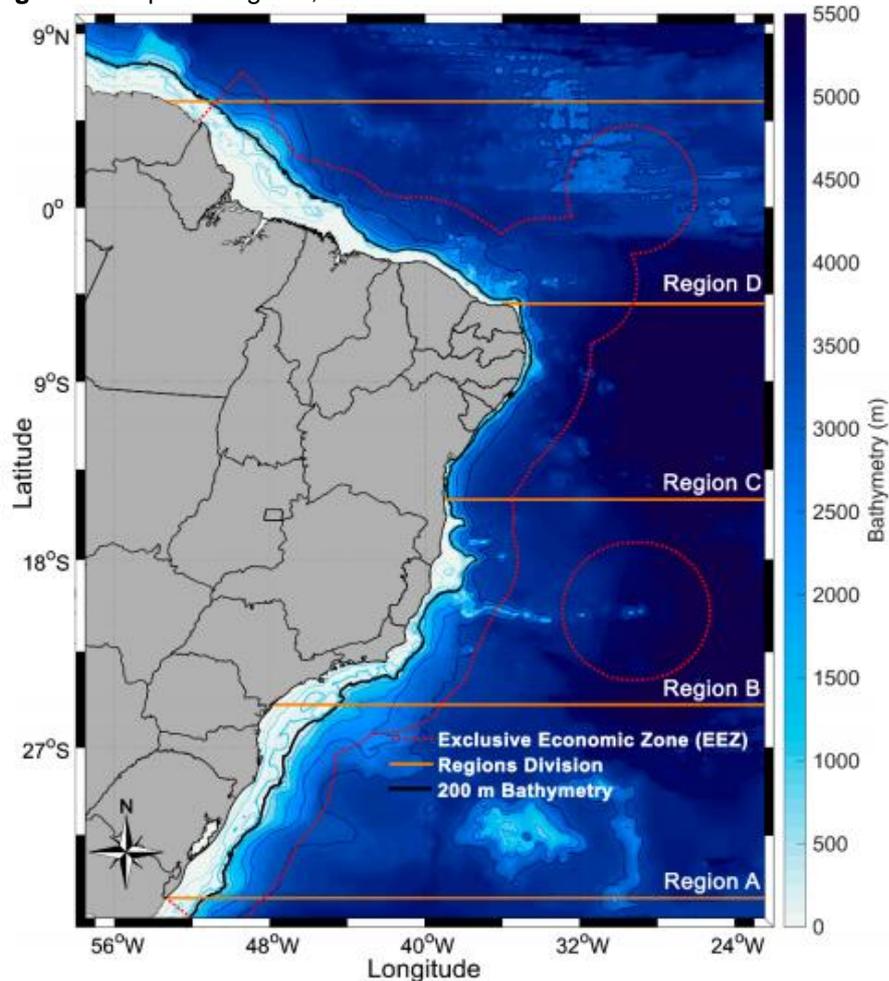
### 2.3. Área de Estudo

Com mais de 7400 km de extensão litorânea, o Brasil tem sob jurisdição áreas marinhas com 12 milhas náuticas, sendo esse o mar territorial, a Zona Econômica Exclusiva com 12 a 200 milhas náuticas, e a plataforma continental a qual compreende

o fundo do mar. De acordo com Shadman *et al.* (2019), a extensão da plataforma continental brasileira varia ao longo da costa, chegando até 300 km no litoral do Estado do Pará, com amplitudes entre 60 e 180 m.

O mapa da figura 3, separa o litoral brasileiro em quatro regiões A (Sul), B (Sudeste), C (Nordeste) e D (Norte), evidencia a Zona Econômica Exclusiva e a batimetria (medição da profundidade) a 200m.

**Figura 3:** Mapa de regiões, zona econômica e batimetria da costa brasileira



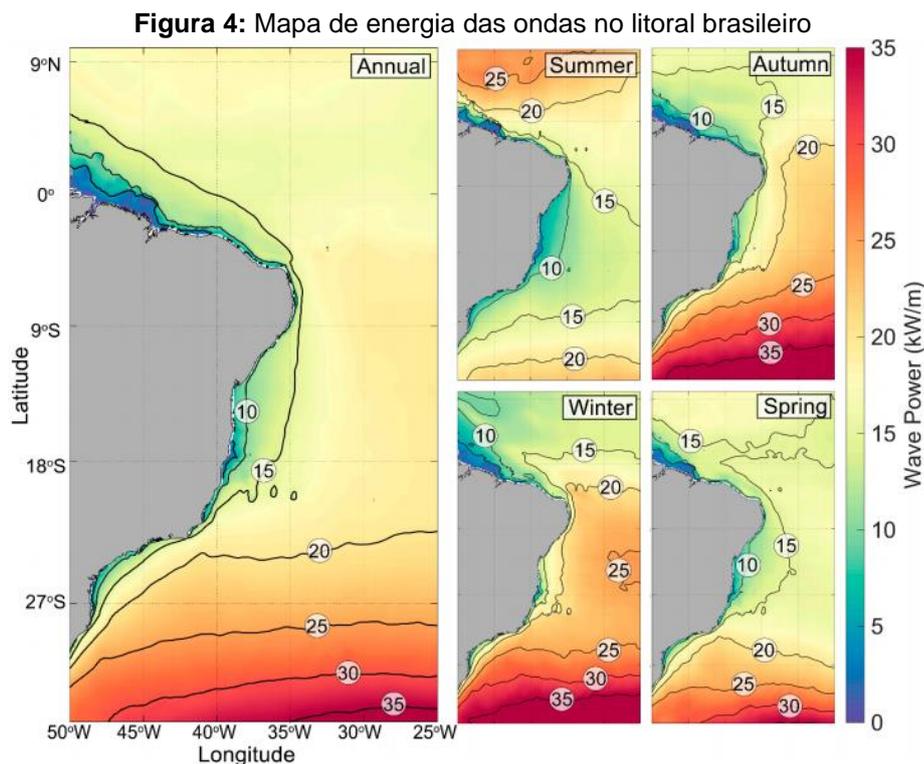
Fonte: SHADMAN, et al., 2019

#### 2.4. Energia das ondas

Ao longo da costa brasileira, Shadman *et al.* (2019) mostra que as ondas mais energéticas estão localizadas próximas às regiões A e B como mostradas no mapa da figura 3, com valor de potência entre 20 e 25kw/m conforme figura 4. Esses valores de potência se intensificam durante o outono e inverno por conta de ocorrências de ciclones extratropicais, gerando assim, ondas maiores que se propagam em direção

a essas regiões. Na região A, valores de potência próximos a 20Kw/m, são observados para quase todo ano.

A região C tem a menor variabilidade da potência das ondas durante o ano, o que pode levar a um fator de capacidade maior, enquanto as regiões A e B são as áreas com as ondas mais energéticas, permitindo a implantação dos dispositivos com maior capacidade instalada (SHADMAN, *et al.*, 2019).



**Fonte:** SHADMAN, *et al.*, 2019

A potência das ondas disponível para o litoral brasileiro foi calculada a uma distância média de 128 km da costa, conseqüentemente, uma potência de onda total disponível de aproximadamente 91,8 GW foi estimado considerando um comprimento total da linha costeira de cerca de 7.491 km (um valor aproximado sem detalhes do litoral). Deve-se notar que este valor é uma estimativa do potencial teórico da energia das ondas brasileiras. Na prática, apenas uma fração da energia das ondas pode ser convertido em energia elétrica, pois dependem de fatores como desafios técnicos, impactos ambientais, economia, uso diferido da área marítima e impactos sociais. No entanto, segundo Shadman *et al.* (2019), se apenas um quinto da energia total na costa brasileira for convertida em energia elétrica, isto já representaria

aproximadamente 35% da demanda brasileira de eletricidade no de 2017. Na tabela 1 podemos observar os dados de energia por região na costa brasileira:

**Tabela 1:** Média de energia por região na costa brasileira

Parâmetros	Região A (Sul)	Região B (Sudeste)	Região C (Nordeste)	Região D (Norte)
Extensão (km)	~1250	~1952	~1452	~2837
Potência média (kW/m)	21,1	12,4	13,8	7,4
Potência Total (GW)	26,4	24,2	20,1	21,0

**Fonte:** Adaptado Shadman *et al.*, 2019

## 2.5. Dispositivo *onshore* com câmara hiperbárica

Trata-se de uma tecnologia brasileira, desenvolvida pela COPEE, e aplicada na construção da Usina de Porto de Pécém – CE instalada em 2012, onde seus dispositivos são instalados fixos ou incorporados à costa. Estes dispositivos flutuam nas águas, e utilizam o movimento das ondas, podem ser através de cilindros internos ou flutuadores.

Consiste em uma combinação de módulos de pressurização de água. Cada módulo é composto de um flutuador circular, que permite igual absorção de energia para diferentes direções de propagação das ondas, ligado a uma estrutura metálica em forma de viga, essa com 22 m de comprimento, preso a uma estrutura principal (RICARTE *et al.*, 2005).

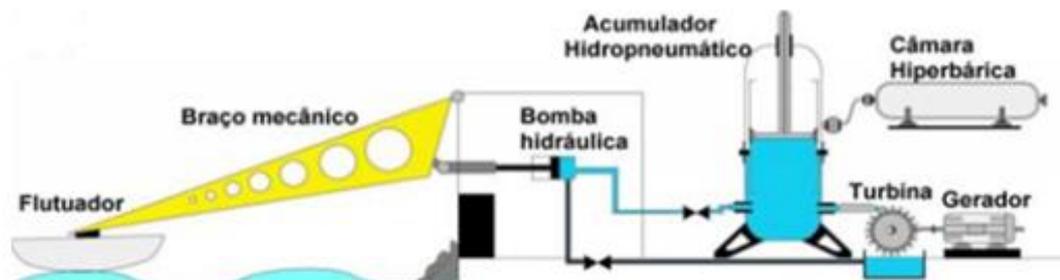
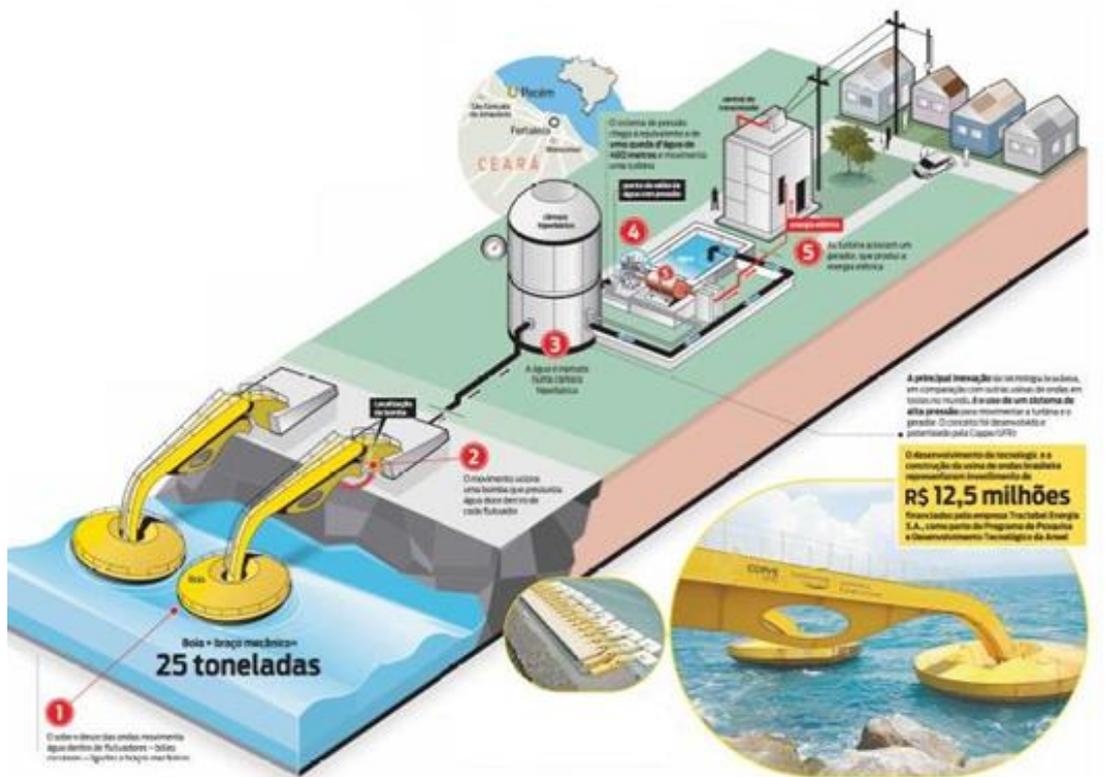
O movimento vertical do flutuador, devido às interações do corpo da onda, aciona o atuador da bomba que desloca a água dentro do circuito fechado para um acumulador hidropneumático (SHADMAN, *et al.*, 2019).

De acordo com Garcia-Rosa *et al.*, (2009), a parte interna do acumulador hidropneumático é composta por ar e água, separados por um pistão. Assim, quando a vazão de entrada de água é maior que a vazão de saída (água liberada para a turbina hidráulica), o pistão sobe, armazenando a energia capturada em forma de compressão de ar. De forma dual, quando a vazão de saída é maior que a vazão de entrada, o pistão desce, liberando a energia que estava armazenada.

O acumulador é conectado a uma câmara hiperbárica, que foi previamente pressurizada. A câmara hiperbárica funciona como um sistema de armazenamento de energia, que suaviza as flutuações de energia devido à natureza oscilatória do mar ondas. A pressão aplicada está na faixa de 250 a 400 m de coluna de água (mca) (SHADMAN *et al.*, 2019).

A vazão de água, que abastece a câmara hiperbárica, é então liberada na forma de jato, para acionar uma turbina tipo Pelton numa vazão igual ou menor àquela enviada pelas bombas, através de uma válvula controladora de vazão. A rotação obtida no eixo da turbina é transmitida a um gerador elétrico para conversão de energia mecânica em eletricidade (STEFEN, 2005). A figura 5 mostra o esquema de funcionamento da usina de Porto de Pecém, e a figura 6 mostra uma imagem real de sua estrutura:

**Figura 5:** Esquema de funcionamento da Usina de Pecém- CE



Fonte: <http://andrecafe.blogspot.com.br/2012/06/tecnologia-genuinamente-brasileira.html>

**Figura 6:** Instalações no porto de Pecém



Fonte: PLANETA COPPE NOTÍCIAS, 2006

## 2.6. Dispositivo *onshore* Coluna de Água Oscilante (*Oscillating Water Column*)

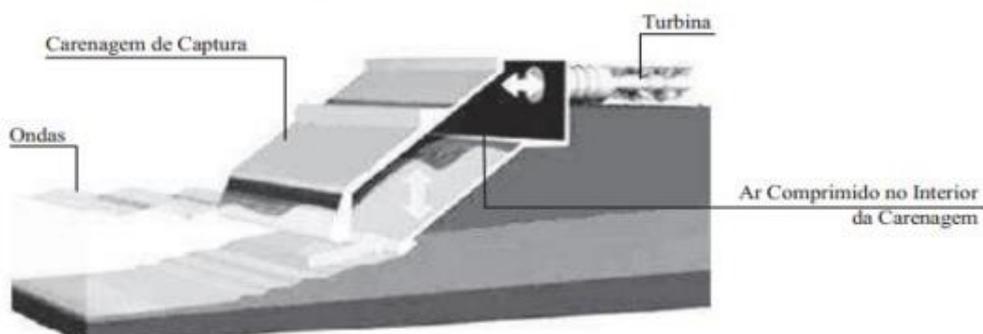
Originalmente desenvolvido pelo japonês Yoshio Masuda entre 1960 e 1970, com potência de 75KW, foi construído pela primeira vez em 1988 na Ilha de Islay. Este conceito, instalado na costa (*onshore*), utiliza o princípio de oscilação das ondas, no qual é responsável pelo o aumento e diminuição de pressão dentro da câmara.

Segundo Mustapa et. al (2017), a câmara com parede frontal inclinada a 30°, possui duas aberturas. Uma abertura disposta 1 metro abaixo do nível do mar, projetada quando a maré se encontra no seu nível mais baixo, permitindo que a água circule na direção de elevação, e outra por onde o ar gira uma turbina Wells com a expansão e retração do mesmo.

Essa turbina Wells, de acordo com Dantas (2015), é desenvolvida com pás simétricas para que o ar, independente do fluxo, gire apenas em uma única direção, não prejudicando assim, a produção de energia.

Posteriormente, em 1991, o sistema LIMPET, adaptado do Coluna de Água Oscilante, é instalado com capacidade média de produção de 250KW, de acordo com ROTHBARTH (2017). Abaixo a figura 7 com o detalhamento do dispositivo LIMPET:

**Figura 7:** Detalhamento do Limpet



Fonte: CAMPOS, 2013

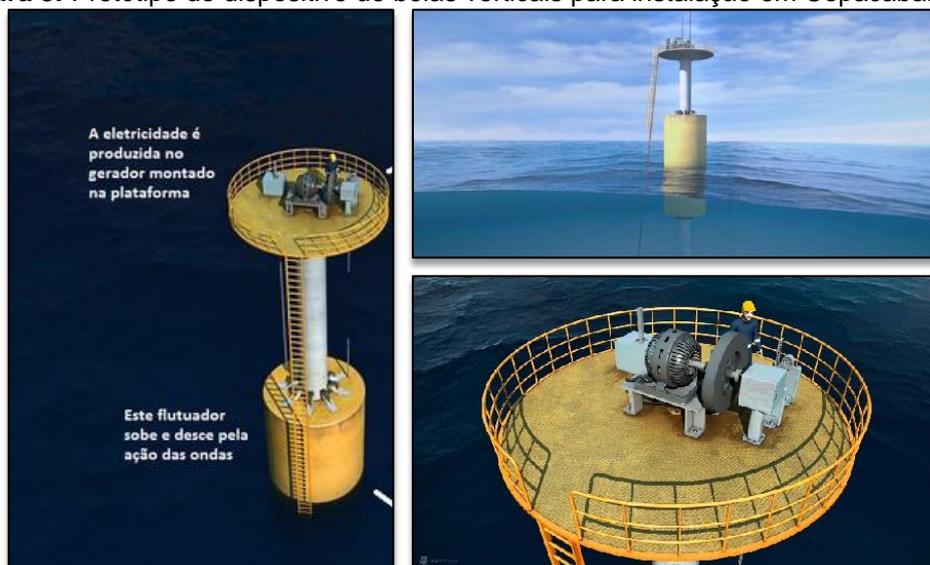
## 2.7. Dispositivo *nearshore* Boias com movimentos verticais

O sistema *nearshore* é concebido distante da orla, em profundidades de aproximadamente 20m a 25m, onde sua base é fundada no leito marinho e ligada a um cabo submarino ao qual conduz a eletricidade produzida pela parte superior composta de um flutuador, que se movimenta de acordo com as ondas, e um gerador montado na superfície da plataforma. Isso faz com que esse sistema precise de um equipamento mais resistente e de embarcações para manutenções (BARBOSA E ANDRADE, 2015).

O sistema de conversão de energia das ondas *nearshore*, da Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia (COPPE), segundo Shadman *et al.*, (2019) consiste em um corpo oscilador, com movimentos verticais, e uma estrutura de concreto fixada no leito marinho. Oito rolamentos, colocados na parte superior e inferior da seção cilíndrica, facilitam a oscilação da boia no sentido vertical.

Chamado originalmente de “travamento” por Budal e Falnes, o qual permite um controle das boias para seu movimento extremo, foram adaptados a esse sistema para superar a diferença de amplitude das ondas em todos períodos do ano. Esse movimento vertical, tanto para cima quanto para baixo, provocado pelas ondas, é transferido, através de uma haste central, para a caixa de engrenagens localizada no convés superior da plataforma. Em seguida, o movimento vertical é convertido em rotação adequada para o gerador elétrico. A figura 8 mostra o esquema do dispositivo de bois verticais:

**Figura 8:** Protótipo de dispositivo de boias verticais para instalação em Copacabana RJ



Fonte: <https://sustentarqui.com.br/energia-das-ondas-do-mar/>

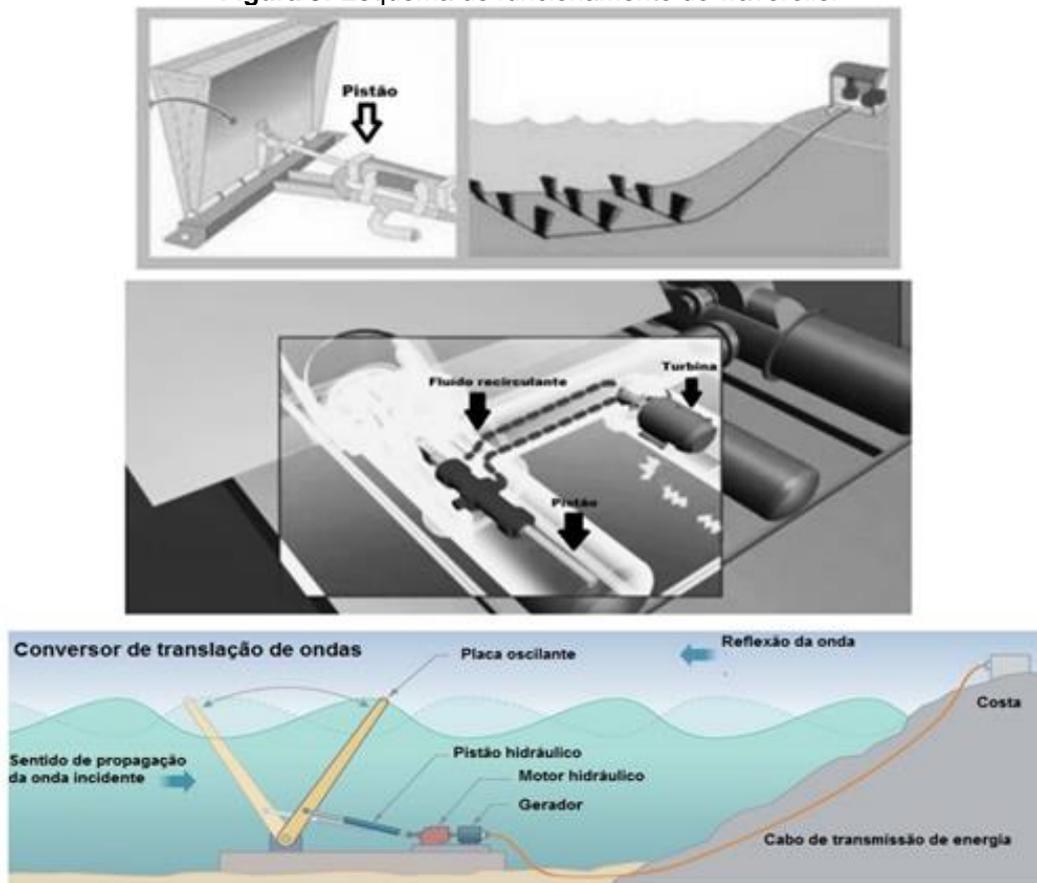
## 2.8. Dispositivo *nearshore* Waveroller

Estes dispositivos, segundo Mäki et. al (2014), devem ser instalados totalmente submersos e em profundidades de 15 a 25 m (*nearshore*) para melhor proveito da energia oriundas das ondas.

Conforme Vargas (2015), este dispositivo é constituído por uma placa articulada em sua base, a qual, ocasionado pelo movimento elíptico das ondas, se movimenta para frente e para trás, este movimento aciona pistões que fazem um fluido, a alta pressão, percorrer um pequeno sistema e passar por um gerador de energia elétrica, vide figura 9. A energia elétrica produzida é levada à costa por meio de cabos.

De acordo com AW-ENERGY (2017), estima-se que um único dispositivo, dependendo da sua geometria e dimensão, resulta em um potencial de geração entre 500 a 1000 KW. Kasanen (2015), descreve que, em um modelo recente, composto de apenas uma placa de 18 m de largura e 10 m de altura, o potencial foi de 350KW.

**Figura 9:** Esquema de funcionamento do waveroller



**Fonte:** Adaptado de Fuhrmeister, 2018

## 2.9. Dispositivo *offshore* Pelamis

Tipo de construção *offshore*, estes expostos a regimes de ondas mais energéticas, localizados distantes da costa, a profundidades entre 40 e 50m, são construídos em estruturas flutuantes ou ancorados ao fundo do mar, segundo (SANTOS e MOREIRA, 2015).

Neste tipo é necessário a construção de uma barragem em local de grande amplitude de maré. A passagem da água gira uma turbina instalada na parte de baixo da barragem, transformando energia cinética em energia elétrica.

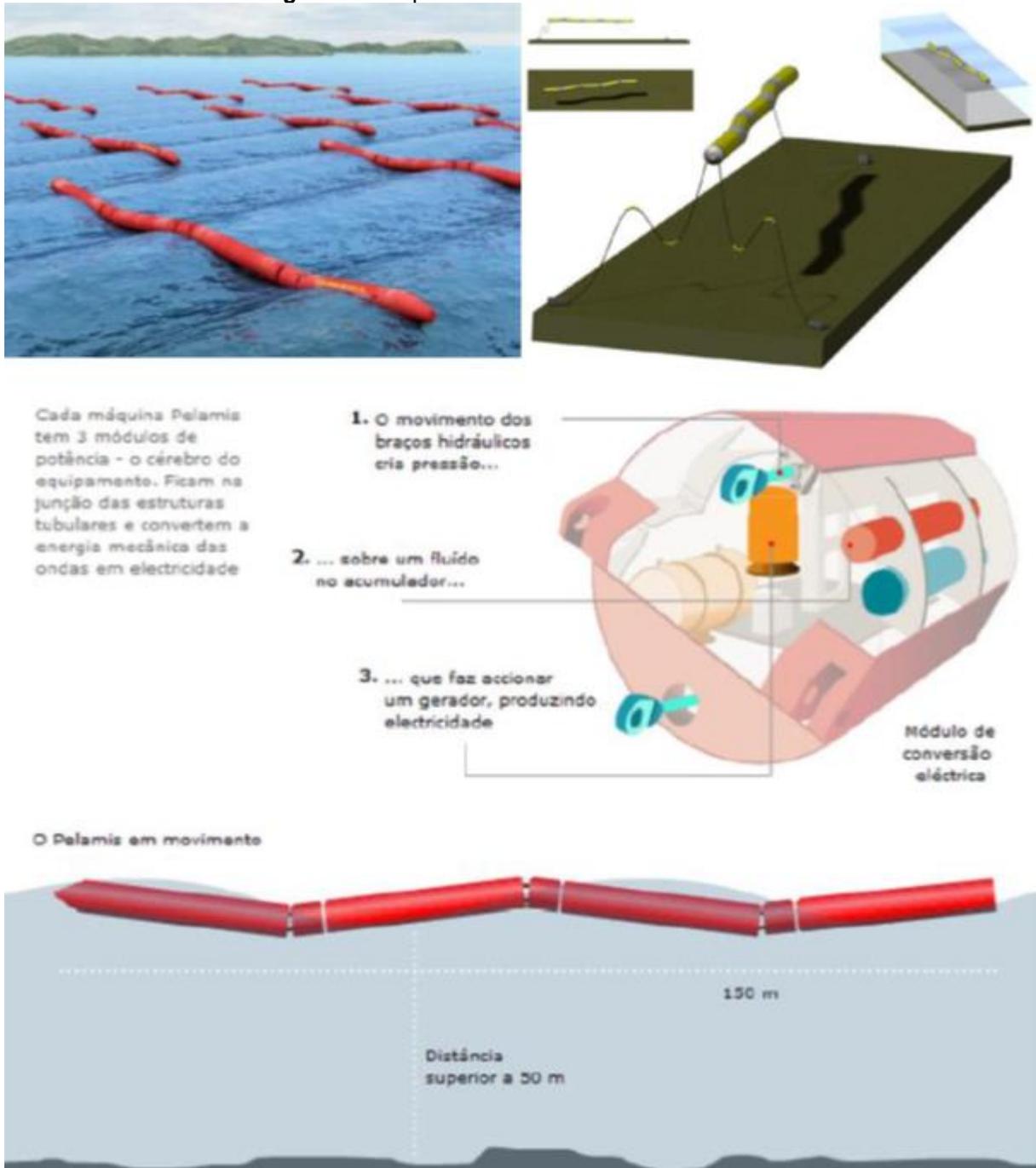
Como exemplo *offshore*, o dispositivo Pelamis, já desativado por falência da Babcock & Brown Company, na costa de Peniche, Portugal, possui 130 metros de comprimento e 3,5 metros de diâmetro, este composto por vários cilindros ligados entre si por articulações. Com o movimento oscilatório das ondas, o sistema bombeia óleo a alta pressão para motores hidráulicos, ao qual, acionam um gerador localizado na parte traseira. O gerador converte essa energia canalizada em energia elétrica transportando-a para terra através de cabos submersos (GOBATO e FEDRIGO, 2016). A figura 10 trata-se de uma imagem real do dispositivo Pelamis, e a figura 11 é o esquema de funcionamento do mesmo:

**Figura 10:** Foto real da estrutura do dispositivo Pelamis



**Fonte:** <https://www.portal-energia.com/caracteristicas-do-sistema-pelamis-para-energia-das-ondas/>

Figura 11: Esquema de funcionamento do Pelamis



Fonte: <http://slideplayer.com.br/slide/281626/>

## 2.10. Dispositivo *offshore* Wavedragon

O *Wave Dragon* é um dispositivo flutuante e ancorado, instalado em águas profundas e distante da orla (*offshore*). Esse dispositivo é do tipo galgamento.

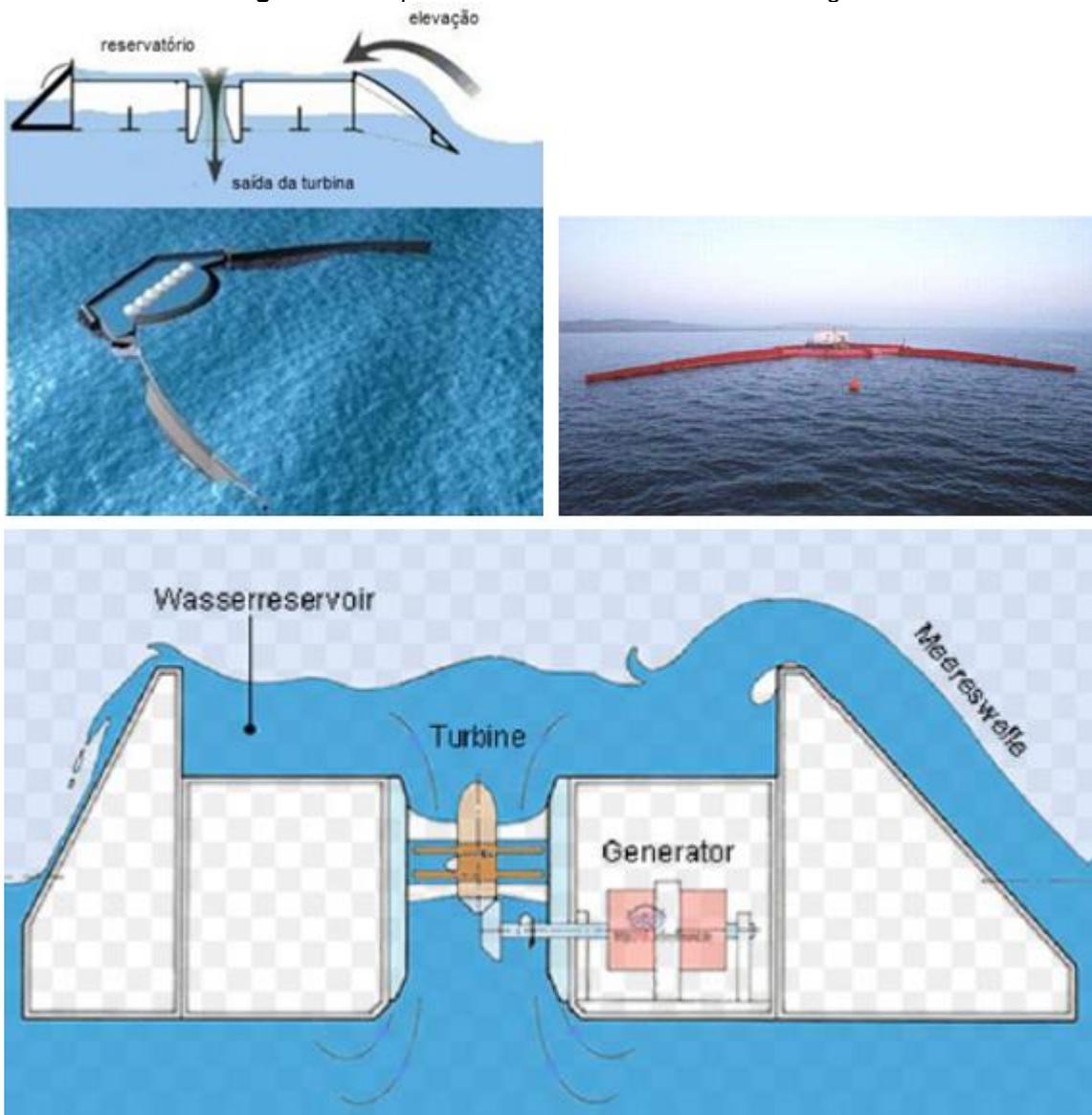
De acordo com Kofoed et al (2006), o *Wave Dragon* é composto de dois refletores, ligados a estrutura principal, focalizando as ondas em direção a rampa. Esses refletores aumentam, substancialmente, as ondas e, conseqüentemente, a energia da mesma. Além da estrutura principal, que consiste em uma rampa e um

reservatório de armazenamento de água, em um conjunto de turbinas hidráulicas de baixa pressão. Apresentada na figura 12 a seguir.

Segundo Kofoed et al (2006), após as ondas serem focalizadas pelos refletores e encherem o reservatório, situado em um nível superior ao do mar, a água passa pelas turbinas acionando o gerador elétrico. A eletricidade é conduzida para terra por cabos submarinos.

Cada unidade terá uma potência nominal de 4-10MW, dependendo de quão energético é o clima das ondas e o local de implantação (Kofoed et al, 2006).

**Figura 12:** Esquema de funcionamento do Wavedragon



Fonte: [www.lehrerfreund.de](http://www.lehrerfreund.de)

### 3. Metodologia

A metodologia aplicada a este estudo aborda uma pesquisa bibliográfica detalhada sobre seis tipos de conversores de energia elétrica ondomotriz, detalhando o princípio de funcionamento e as características técnicas de cada um, e o levantamento e análise de dados de formação e energia de ondas da região litorânea do Brasil.

Além das informações dos dispositivos e características das ondas no litoral brasileiro, foram coletadas informações e evidenciado ao trabalho os mapas de intensidade e altura das ondas no Brasil, extraídos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) durante um período de uma semana, mais especificamente do dia oito de novembro de dois mil e vinte (08/11/2020) ao dia quatorze de novembro de dois mil e vinte (14/11/2020).

Os dados levantados durante este trabalho foram consolidados e tabelados para uma melhor visualização e servir de base para os cálculos realizados, tais como cálculo do período médio das ondas dentro da zona econômica exclusiva do litoral brasileiro e capacidade de geração de cada dispositivo, levando em consideração sua potência nominal, dimensão efetiva e eficiência.

Como resultados e discussões deste, plotamos junto ao mapa adaptado dois tipos de análise efetuada, a primeira levando em consideração o tipo (*onshore*, *nearshore* e *offshore*) de dispositivo que melhor se enquadrava em cada região, e a segunda com o próprio dispositivo conversor onde qual a melhor região cada um dos seis apresenta a melhor viabilidade, levando em consideração suas características construtivas, características das ondas e capacidade de geração.

### 4. Resultados e discussões

No intuito de se realizar uma comparação entre os dispositivos abordados, tomamos como base algumas características que influenciam diretamente na geração dos conversores.

#### 4.1. Dispositivo *onshore* com câmara hiperbárica

##### 4.1.1. Características construtivas

Instalado sobre duas bases de concreto de 12m de comprimento, dois flutuadores com 10m (dimensão efetiva) de diâmetro e um braço mecânico com 22m de comprimento cada, conectados a dois patins. Seu corpo oscilante é composto por

uma boia em formato circular, capaz de absorver as ondas sejam essas de qualquer direção. Sua câmara hiperbárica é responsável por compensar a variação de entrada causada pela altura da onda, sendo ela maior ou menor que a de saída, mantendo a pressão de saída constante, necessitando apenas de uma frequência constante.

#### 4.1.2. Características de geração

Capacidade de geração de 50kW por módulo. Eficiência varia entre 19 a 36%. Dispositivo depende principalmente da frequência das ondas.

### 4.2. Dispositivo *onshore* Coluna de Água Oscilante (Oscillating Water Column)

#### 4.2.1. Características construtivas

Levando em consideração o dispositivo LIMPET instalado no Reino Unido, sua parte inferior possui uma abertura de 21m (dimensão efetiva), sua geração é através de expansão e retração do ar dentro de uma câmara, na qual gira, independente do sentido do ar, a turbina Wells responsável pela produção de energia.

#### 4.2.2. Características de geração

Capacidade de geração de 250kW. Eficiência em média de 49%. Dispositivo depende principalmente da altura das ondas.

### 4.3. Dispositivo *nearshore* Boias com movimentos verticais

#### 4.3.1. Características construtivas

O dispositivo da COPPE, ainda em situação de testes, possui um sistema conhecido como “travamento”, capaz de controlar as boias para o seu movimento extremo. Não importando a sazonalidade encontrada no Brasil. No teste de laboratório, os maiores valores encontrados foram com boias de 9m (dimensão efetiva) de diâmetro.

#### 4.3.2. Características de geração

Capacidade de geração de 50kW. Eficiência varia entre 4 a 13%. Dispositivo depende principalmente da frequência das ondas.

### 4.4. Dispositivo *nearshore* Waveroller

#### 4.4.1. Características construtivas

Ancorado no fundo do mar (perto da costa fácil de construir a infraestrutura, baseado em uma estrutura em forma de prato que tem movimento angular. Uma placa possui em média 18m (dimensão efetiva) de largura.

#### 4.4.2. Características de geração

Capacidade de geração de 350kW. Eficiência varia entre 25 a 50%. Dispositivo depende principalmente do período da onda, onde sua maior eficiência foi verificada em ondas de 10s.

#### 4.5. Dispositivo *offshore* Pelamis

##### 4.5.1. Características construtivas

Desenvolvido pela empresa OceanPower Delivery Limited, instalado em Portugal, dispositivo articulado semisubmerso (semelhante a uma cobra flutuante), composto por seções cilíndricas ligada por juntas articuladas, possui 150 m de comprimento, 3,5 de largura. A dimensão efetiva do dispositivo Pelamis é 3 vezes o tamanho da largura, ou seja 10,5m.

##### 4.5.2. Características de geração

Capacidade de geração de 750kW. Eficiência em média de 70%. Dispositivo depende principalmente da altura e período da onda.

#### 4.6. Dispositivo *offshore* Wavedragon

##### 4.6.1. Características construtivas

Protótipo instalado em Bredning, Dinamarca, mecanismo de galgamento de acumulação de energia potencial. Energia incidente concentrada por dois refletores parabólicos que focalizam as ondas para uma rampa curva. Atrás da rampa há um reservatório, que fica acima do mar, no qual a água que sobe pela rampa sendo armazenada temporariamente. A água deixa o reservatório através das turbinas. Seu protótipo possui 260m (dimensão efetiva) de comprimento.

##### 4.6.2. Características de geração

Capacidade de geração entre 4 a 10MW. Eficiência em média de 21%. Dispositivo depende principalmente da altura e período da onda.

#### 4.7. Dados calculados

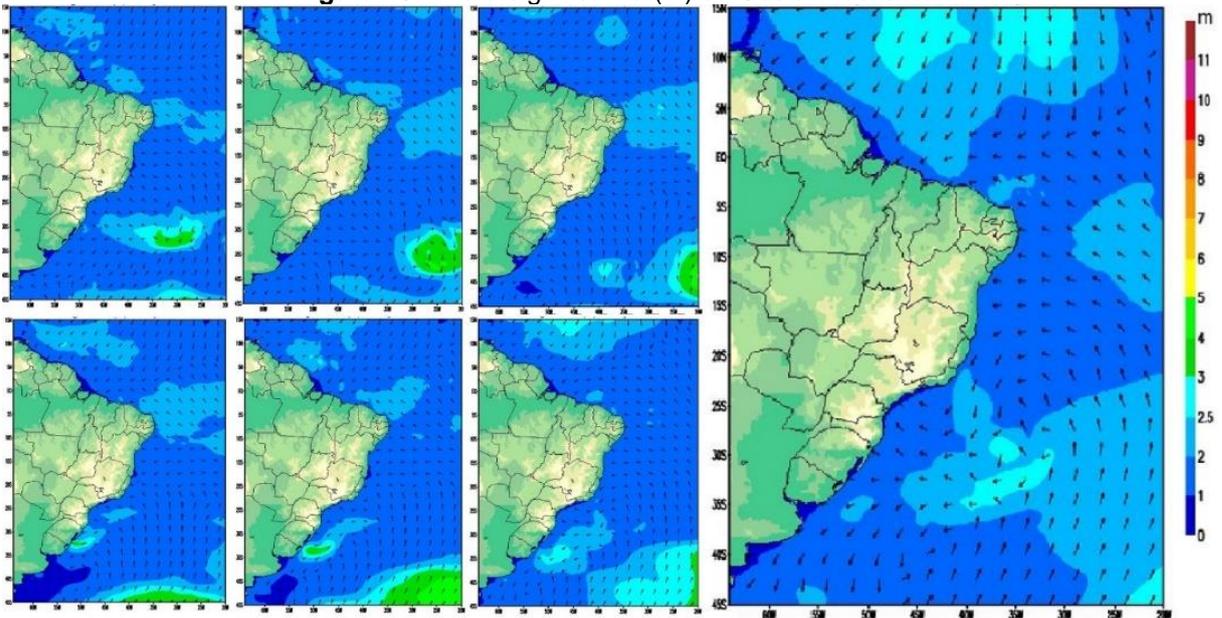
A tabela 2 mostra um quadro resumo quanto a potência de cada dispositivo, eficiência e o fator mais relevante para proporcionar melhor geração para os mesmos. Através do estudo de diferentes trabalhos científicos, foi possível elencar estas características e analisá-las nas comparações realizadas.

**Tabela 2:** Resumo das características dos dispositivos

Sistema	Dispositivos	Potência Total (kW)	Eficiência (%)	Dimensão efetiva (m)	Dependência
Onshore	Câmara hiperbárica	50	19 a 36	10	Período da onda
	Coluna de Água Oscilante	250	49	21	Altura da onda
Nearshore	Boias verticais	50	4 a 13	9	Período da onda
	Waveroller	350	25 a 50	18	Período da onda
Offshore	Pelamis	750	70	10,5	Altura e Período da onda
	Wavedragon	4000 a 10000	21	260	Altura e Período da onda

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2020

Para a altura média da onda tomamos como base os mapas da costa brasileira durante o período de 08/11/2020 à 14/11/2020, extraídos do site do INPE, conforme Figura 13:

**Figura 13:** Altura significativa (m) da Costa Brasileira

**Fonte:** <http://ondas.cptec.inpe.br/mapas.php?regiao=brasil>

Após a coleta dos dados, foi analisada visualmente a média da altura (m) das ondas dentro da zona econômica exclusiva para cada uma das regiões, sendo elas: Região A: Sul, Região B: Sudeste, Região C: Nordeste e Região D: Norte, do Brasil. Os dados foram registrados na tabela 3 a seguir:

**Tabela 3:** Altura média das ondas

Altura média das ondas (m)				
Dispositivos	Região A (Sul)	Região B (Sudeste)	Região C (Nordeste)	Região D (Norte)
Onshore (Na costa)	1,5	1,0	1,5	1,5
Nearshore (Próximo à costa)	2,0	1,5	1,5	1,5
Offshore (Afastado da costa)	2,5	2,0	2,0	2,5

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2020

A potência da onda em kW/m é expressa pela seguinte equação:  $P = 0,49 * H^2 * T$ , onde:

P = Potência da onda em kilowatts por metro

H = Altura média da onda em metros

T = Período da onda em segundos

Na figura 4 onde é apresentado um mapa de energia das ondas no litoral brasileiro temos a média anual da potência das ondas em kW/m, portanto, para obtenção do período da onda, foi manipulada a fórmula anterior da seguinte maneira:

$$T = \frac{P}{0,49 * H^2}$$

Com a utilização da fórmula do período, obtivemos os resultados apresentados na Tabela 4 a seguir:

**Tabela 4:** Período das ondas em cada região

Período das ondas (s)				
Dispositivos	Região A (Sul)	Região B (Sudeste)	Região C (Nordeste)	Região D (Norte)
Onshore (Na costa)	9,1	20,4	9,1	9,1
Nearshore (Próximo à costa)	7,7	13,6	9,1	9,1
Offshore (Afastado da costa)	8,2	10,2	8,9	5,7

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2020

A tabela 5 abaixo mostra os dados obtidos visualmente pelo mapa da figura 4. Salientamos que os valores para o sistema offshore nas regiões C e D foram adotados com base na média.

**Tabela 5:** Potência das ondas em cada região

Dispositivos	Potência da onda (kW/m)			
	Região A (Sul)	Região B (Sudeste)	Região C (Nordeste)	Região D (Norte)
Onshore (Na costa)	10	10	10	10
Nearshore (Próximo à costa)	15	15	10	10
Offshore (Afastado da costa)	25	20	17,5	17,5

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2020

Com os dados de dimensão efetiva e eficiência de cada dispositivo mostrados na tabela 2, e potência da onda evidenciados na tabela 5, foram calculadas as capacidades de geração para cada dispositivo em cada região geográfica da costa brasileira. A seguir a tabela 6 com os dados calculados. Os cálculos foram realizados utilizando a seguinte fórmula:

$$\text{Capacidade de geração (kW)} = P * d * \%$$

P = Potência da onda em kilowatts por metro

d = Dimensão efetiva em metros

% = Eficiência do conversor em porcentagem

**Tabela 6:** Capacidade de geração de cada dispositivo em cada região

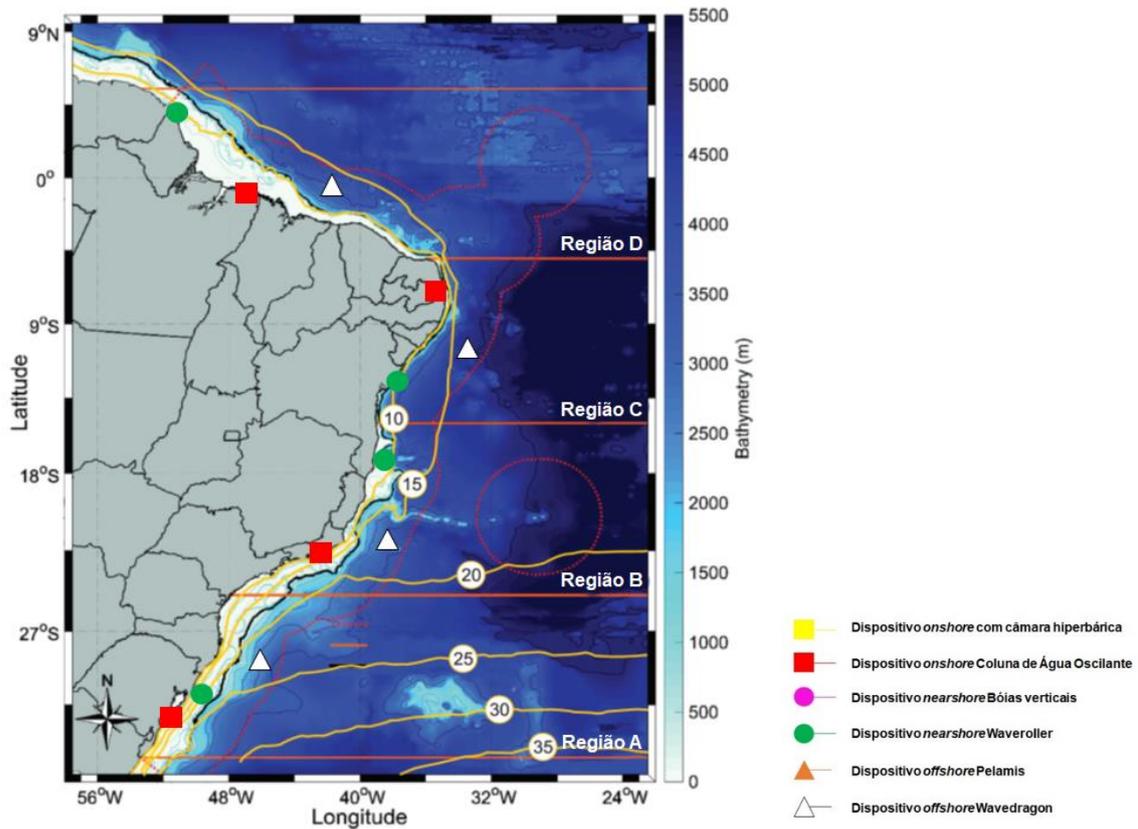
Dispositivos	Capacidade de Geração (kW)			
	Região A (Sul)	Região B (Sudeste)	Região C (Nordeste)	Região D (Norte)
Dispositivo <i>onshore</i> com câmara hiperbárica	36	36	36	36
Dispositivo <i>onshore</i> Coluna de Água Oscilante	102,9	102,9	102,9	102,9
Dispositivo <i>nearshore</i> Boias verticais	17,55	17,55	11,7	11,7
Dispositivo <i>nearshore</i> Waveroller	135	135	90	90
Dispositivo <i>offshore</i> Pelamis	183,75	147	128,625	128,625
Dispositivo <i>offshore</i> Wavedragon	1365	1092	955,5	955,5

**Fonte:** Elaborado pelo autor, 2020

Na figura 14, onde os dispositivos foram distribuídos através de um comparativo entre modelos, foram encontrados em unanimidade, para todas regiões os dispositivos em questão: Coluna de Água Oscilante (*onshore*), Waveroller (*nearshore*) e Wavedragon (*offshore*), devido a tendência dos resultados obtidos de altura e

período de onda, e capacidade de geração frente aos demais dispositivos de mesmo sistema.

**Figura 14:** Mapa plotado Sistemas por região



**Fonte:** Adaptado de Shadman, et al., 2019

Já na figura 15, os dispositivos brasileiros tiveram suas localidades mantidas nas áreas de instalação definida pelos idealizadores. Para o dispositivo de câmara hiperbárica sua localidade foi mantida na região D (Norte), onde ventos alísios são responsáveis por ondas de períodos mais curtos. Como esse dispositivo tem a possibilidade de compensar a entrada, por conta da câmara hiperbárica, essa repetição de ondas torna-o mais viável.

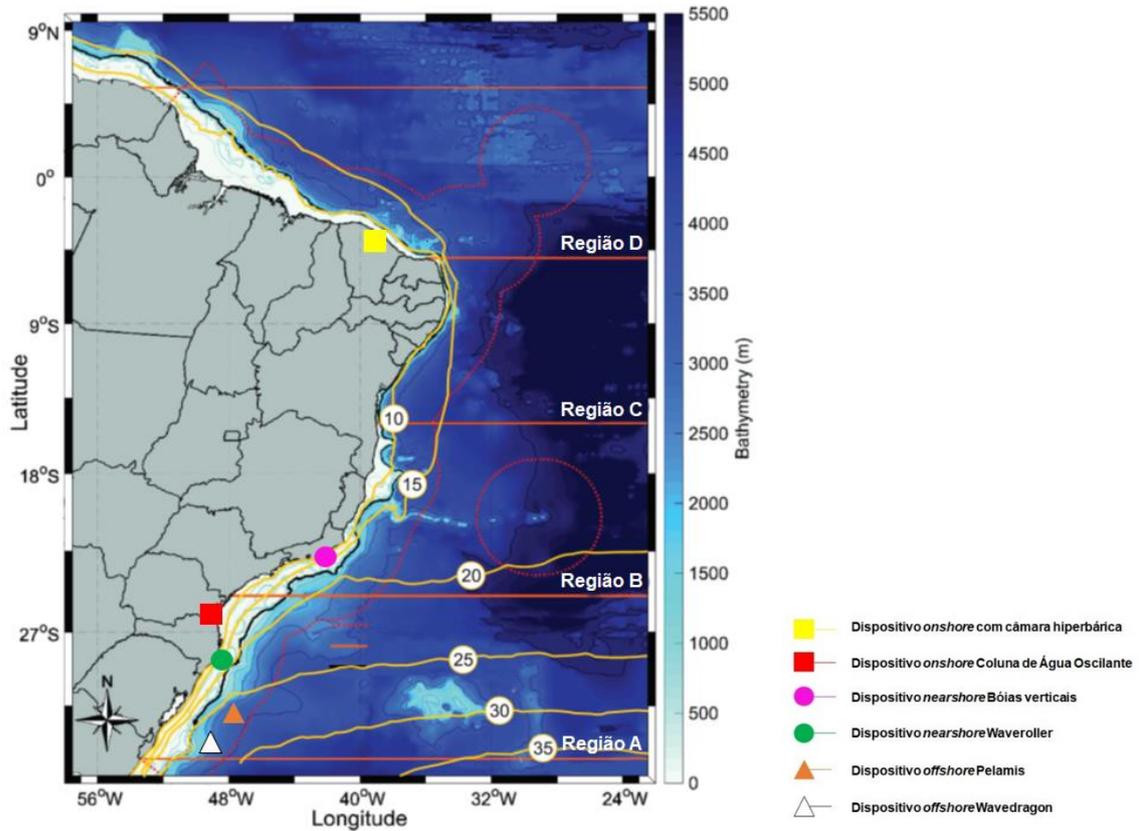
Para o dispositivo de boias com movimentos verticais, ainda em fase de projeto, foi verificada a melhor viabilidade no estado do Rio Janeiro, mais especificamente em Ilha Rasa na praia de Copacabana. O dispositivo possui como característica um sistema de travamento, que proporciona uma eficiência mais regular mesmo com a variação da altura das ondas da região Sudeste (região B do mapa).

Para os demais, foi verificado que na região A (Sul) os dispositivos obtiveram os melhores resultados quanto à capacidade de geração, muito em decorrência de

que, coincidentemente, todos estes dispositivos foram projetados para regiões mais energéticas.

Na região C (Nordeste), como exemplo a Bahia com seus 8 km, a extensão da plataforma continental é considerada pequena, desfavorecendo que tecnologias como estas sejam implantadas.

**Figura 15:** Mapa plotado Dispositivos por região



**Fonte:** Adaptado de Shadman, et al., 2019

## 5. Considerações finais

Com todos os levantamentos realizados e dados apresentados no decorrer deste trabalho, podemos concluir que a região Sul do Brasil seria a de maior viabilidade para adoção de energia ondomotriz, devido as características de amplitude e potência das ondas, levando em conta os dispositivos apresentados.

Tomando a região Sul como referência, devido ao seu destaque frente as demais regiões, os dispositivos Wavedragon, Pelamis, Waveroller e Coluna de Água Oscilante se enquadraram melhor pelas características que apresentam, tanto construtivas quanto de capacidade de geração. Já os dispositivos de Câmara Hiperbárica e Boias Verticais, ambos desenvolvidos pela Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia (COPPE), foram mantidos nas regiões onde já existem estudos mais avançados para os mesmos, inclusive a implantação de uma usina para teste que é a de Porto de Pecém (CE).

Dentre os dispositivos apresentados, o Wavedragon de sistema offshore obteve resultados melhores em capacidade de geração em todas as regiões da costa brasileira.

Embora ainda em desenvolvimento, há indícios de uma crescente na exploração da energia ondomotriz, não somente no país, mas no mundo, cada vez mais se torna visível o aumento no número de projetos e pesquisas relacionadas ao tema abordado, o que torna fundamental a evolução do planejamento do setor elétrico.

## Referências

- BAITZ, Tauane. **Energia das ondas no Brasil**. Portal Biossistemas Brasil. 2018. Disponível em: <<http://www.usp.br/portalbiossistemas/?p=7953>>. Acesso em: 23 de abril de 2020.
- BARBOSA e THIAGO, Fernanda e Ícaro. **Viabilidade da maremotriz em algumas das regiões litorâneas do nordeste do Brasil**. Artigo de revista eletrônica, Salvador, 2015.
- BARRETO, Carlos Eduardo. **Estudo dos conversores de energia ondomotriz em energia elétrica**. Projeto de graduação, Universidade de Brasília, 2015.
- BEELES, Charlotte *et al.* **Application of the time-dependent mild-slope equations for the simulation of wake effects in the lee of a farm of Wave Dragon wave energy converters**. Renewable Energy, 2010.
- BODNAR, Stefano. **Estudo de viabilidade da instalação de usina marítima de geração de energia elétrica no litoral norte de Santa Catarina**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade de Santa Catarina, Joinville, 2017.
- BUARQUE, Beatriz. **O Brasil avança nos testes com a energia das ondas ou ondomotriz**. Observatório de energias renováveis para a América Latina e o Caribe. 2014. Disponível em: <<https://www.renenergyobservatory.org/br/single-news/ondomotriz.html>>. Acesso em: 07 de maio de 2020.
- ESTEFEN, Segen *et al.* **Wave Energy Hyperbaric Device for Electricity Production**. Proceedings of the 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2007.
- ESTEFEN, Segen *et al.* **Design Analyses Applied to a Hyperbaric Wave Energy Converter**. Conference: Prads - International Symposium, 2010.
- ESTEVAM, Anderson *et al.* **Energia Maremotriz**. Pesquisa e Ação V4 N1, 2018.
- FALCÃO, Antônio F. de O. **Wave energy utilization: A review of the technologies**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010.
- FERREIRA, R.; ESTEFEN, S. F. **Alternative concept for tidal power plant with reservoir restrictions**. Renewable energy, 34, p. 1151-1157, 2009.
- FUHRMEISTER, Guilherme. **Modelagem numérica da hidrodinâmica e geração de energia dos dispositivos oscilantes por translação de ondas**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.
- GARCIA ROSA, Paula. *et al.* **Modelagem da dinâmica de um conversor hiperbárico de energia das ondas em energia elétrica**. Artigo publicado pelos alunos Programa de Engenharia Oceânica – COPPE, Rio de Janeiro, 2009.

- GUERREIRO, Rodrigo. **A Geração de energia maremotriz e suas oportunidades no Brasil**. Revista Ciências do Ambiente On-Line, 2012.
- GOBATO, R. *et al.* **Harnessing the energy of ocean surface waves by Pelamis System**. Parana Journal of Science and Education, 2016.
- KIELING, Rafael. **As 5 Maiores Fontes de Energia Elétrica no Brasil**. Hidroenergia. 2018. Disponível em: <<https://www.hidroenergia.com.br/as-5-maiores-fontes-de-energia-eletrica-no-brasil/>>. Acesso em: 24 de abril de 2020.
- KOFOED, Jens Peter *et al.* **Prototype testing of the wave energy converter wave dragon**. Renewable Energy 31, 2006.
- MUSTAPA, M.A *et al.* **Wave energy device and breakwater integration: A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017.
- PIANCA, Cássia *et al.* **Brazilian Offshore Wave Climate Based On Nww3 Reanalysis**. Brazilian Journal Of Oceanography, 2010.
- SESMIL, Edson Luís. **Energia maremotriz: impactos ambientais e viabilidade econômica no brasil**. Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, 2013.
- SHADMAN, Milad. **Application of the Latching Control on a Wave Energy Converter**. Tese de Doutorado (Programa de Engenharia Oceânica) - COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.
- SHADMAN, Milad *et al.* **Ocean Renewable Energy Potential, Technology, and Deployments: A Case Study of Brazil**. Artigo Energies, 2019.
- YEMM, Richard *et al.* **Pelamis: experience from concept to connection**. Philosophical Transactions of The Royal Society, 2012.
- ZANCANELLA, A.Carlos. **Estudo comparativo e modelagem dinâmica de conversores de energia a partir de ondas oceânicas**. Dissertação para obtenção de Título de Mestre em Engenharia Mecânica. Florianópolis, 2016.