

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ANTÔNIO FÁBIO DANTAS DA NÓBREGA

**ESTUDO SOBRE A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS  
DAS ONDAS DO MAR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPINA GRANDE

2009

ANTÔNIO FÁBIO DANTAS DA NÓBREGA

**ESTUDO SOBRE A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS  
DAS ONDAS DO MAR**

Trabalho de Conclusão de Curso submetida à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande como  
parte dos requisitos necessários para obtenção  
da graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador  
Prof. Leimar de Oliveira

CAMPINA GRANDE

2009

ANTÔNIO FÁBIO DANTAS DA NÓBREGA

**ESTUDO SOBRE A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS  
DAS ONDAS DO MAR**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial necessário  
para a obtenção da graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade  
Federal de Campina Grande.

Data de Aprovação: 31 de agosto de 2009

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Leimar de Oliveira  
Universidade Federal de Campina Grande  
**Orientador**

---

Prof. Luis Reyes Rosales Montero  
Universidade Federal de Campina Grande

## **Agradecimentos**

A Deus, força maior que impulsiona minha vida.

A meus pais, Fábio e Zélia, pela educação e suporte em todos os momentos de minha vida.

Aos amigos, pelo incentivo e apoio nesta luta.

A meu orientador, prof. Leimar de Oliveira, pela oportunidade de trabalho e apoio.

A todas as empresas, professores, amigos da Internet, que forneceram materiais de pesquisa e solucionaram dúvidas, enriquecendo este trabalho.

A Lígia, pela revisão do trabalho.

A todos que, direta ou indiretamente, não foram mencionados, mas de alguma forma colaboraram com este trabalho.

## **Resumo**

Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo sobre a geração de energia elétrica através das ondas do mar. Para tanto, foi realizado um breve levantamento histórico, além do embasamento teórico que envolve todo este processo de conversão de energia. As tecnologias de conversão de energia das ondas foram classificadas e exemplos de cada categoria foram detalhados.

Palavras-chave: Geração de energia, Ondas do Mar, Energias Renováveis.

## **Abstract**

This work has as objective the development of a study about the electrical power generation through ocean waves. For that, it was made a brief historical survey, besides a theoretical referential that involves all this energy conversion process. The technologies of wave energy conversion were classified and examples of each category were detailed.

Key Words: Energy Generation, Sea waves, Renewable Energies.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</b> .....	7
<b>CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	10
2.1 Formação das ondas.....	10
2.2 Definições e características .....	10
2.2.1 Movimento e velocidade das ondas.....	11
2.2.2 Amplitude das ondas .....	13
2.2.3 Potência e energia das ondas .....	14
2.3 Disponibilidade do recurso .....	15
<b>CAPÍTULO 3 – CONVERSORES DE ENERGIA DAS ONDAS</b> .....	16
3.1 Classificação .....	16
3.2 Colunas de água oscilante – OWC.....	19
3.2.1 Localização do dispositivo .....	20
3.2.2 Características construtivas .....	21
3.2.3 Turbina.....	21
3.2.4 Controle do fluxo e pressão do ar.....	23
3.3 Corpos ativados pelas ondas - Pelamis.....	23
3.3.1 Características construtivas .....	24
3.3.2 Controle do dispositivo .....	25
3.3.3 Localização do dispositivo .....	25
3.3.4 Capacidade de captura de energia .....	26
3.4 Dispositivos de galgamento – Wave Dragon.....	27
3.4.1 Características construtivas .....	27
3.4.2 Controle do dispositivo .....	28
3.4.3 Turbinas.....	29
3.4.4 Localização e capacidade de captura de energia do dispositivo .....	30
<b>CAPÍTULO 4 – PROPOSTAS DO AUTOR</b> .....	31
<b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES</b> .....	35
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	36

## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas pelas quais passa o nosso planeta, associado ao grande crescimento da população mundial, são motivo de preocupação. Uma linha de desenvolvimento sustentável se faz necessária de modo a mitigar os drásticos danos já causados ao ambiente.

O ramo da energia tem papel essencial neste processo. As energias ditas renováveis surgem como uma alternativa para, reduzindo as emissões de carbono na atmosfera, potencializar os acordos feitos no Protocolo de Quioto, que entrou em vigor em 2005.

Na linha da energia limpa e sustentável, os oceanos se tornaram uma fonte a ser levada em consideração, devido a sua imensidão e potencialidade. Dentro de toda a diversidade de aproveitamento dos oceanos, a energia das ondas representa um caminho viável para obter-se uma nova alternativa para a matriz energética mundial, fugindo dos poluentes combustíveis fósseis.

A idéia de converter energia das ondas do oceano em uma forma de energia útil não é nova. O homem vem olhando para os oceanos por séculos, contemplando sua força estupenda e imaginando como se aproveitar desta.

Apesar de não ser a primeira idéia, a primeira patente foi registrada em 12 de julho de 1799, na Paris Iluminista, pelo Sr. Girard e seu filho. Tratava-se de uma plataforma que funcionava como uma bóia, na qual uma correia era atracada e, acionada pelas ondas do mar, moveria bombas de água, serras, moinhos e outros tipos de máquinas pesadas.

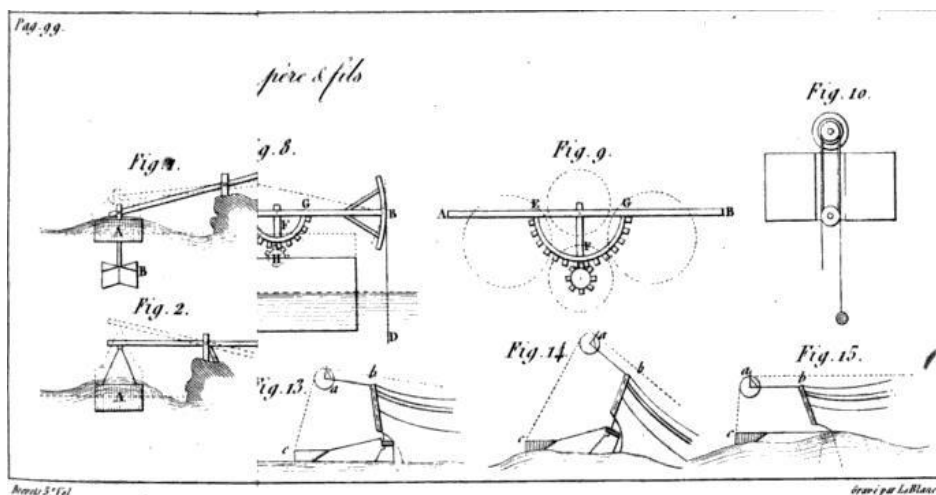


Figura 1.1: Esquema ilustrativo da patente do Sr. Girard e filho

Fonte: Brevet D'invention De Quinze Ans, 1799.



Durante todo o século XIX e durante a primeira metade do século XX, os estudos sobre a conversão de energia das ondas do mar, além de outras como a solar e a eólica, foram deixados de lado, devido à preferência pela utilização dos combustíveis fósseis que impulsionavam a Revolução Industrial. Casos como a iluminação de portos como o da Califórnia em 1909 ou as bóias de navegação que, no lugar dos antigos apitos, passaram a possuir um pequeno gerador de 20 W para a orientação luminosa de barcos, desenvolvidos pelo comandante japonês Yoshio Masuda durante a década dos 40, são exceções a este período.

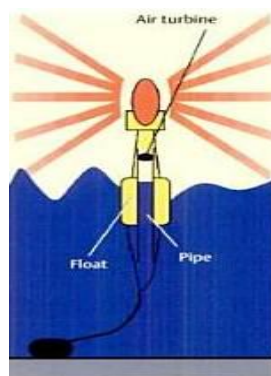


Figura 1.2: Esquema ilustrativo da bóia desenvolvida por Yoshio Masuda

Fonte: Bührke, 2008.

A pesquisa e desenvolvimento sobre a geração de energia elétrica através das ondas do mar teve um crescimento notável a partir da década dos 70, acelerados pela procura por fontes alternativas depois da crise do petróleo de 1973. Um dos principais pólos de pesquisa era o Reino Unido, cujo governo em 1975 começou um ambicioso programa de pesquisa e desenvolvimento, aproveitando a abundante fonte de energia das ondas. Neste período, com os conceitos da ciência ainda sendo entendidos, formou-se uma base para estudos posteriores muito sólida.

O professor Stephen Salter se notabilizou nesta época com seu conceito do “pato”, desenvolvendo com sua equipe da Universidade de Edinburgh um protótipo que seria inspiração para muitos projetistas, desde aquela época até os dias atuais.

Apesar da grande quantidade de conceitos surgindo neste período, nenhum líder ou tecnologia comercial emergiu, devido à tecnologia não ter atingido um estágio suficiente para atender as demandas de grande escala propostas. Com o término dos programas de auxílio à pesquisa e desenvolvimento britânico e europeu,

poucos pesquisadores continuaram na linha de pesquisa. Após isso, a energia eólica cresceu e a energia das ondas ficou temporariamente de lado.

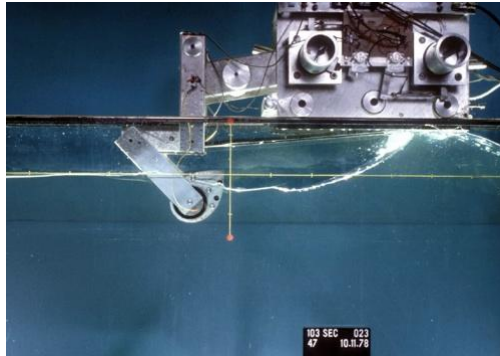


Figura 1.3: O pato de Salter num tanque de testes

Fonte: Wave Power Group, 2008.

O retorno das pesquisas em torno das ondas do oceano como fonte de energia elétrica aconteceu na metade da década dos 90, quando se teve um desenvolvimento em larga escala em países como Escócia, Portugal, Noruega, Dinamarca, Japão e Índia. O principal motivo deste retorno foi as metas de redução de emissão de carbono.

Atualmente, a procura por métodos de conversão de energia das ondas do mar ocorre devido à preocupação com a diversificação da matriz energética e a segurança do suprimento de energia elétrica, frente ao risco iminente de uma nova crise energética. Espera-se gerar energia em uma grande escala comercial a médio e longo prazo.

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo descritivo sobre a geração de energia elétrica através das ondas do mar, descrevendo o histórico, demonstrando todos os processos naturais que envolvem a formação das ondas, e posteriormente classificando e analisando algumas tecnologias em desenvolvimento no estágio atual.

No capítulo 2, será apresentado um breve histórico sobre a conversão de energia das ondas do mar. No capítulo 3, uma revisão da literatura sobre a formação, características e disponibilidade do recurso das ondas do mar é realizada. No capítulo 4, as tecnologias de conversão da energia das ondas do mar são classificadas e um exemplo de cada classificação é esmiuçado.

## **CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1 Formação das ondas**

As ondas referidas neste trabalho são ondas oceânicas geradas pelo vento. Sendo assim, elas são uma forma concentrada de energia solar. O sol aquece o ar, levando a diferenças de pressão que são os mecanismos que direcionam os ventos. A energia do sol é então, desta forma, transferida e concentrada nos ventos. Quando o vento bate numa massa de água, as ondas são criadas. Parte da energia dos ventos é transferida as ondas, e a energia que veio originalmente do sol é concentrada novamente.

O processo tem início com pequenas diferenças de pressão na superfície do oceano, devido à turbulência no vento, que cria pequenas irregularidades ou pequenas ondas na superfície oceânica. A ressonância entre a pressão vertical do vento e essas pequenas ondas, juntamente com o cisalhamento devido a velocidades mais altas do vento nas cristas comparadas aos vales, atuam sobre as ondas e as fazem crescer. Quando elas estão grandes o bastante, outros processos atuam; a fricção do vento na água e as diferenças de pressão criadas pelo cisalhamento no sotavento da onda comparado ao lado em que o vento bate da onda fazem com que as ondas continuem a crescer. A energia é continuamente transferida dos ventos para as ondas através de todos esses processos. O tamanho que as ondas alcançam depende de três fatores: a velocidade do vento, a duração do tempo em que o vento atua e a área de água na qual o vento está atuando.

### **2.2 Definições e características**

As ondas geradas pelo processo acima são denominadas de vagas. Contudo, as ondas, ao serem criadas, não dependem da ajuda do vento para se propagar. As ondas que não estão mais sobre a influência do vento que as geraram são denominadas de marulhos.

A aparência típica da área de geração das ondas é muito caótica. Várias ondas aparecem e desaparecem com várias alturas e comprimentos de onda diferentes, assim como em várias direções, não podendo se estabelecer um padrão, como mostra a fig. 2.1:

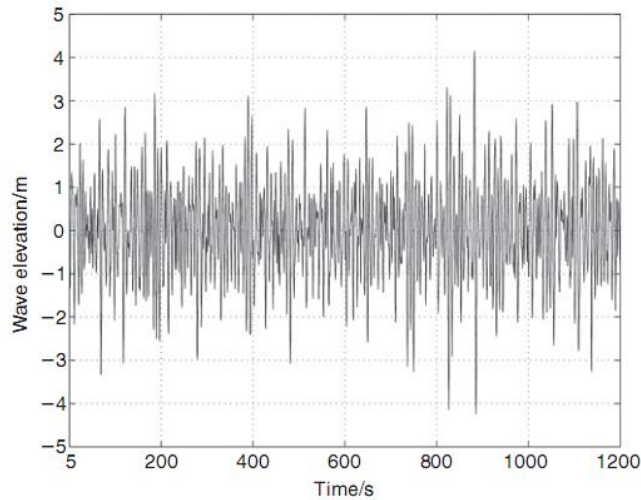


Figura 2.1: Gráfico da elevação da onda *versus* tempo

Fonte: Letcher, 2008.

Porém, a maioria dessas áreas pode ser matematicamente descrita como a sobreposição de um grande número de ondas senoidais perfeitas. A combinação de ondas senoidais de várias amplitudes, comprimentos, direções e posições irão recriar um estado de mar caótico.

### 2.2.1 Movimento e velocidade das ondas

As ondas apenas transportam energia. Assim, apenas uma pequena movimentação de massa de água é verificada. Uma partícula elementar de água irá mover-se num círculo vertical, surgindo primeiramente na crista da onda, mas retrocedendo quase a mesma distância ao passar pelo vale. Próximo a superfície, o diâmetro deste círculo é igual ao comprimento de onda. Com o aumento da profundidade, os diâmetros diminuem devido à interação com o fundo do mar chegando a se tornar insignificantes a profundidades maiores que metade de um comprimento de onda, como mostrado na fig. 2.2:

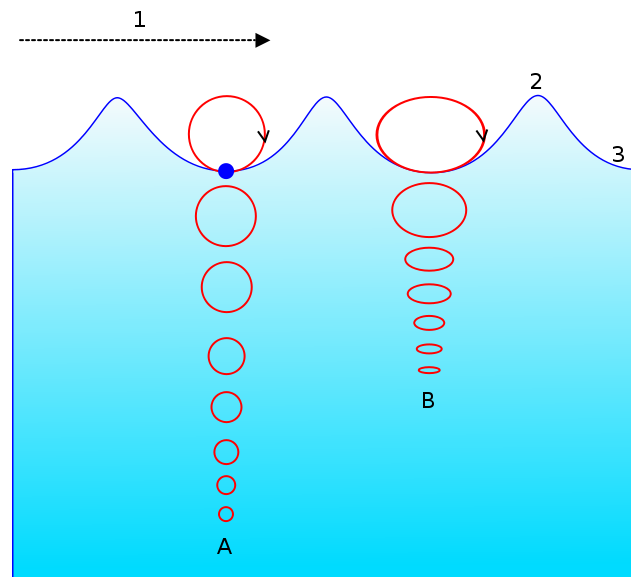


Fig. 2.2: Movimento de uma partícula numa onda gerada pelo vento

Fonte: Wikipédia, 2009.

Então, em águas profundas, onde a profundidade é maior que a metade do comprimento de onda, a onda não interage com o fundo do mar e seu comportamento é independente da profundidade. A velocidade da onda é, então, função do seu comprimento de onda, e seu valor é determinado por (ROSA, 2005, p. 652):

$$v = \sqrt{g \left( \frac{\lambda}{2\pi} \right)^{1/2}},$$

Eq. 2.1: Velocidade das ondas em águas profundas

onde  $g$  é o valor da gravidade local e  $\lambda$  é o comprimento de onda.

Contudo, quando a água é suficientemente rasa, ou seja, quando o comprimento de onda é bem maior que a profundidade, o movimento circular da água é perturbado pelo fundo do mar e a onda perde parte de sua energia, através da fricção com o fundo do mar, ocasionando uma movimentação elíptica da água. A velocidade da onda em águas rasas é determinada por (ROSA, 2005, p. 652):

$$v = \sqrt{g d},$$

Eq. 2.2: Velocidade das ondas em águas rasas

onde  $g$  é o valor da gravidade local e  $d$  é a profundidade do mar local.

Quanto mais raso, o período de onda diminui e quando a onda alcança uma altura correspondente a um sétimo do comprimento de onda, esta quebra. A velocidade com que a energia viaja pelo oceano através das ondas é denominada de velocidade de grupo, e é dada por (ROSA, 2005, p. 653):

$$v_g = v/2$$

Eq. 2.3: Velocidade de grupo das ondas em águas profundas

$$v_g = v$$

Eq. 2.4: Velocidade de grupo das ondas em águas rasas

### 2.2.2 Amplitude das ondas

A altura de uma onda depende do tamanho da área sobre a qual o vento atuou e da duração deste, sendo assim independente do comprimento da onda. A figura 2.3 mostra a relação empiricamente verificada entre a altura da onda e as variáveis acima citadas:

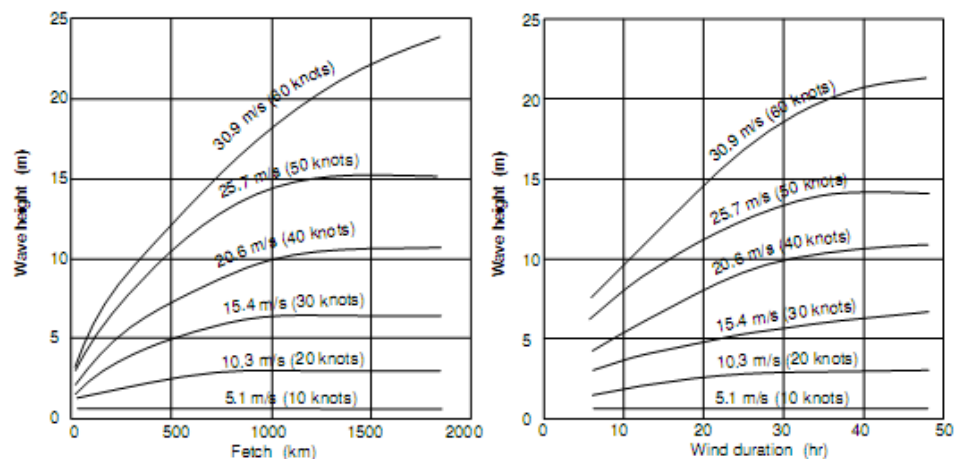


Figura 2.3: Altura das ondas em função da área de atuação e duração do vento

Fonte: Rosa, 2005.

### 2.2.3 Potência e energia das ondas

A potência das ondas oceânicas, ou seja, o fluxo de energia, é apresentado como a potência média por metro de comprimento de crista da onda, e a unidade usual é [W/m]. O que este valor fornece na realidade é a energia média por segundo que está passando por um metro de crista de onda, da superfície até o fundo do mar. Contudo, como visto anteriormente, o fluxo de energia diminui exponencialmente com a profundidade, de modo que 95% da energia está contida em profundidades maior que um quarto do comprimento de onda médio.

No caso de ondas marítimas reais, cada onda possui uma diferente altura e período, assim é necessário utilizar alguns valores característicos para descrever a condição do mar em um instante particular. Esses valores característicos são a altura significativa da onda  $H_s$  e o período de passagem pelo zero  $T_z$ .

A altura significativa da onda é a altura média de um terço das maiores ondas medidas, que é equivalente a estimar a altura vista por um observador no mar.

O período de passagem pelo zero é normalmente a média de todos os períodos definidos pela passagem por zero. Outro período representativo que é usado é o período de energia  $T_e$ , que é definido como o período equivalente de uma onda monocromática, ou seja, uma onda ideal, com a mesma energia das ondas pancromáticas, que possuem diferentes alturas e períodos, com altura igual à altura significativa da onda.

A potência de uma onda pancromática em águas profundas é então calculada de acordo com estatísticas e é dada por (LETCHER, 2008, p.132):

$$P = 0,49H_s^2T_e \left[ \text{W} / \text{m} \right],$$

Eq. 2.5: Potência de uma onda com referente ao comprimento de crista

onde  $H_s$  é fornecida em metros e  $T_z$  é fornecida em segundos.

A fórmula acima nos mostra que a potência de uma onda é proporcional ao período e quadraticamente proporcional a altura da onda em metros.

### 2.3 Disponibilidade do recurso

Assim como muitas formas de energias renováveis, a energia das ondas é distribuída de maneira desigual pelo globo. A figura 2.4 mostra a densidade de potência da energia das ondas em kW/m em todo o mundo.

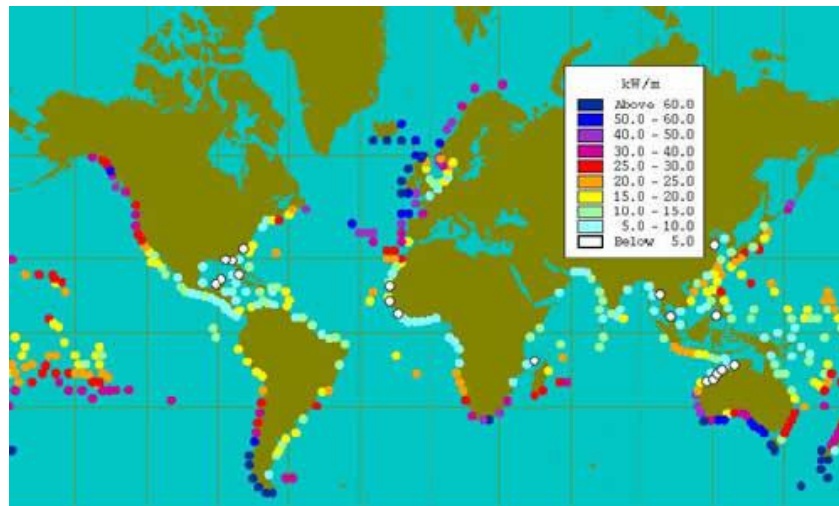


Fig. 2.4: Distribuição da energia das ondas no mundo

Fonte: Geni.org, Internet.

Nota-se que há uma intensa atividade entre 30° e 60° de latitude em ambos os hemisférios. Isto inclui as costas leste da América do Norte e Europa Ocidental, bem como as costas sul da América do Sul, África e Austrália.

Estes lugares não necessariamente indicam onde existe o maior potencial de extração de energia, já que muitos dessas regiões são de difícil acesso e comunicação. A região tropical, por ser alheia às fortes intempéries como as localizadas nas latitudes extremas, pode ser uma área com grande potencial futuro de extração de energia das ondas.

A distribuição da energia das ondas pelo globo é variável a cada dia e estação do ano, e é dependente das distribuições dos ventos que geram as ondas. Porém, podem-se prever antecipadamente os níveis de potência em cada região através de bóias e altímetros.

Segundo o Conselho Mundial de Energia (2007), o potencial de energia que pode ser extraída das ondas pode chegar até 2000 TWh/ano, o que corresponderia a cerca de 10% da demanda total de energia mundial do ano de 2006, de acordo com dados da Agência Internacional de Energia - IEA.



## **CAPÍTULO 3 – CONVERSORES DE ENERGIA DAS ONDAS**

Neste capítulo se tratará das tecnologias dos conversores de energia das ondas. Uma classificação destes será apresentada e, posteriormente, um exemplo de cada tecnologia será detalhado.

### **3.1 Classificação**

Em contraste com outras fontes de energia renovável, o número de conceitos desenvolvidos para conversão de energia das ondas é muito grande. Apesar das mais de mil técnicas de conversão patenteadas em todo o mundo e de levantamentos recentes que identificaram cerca de cem projetos em vários estágios de desenvolvimento (IEA, 2008), vários métodos têm sido propostos para classificar os sistemas de conversão de energia das ondas, de acordo com a localização, princípio de funcionamento e tamanho.

Alguns estudos prévios classificaram os dispositivos de energia das ondas de acordo com o método de captura (forma e método de conversão do movimento de vai-e-vem da onda). Apesar de útil, esta classificação está sujeita a limitações devido à grande diversidade de desenhos de dispositivos de conversão de energia das ondas, dos quais alguns envolvem formas únicas e mecanismos que não repousam entre as categorias estabelecidas. Estes fatores tendem a uma confusão sobre os limites entre as categorias quando um grande número de sistemas é considerado.

Muitos sistemas foram propostos e assim requerem uma divisão da miríade de conceitos de conversão de energia das ondas existentes em poucas categorias gerais. Neste sentido, Thorpe (1999) apresenta uma divisão onde os conversores são arranjados em três categorias: colunas de água oscilantes, corpos ativados pelas ondas e dispositivos de galgamento.

Os corpos ativados pelas ondas incluem todos os conceitos onde o movimento do oceano é transferido diretamente ao movimento do dispositivo, movimentando turbinas através de sistemas mecânicos e/ou hidráulicos. Uma subcategoria dos corpos ativados pelas ondas que é válido mencionar são os absorsores pontuais. A principal característica dos absorsores pontuais é a que eles são pequenos em dimensões horizontais quando comparados ao comprimento das

ondas as quais eles visam capturar a energia. Em outras palavras, eles ocupam uma área relativamente pequena da superfície oceânica.

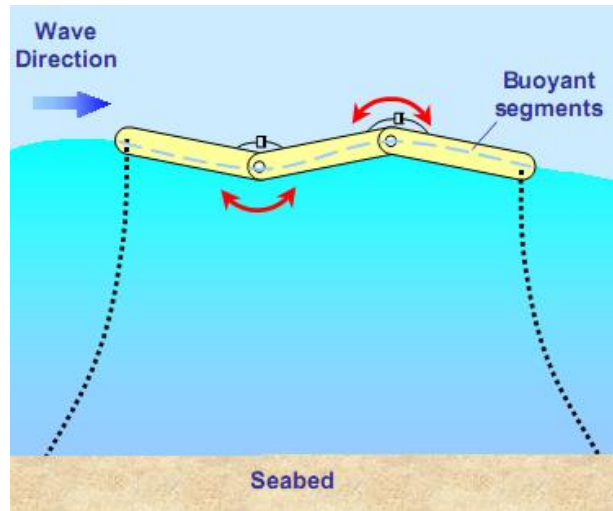


Fig. 3.1: Desenho conceitual de um corpo ativado pelas ondas

Fonte: Sørensen, 2005.



Fig. 3.2: Absorvedor pontual

Fonte: Sørensen, 2005.

Os dispositivos de galgamento consistem em uma rampa ou um canal afilado que força a água das ondas que se aproximam a subir e transbordar dentro de uma piscina ou reservatório. Desta forma, dado que a água do reservatório é elevada relativamente à superfície oceânica, a energia das ondas foi convertida em energia potencial. De uma maneira semelhante às usinas hidroelétricas, a água é devolvida ao oceano por uma turbina de baixa rotação, gerando assim energia elétrica.

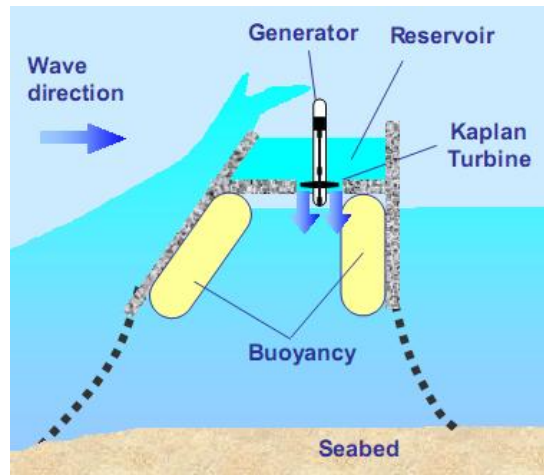


Fig. 3.3: Desenho conceitual de um dispositivo de galgamento

Fonte: Sørensen, 2005.

As colunas de água oscilante (*oscillating water columns - OWC*) possuem um pilar oscilante de água que bombeia o ar através de uma turbina. O movimento deste pilar de água é conseguido, por exemplo, através de um cano e colocando-o parcialmente submerso no mar. As ondas que passam pelo cano irão fazer com que a superfície interna da água oscile. Esta oscilação normalmente é usada para bombear o ar que irá acionar uma turbina.

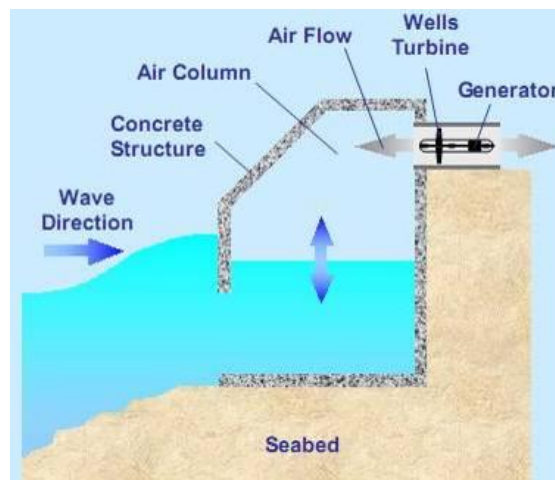


Fig. 3.4: Desenho conceitual de uma coluna de água oscilante

Fonte: Sørensen, 2005.

Uma expansão útil das categorias acima é adicionar a informação de localização do dispositivo. Uma forma típica de definição é quando se menciona que

o dispositivo é localizado na costa (*onshore*), próximo da costa (*nearshore*) ou afastado da costa (*offshore*).

A diferenciação entre os dispositivos localizados próximo da costa e afastados da costa se faz necessária:

*A principal diferença entre os dispositivos próximos da costa e os afastados da costa resulta das profundidades envolvidas. No primeiro caso as profundidades serão normalmente inferiores a 20 m e os dispositivos serão assentes no fundo do mar, enquanto no segundo caso rondarão os 50 m e os dispositivos serão flutuantes. (...) Assim, quando o leitor for confrontado com a classificação genérica de “distância à costa” deve ter presente que o fator preponderante é a profundidade evidenciada a essa distância e não o valor da distância à costa em si. (CRUZ; SARMENTO, 2004, p. 19).*

### 3.2 Colunas de água oscilante – OWC

A coluna de água oscilante opera muito similarmente a uma turbina eólica através do princípio da pressurização do ar induzida pelas ondas. Um tipo de compartimento fechado (câmara de ar) é colocado acima da água e a passagem das ondas muda o nível de água dentro do compartimento.



Fig. 3.5: Esquema de uma central de coluna de água oscilante (Wavegen)

Fonte: Cruz, 2004.

Se o compartimento for totalmente fechado, a subida e descida do nível de água irá aumentar e diminuir a pressão do ar respectivamente dentro do compartimento. Com esse conceito em mente, pode-se colocar uma turbina no topo do compartimento através do qual o ar entrará e sairá. O ar irá fluir pelo

compartimento durante o vale da onda e irá sair do compartimento durante a crista da onda.

Devido a este fluxo bidirecional de ar, a turbina tem que ser projetada para rotacionar em apenas uma direção independentemente da direção do fluxo de ar. A turbina Wells foi projetada para este tipo de aplicação e é usada na maioria dos dispositivos hoje em dia.

### 3.2.1 Localização do dispositivo

Os dispositivos OWC são construídos na costa ou próximos da costa. Os dispositivos localizados na costa são construídos onde as ondas quebram na praia e são conhecidos por serem barulhentos. Os dispositivos próximos da costa podem ser fixamente ancorados através de uma estrutura conectada ao fundo do mar ou então ancorados flexivelmente respondendo as mudanças dos níveis das marés.

Cada localização tem seus prós e contras. Segundo Vinning (2005), a energia próxima à costa e é maior do que a energia na costa, então um dispositivo OWC *nearshore* pode capturar mais energia. Como desvantagem, a instalação e custos de manutenção aumentam. Tanto os dispositivos *onshore* como os *nearshore* prejudicam a visualização do oceano, sendo de difícil aceitação pela opinião pública.



Fig. 3.6: Usina OWC *nearshore* de 1.5 MW localizada na Austrália

Fonte: IEA, 2009.

A mudança do nível médio das marés, acompanhado pelas marés pode proporcionar problemas a uma OWC ancorada fixamente. De outra maneira, um dispositivo fixo mantém sua posição melhor do que uma estrutura ancorada de modo flexível, provendo assim maior resistência às ondas incidentes e assim produzindo

mais energia. Outro contraponto entre estruturas fixas e flexíveis é que a estrutura flexível proporciona uma maior flexibilidade contra mares revoltos que poderiam danificar uma estrutura fixa. Além disso, os custos de instalação de uma estrutura flexível são menores do que o de uma OWC fixa devido à falta de necessidade de se construir uma onerosa estrutura de fixa ao fundo do mar.

### **3.2.2 Características construtivas**

A câmara de ar dentro da OWC tem que ser projetada para o período da onda, altura significativa da onda e características de comprimento de onda do clima oceânico local. Se o compartimento não for dimensionado corretamente, as ondas podem entrar em ressonância com a câmara de ar. Este efeito ressonante causa uma passagem de ar nula pela turbina. Idealmente, as dimensões da câmara de ar vão ser projetadas para maximizar a captura de energia no clima local enquanto as pesquisas mostram que o projeto do gerador (tamanho do gerador e coeficiente do gerador) é quase que independente do clima da área, assim apenas áreas com uma quantidade de energia extrema se beneficiam de grandes geradores.

Além do dimensionamento da câmara de ar de acordo com as características das ondas, esta também deve contribuir para o fluxo de ar através da turbina. Isto é mais bem atingido com um desenho em forma de funil de forma que a câmara se afila do nível de água até a turbina. Isto concentrará o fluxo de ar através da turbina.

### **3.2.3 Turbina**

Devido ao fluxo bidirecional de ar, a turbina tem que ser projetada para rotacionar em apenas uma direção independentemente da direção do fluxo de ar.

A turbina Wells foi projetada para este tipo de aplicação e é usada na maioria dos dispositivos hoje em dia.

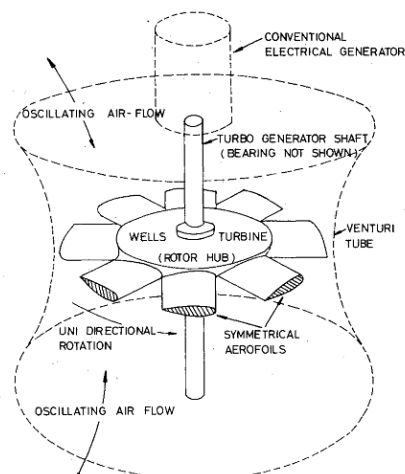


Fig. 3.7: Diagrama esquemático da turbina Wells

Fonte: Soons, 2006.

O desenho da turbina Wells envolve aerofólios de formato simétricos instalados a 90 graus do fluxo de ar. Num dispositivo de coluna de água oscilante, o tamanho e a velocidade de rotação do rotor da turbina de ar tornam possível armazenar uma quantidade substancial de energia em energia cinética (efeito *flywheel*).

Isto é particularmente verdadeiro para a turbina Wells, cujo diâmetro do rotor e velocidade de extremidade das pás são substancialmente maiores comparadas com as turbinas de impulso auto-retificadoras (que foram propostas como alternativa a turbina Wells).

Estas turbinas de ar auto-retificadoras são relativamente robustas e mecanicamente simples. Contudo, elas estão sujeitas a maiores condições de demanda do que as turbinas em qualquer outra aplicação, incluindo as turbinas eólicas. De fato o fluxo através da turbina é recíproco e altamente variável, sendo assim não é nenhuma surpresa que a eficiência média temporal de uma turbina de ar numa OWC é relativamente baixa, geralmente não excedendo 50%. Esta é uma área técnica com grande possibilidade de melhorias.

Outra desvantagem é a ausência de uma capacidade de início automático. Para acionar a turbina, o gerador tem que ser usado como um motor, o que consome alguma energia.

### **3.2.4 Controle do fluxo e pressão do ar**

Uma válvula de alívio é de importância inestimável no controle de um dispositivo OWC. Esta serve para liberar a pressão do ar extra causada por ondas cuja amplitude excede as condições de operação normal. Se a pressão sobressalente não fosse liberada, a turbina iria estolar. Além deste papel, a válvula de alívio age no controle da velocidade rotacional da turbina limitando o fluxo de ar através dela. Essa funcionalidade é similar ao controle de rotação das pás das turbinas eólicas.

Teoricamente, as válvulas de alívio são consideradas por deixar um fluxo linear de ar com uma capacidade de liberar pressão infinita. Na prática, as válvulas de alívio não são lineares devido à turbulência do fluxo de ar. Elas também possuem um limite máximo de fluxo de ar que restringe a taxa na qual a pressão do ar pode ser liberada.

Essas considerações são aceitáveis dentro de limites, mas não consideram condições extremas que podem ser encontradas num ambiente oceânico. A melhor maneira de superar estes limites será a instalação de válvulas com capacidade maior ou várias válvulas de pequeno tamanho.

A título de análise, o tempo de resposta das válvulas de alívio é considerado infinitesimal. Na realidade, o tempo que leva a válvula a responder não pode ser negligenciado. Não só a válvula de escape tem pequenos transitórios; o sistema de controle da válvula também possui um tempo para reagir às mudanças nas condições. Infelizmente, o método de controle depende das dimensões da chaminé do ar, turbina e válvulas usadas, além de condições climáticas.

O objetivo do controle da pressão e fluxo do ar deve ser o melhoramento do tempo de resposta do sistema e a maximização da captura de energia.

### **3.3 Corpos ativados pelas ondas - Pelamis**

O conversor de energia das ondas Pelamis P-750 é o resultado de um detalhado programa de testes e modelação conduzido pela Pelamis Wave Power Ltd (anteriormente conhecida como Ocean Power Delivery Ltd).





Fig. 3.8: Fazenda Pelamis em Aguçadoura, Portugal

Fonte: Pelamis, 2009.

### 3.3.1 Características construtivas

O Pelamis é uma estrutura semi-submersa flutuante, composta por quatro secções cilíndricas, unidas por três juntas articuladas onde se encontra um módulo de conversão de energia. Toda a estrutura pesa cerca de 750 toneladas, tem 140 m de comprimento e 3,5 m de diâmetro.

No módulo de conversão de energia, os movimentos induzidos pelas ondas são absorvidos por cilindros hidráulicos, que pressurizam óleo. Dada a natureza do recurso, acumuladores suavizam o circuito até o acionamento dos geradores elétricos que produzem eletricidade. A energia convertida em cada uma das juntas é entregue à rede elétrica através de um único cabo e vários dispositivos podem partilhar uma mesma ligação.

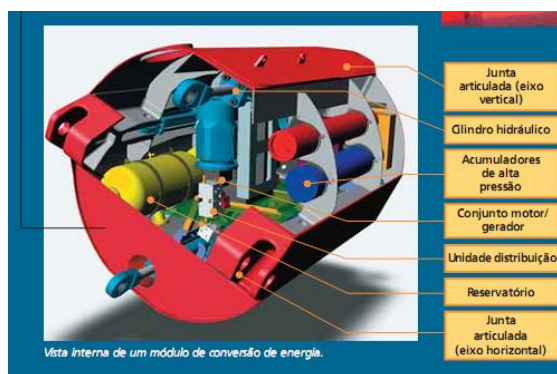


Fig. 3.9: Módulo de conversão de energia do Pelamis

Fonte: Pelamis, 2009.

O princípio de funcionamento do conversor de energia possui várias etapas:

- √ O movimento das articulações aciona macacos hidráulicos que funcionam como bombas aspirantes dos fluidos.
- √ O fluido hidráulico é assim aspirado de um reservatório de baixa pressão e comprimido para um acumulador de alta pressão. Do acumulador o fluido sai para acionar um motor hidráulico que por sua vez aciona um gerador elétrico.
- √ À saída do motor hidráulico, o fluido, agora sem pressão, regressa ao reservatório de baixa pressão, fechando assim o ciclo.
- √ A eletricidade gerada é conduzida ao longo da máquina até a proa do dispositivo, onde se encontra um transformador elevador cuja saída está ligada a um cabo submarino que conduzirá a energia até a subestação na costa.

### **3.3.2 Controle do dispositivo**

A configuração das juntas permite o ajuste da resposta da máquina induzindo um comportamento ressonante que maximiza a captura de energia em estados de mar moderados. O controle dessa configuração permite a maximização da captura de energia para os regimes menos poderosos e a garantia de sobrevivência da máquina nos regimes mais energéticos. As amarrações compreendem um sistema de bóias e pesos que previnem a tensão excessiva nos cabos enquanto mantêm a máquina em posição. A referência é extraída de ondas sucessivas.

O monitoramento do posicionamento do dispositivo é realizado através de GPS, e a comunicação com a central de controle é realizada através de fibras ópticas e banda larga sem fio.

### **3.3.3 Localização do dispositivo**

O Pelamis foi projetado para ser instalado em regiões com 50-70 m de profundidade (tipicamente 5-10 km da costa) onde os climas de ondas de águas profundas (mais poderosos) podem ser aproveitados.

A ancoragem do dispositivo é feita de maneira análoga a usada em plataformas de óleo industriais. A área onde o dispositivo se encontra é delimitada para evitar colisões com embarcações.

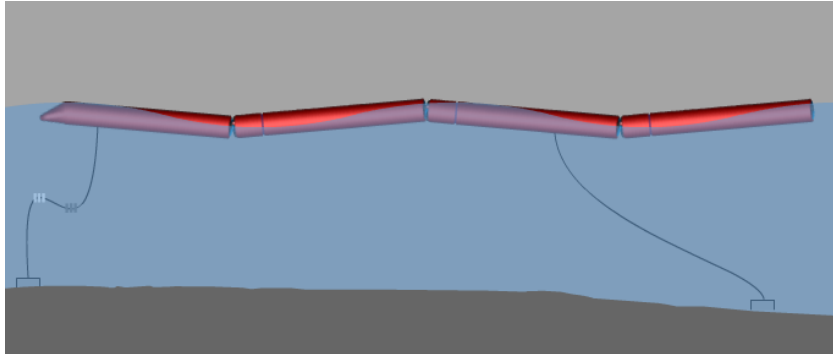


Fig. 3.10: Visão lateral do dispositivo, com destaque para a ancoragem.

Fonte: Pelamis, 2009.

### 3.3.4 Capacidade de captura de energia

A capacidade unitária do dispositivo é de 750 kW, porém a integração de vários dispositivos formando uma fazenda de energia das ondas também é possível, visto que todas as unidades podem ser interligadas através de um único cabo submarino.

Porém, as condições do mar local é que determinarão a potência que pode ser extraída. A figura 3.11 mostra a matriz de potência em relação a altura significativa de onda e período de onda:

		Power period ( $T_{pow}$ , s)																	
		5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	12.5	13.0	
Significant wave height ( $H_{sig}$ , m)	0.5	idle	idle	idle	idle	idle	idle	idle	idle	idle	idle	idle	idle	idle	idle	idle	idle	idle	
	1.0	idle	22	29	34	37	38	38	37	35	32	29	26	23	21	idle	idle	idle	
	1.5	32	50	65	76	83	86	86	83	78	72	65	59	53	47	42	37	33	
	2.0	57	88	115	136	148	153	152	147	138	127	116	104	93	83	74	66	59	
	2.5	89	138	180	212	231	238	238	230	216	199	181	163	146	130	116	103	92	
	3.0	129	198	260	305	332	340	332	315	292	266	240	219	210	188	167	149	132	
	3.5	-	270	354	415	438	440	424	404	377	362	326	292	260	230	215	202	180	
	4.0	-	-	462	502	540	546	530	499	475	429	384	366	339	301	267	237	213	
	4.5	-	-	544	635	642	648	628	590	562	528	473	432	382	356	338	300	266	
	5.0	-	-	-	739	726	731	707	687	670	607	557	521	472	417	369	348	328	
	5.5	-	-	-	-	750	750	750	750	737	687	658	586	530	496	446	395	355	
	6.0	-	-	-	-	-	750	750	750	750	750	750	711	633	619	558	512	470	415
	6.5	-	-	-	-	-	-	750	750	750	750	750	750	743	658	621	579	512	481
	7.0	-	-	-	-	-	-	-	750	750	750	750	750	750	750	676	613	584	525
	7.5	-	-	-	-	-	-	-	-	750	750	750	750	750	750	750	686	622	593
	8.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	750	750	750	750	750	750	750	690	625

Figura 3.11: Matriz de potência do dispositivo Pelamis em função da amplitude e período das ondas do mar

Fonte: Pelamis, 2009.

### 3.4 Dispositivos de galgamento – Wave Dragon

O conversor de energia das ondas Wave Dragon é um dispositivo de galgamento afastado da costa (*offshore*) produzida pelo consórcio internacional Wave Dragon ApS.



Figura 3.12: Dispositivo de galgamento Wave Dragon localizado na Dinamarca  
Fonte: Wave Dragon, 2009.

#### 3.4.1 Características construtivas

O sistema consiste numa plataforma semi-flutuante, com dois braços côncavos (refletores) e uma rampa central, destinada a permitir o galgamento das ondas, as quais enchem um reservatório onde estão dispostas várias turbinas verticais.

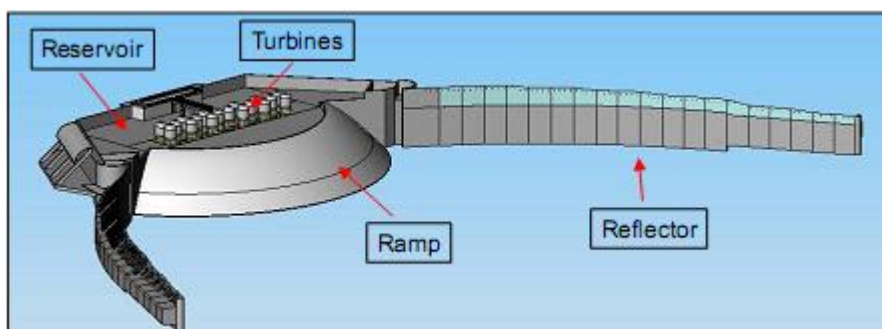


Figura 3.13: Esquema conceitual do Wave Dragon  
Fonte: Wave Dragon, 2009.

Os refletores de ondas têm o efeito de aumentar a altura significativa das ondas substancialmente, e assim aumentando a captura de energia por aproximadamente 100% em condições de onda típicas.

Quando as ondas galgam a rampa, esta água preenche o reservatório flutuante que está num nível acima do nível do mar, que pode armazenar aproximadamente 8.000 m<sup>3</sup> de água. Este potencial hidráulico é utilizado para a produção de energia através de hidroturbinas Kaplan especialmente projetadas.

### **3.4.2 Controle do dispositivo**

A estratégia de regulação da Wave Dragon compreende três passos. Através de um avançado sistema pneumático, é possível ajustar o nível de flutuação. Toda a estrutura principal da Wave Dragon pode ser suspensa ou abaixada, e desta forma a altura da estrutura pode maximizar a saída de energia da Wave Dragon nas condições do mar em qualquer situação. Este ajuste do nível é feito de maneira contínua. A escala de tempo usada para fazer esta operação corresponde a aproximadamente 250 períodos de onda.

A seguir, o '*work span*' para as turbinas precisa ser definido. O '*work span*' é definido como a variação aceitável do nível de água no reservatório. Na medida em que o nível de água atinge o nível máximo do '*work span*' em questão, todas as turbinas são ligadas. E correspondentemente, quando o nível de água atinge o nível mínimo do '*work span*' em questão todas as turbinas são desligadas.

O '*work span*' da Wave Dragon varia entre 0,5 e 4 metros.

O terceiro passo consiste em controlar a velocidade da turbina de tal maneira que a máxima eficiência seja atingida pela carga de pressão presente.

O controle é feito remotamente através de controladores lógicos programáveis – PLC – e inversores de frequência, utilizando de um sistema SCADA, como evidenciado na figura 3.14:

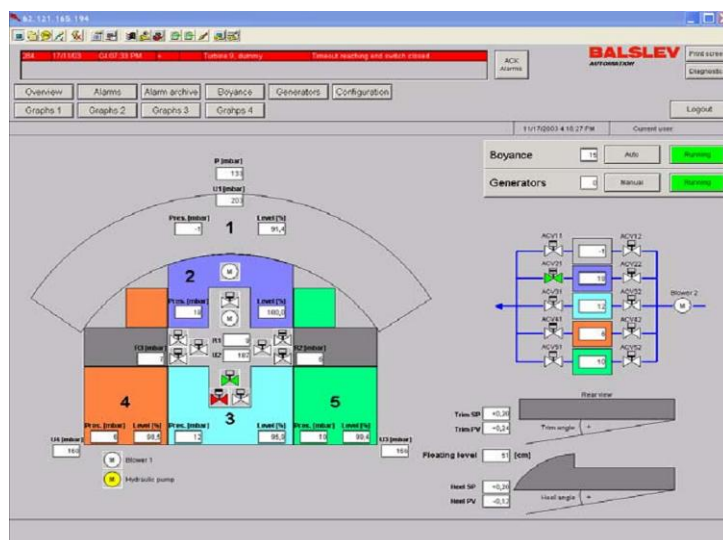


Figura 3.14: Tela de software de controle da Wave Dragon

Fonte: Wave Dragon, 2009.

### 3.4.3 Turbinas

De maneira a maximizar a extração de energia através da Wave Dragon, o dispositivo é equipado com várias pequenas turbinas ao invés de uma grande turbina. Desta forma, é possível, por exemplo, ativar apenas uma parte da potência instalada em condições do mar produzindo pequenas quantidades de água que podem galgar o dispositivo. Adicionalmente, esta construção permite que uma única turbina pequena seja ligada ou desligada dependendo da quantidade real de água vindo por uma única onda.

Estudos realizados por Knapp et. Al (2001), citado por Frigaard et. Al (2004), mostraram que levando em conta a necessidade de um conceito de turbina com requerimentos mínimos de manutenção, alta eficiência, custos de instalações específicos baixos e uma entrega de energia relativamente uniforme, a configuração de turbinas com 16 turbinas on-off de velocidade variável, tipo Kaplan, era a solução ótima para a Wave Dragon.

As turbinas possuem uma eficiência em condições nominais entre 89 e 92%, girando a 250 rotações por minuto.



Figura 3.15: Conjunto de turbinas Kaplan de um protótipo do Wave Dragon

Fonte: Wave Dragon, 2009.

#### 3.4.4 Localização e capacidade de captura de energia do dispositivo

Segundo a empresa que domina a tecnologia, o Wave Dragon foi projetado para operar afastado da costa em profundidades maiores que 30 m, para produzir entre 4 e 11 MW.

Em um clima de onda de 48 kW/m, a empresa projeta que os refletores podem chegar até 190 m de comprimento, o dispositivo ter uma altura de 19 m com reservatório de até 14.000 m<sup>3</sup>, produzindo 35 GWh/ano por unidade.

Assim como outros dispositivos *offshore*, a Wave Dragon também no futuro poderá constituir fazendas, agrupando vários dispositivos que compartilharão um único cabo submarino de transmissão. Na figura 3.16, temos uma fazenda composta por sete unidades da Wave Dragon, o que corresponderia a uma potência instalada entre 50-80 MW, ocupando uma área de cerca de 3,2 km<sup>2</sup>.



Figura 3.16: Fazenda Wave Dragon composta por sete unidades

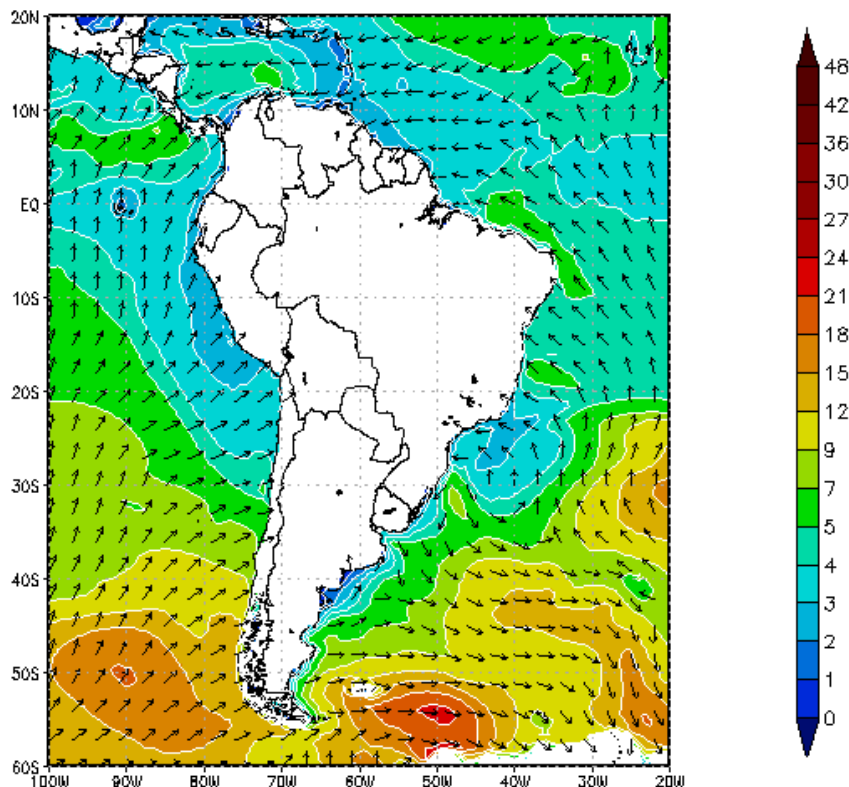
Fonte: Wave Dragon, 2009.

## CAPÍTULO 4 – PROPOSTAS DO AUTOR

É realizada uma análise através de diversas imagens de satélite obtidas através do site do Centro de Oceanografia e Meteorologia da Marinha Americana – FNMOOC. A título de exemplificação, apenas a previsão de um dia do ano é analisada, mas como visto anteriormente a característica dos oceanos é de natureza sazonal.

As imagens obtidas são referentes a todo continente sul-americano, correspondendo à previsão do dia de 30 de agosto de 2009. Levam-se em conta as duas variáveis que determinam a potência das ondas: altura significativa de onda e período de onda.

WW3\_GLOBAL Wave Height [ft] and Direction for 27AUG2009 12Z  
Valid 30AUG2009 12Z Forecast Hour 72



GRADS: COLA/IGES

2009-08-27-17:31

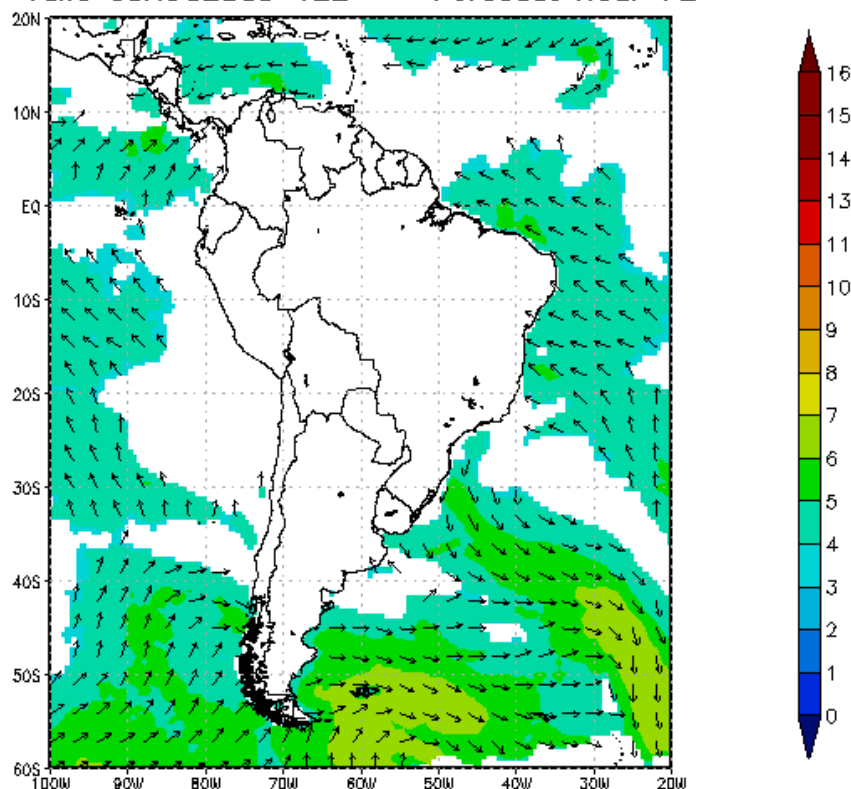
Figura 4.1: Mapa obtido através de satélite com indicação da altura significativa de onda para a América do Sul

Fonte: FNMOOC, 2009.



Nota-se uma maior altura das ondas na Região Nordeste, especialmente na região que engloba o litoral da Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará, bem como no litoral do Rio de Janeiro e na região Sul.

WW3\_GLOBAL Sea Period [sec] and Direction for 27AUG2009 12Z  
Valid 30AUG2009 12Z Forecast Hour 72



GRADS: COLA/IGES

2009-08-27-17:31

Figura 4.2: Mapa obtido através de satélite com indicação dos períodos de ondas geradas pelo vento para a América do Sul

Fonte: FNMOC, 2009.

Verifica-se que os maiores períodos de onda são encontrados apenas em dois pontos do Brasil: no litoral do Ceará e na região Sul do país. O litoral do Rio de Janeiro, apesar de não aparecer na imagem escolhida, também possui bons níveis de período de onda.

Visto que a potência das ondas é função do quadrado de sua altura e proporcional ao período, a análise das imagens permite afirmar que os estados do Ceará, Rio de Janeiro, e a região Sul do Brasil são os pontos em que a geração de energia elétrica através das ondas do mar pode ter um maior desenvolvimento no país, já que as características dos oceanos nesta região são favoráveis.

Além disto, acordos de cooperação com países do MERCOSUL, que tem condições mais propícias ainda, como o caso do Chile e da Argentina, também pode ser uma boa alternativa para a diversificação da matriz energética brasileira, utilizando de uma forma de energia limpa e abundante.

A integração de usinas de energia das ondas com fazendas eólicas também é uma vantagem que pode ser aproveitada, já que nas regiões que foram analisadas anteriormente também se tem uma grande possibilidade de aproveitamento de energia eólica, como mostra o mapa da figura 4.3:

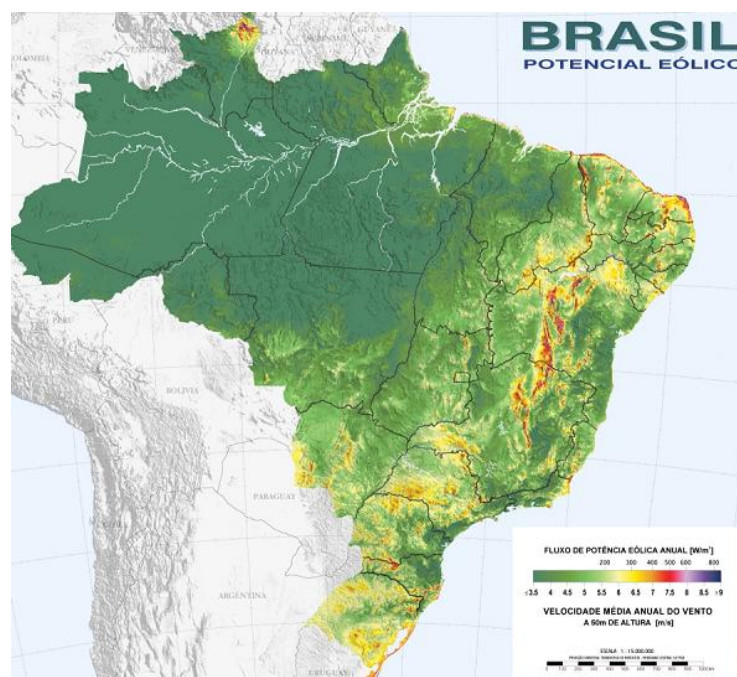


Figura 4.3: Mapa do potencial eólico brasileiro

Fonte: CRESESB, 2009.

Quanto às tecnologias a serem utilizadas, um estudo mais específico deve ser realizado, já que cada lugar pode se adequar a uma tecnologia de forma mais apropriada, dependendo tanto das condições geográficas quanto das condições oceânicas, bem como do custo total da infraestrutura a ser construída para aportar os conversores de energia das ondas, não só quanto ao dispositivo em si, como também no tocante à parte de manutenção e conexão ao sistema elétrico de transmissão.

A tecnologia de conversão de energia das ondas no nosso país pode atender a demanda de pequenas cidades litorâneas ou ilhas, como bem bases militares ou científicas oceânicas.

Investimentos governamentais maiores devem ser feitos nesta área, já que um país com um litoral tão vasto como o Brasil não deve se privar de uma fonte de energia tão limpa e renovável como é a energia das ondas do mar.

## **CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES**

Conclui-se que a tecnologia de conversão de energia das ondas em energia elétrica ainda está num estágio inicial de desenvolvimento, comparando-a a outras fontes de energia renováveis. Apesar dos muitos conceitos existentes, ainda não existe um consenso a qual tecnologia deve-se seguir como já ocorre com a energia eólica.

Os principais desafios deste tipo de energia ainda residem nos altos custos de infraestrutura e manutenção, adequação a situações extremas do oceano e uma maior quantidade de estudos acadêmicos sobre o tema, especialmente no que diz respeito a parte da eficiência dos conversores, controle e regulação dos sistemas e conexão dos conversores aos sistemas elétricos de transmissão.

Porém, num futuro próximo, a tendência é que os conversores de energia das ondas evoluam, já que uma fonte de energia tão vasta, limpa e previsível não pode ser desperdiçada, especialmente neste quadro de mudanças climáticas extremas do planeta.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BADDOUR, Emile. **Energy from waves and tidal currents**. 2004. Relatório proposto ao Instituto de Tecnologia Oceânica do Conselho Nacional de Pesquisas, Canadá.

BÜHRKE, Thomas; WENGENMAYR, Roland. . **Renewable energy: sustainable energy concepts for the future**. Weinheim: Wiley-Vch,2008.

CENTRE FOR RENEWABLE ENERGY SOURCES. **Ocean energy conversion in Europe – Recent advancements and prospects**. [s.l.], 2006.

CRESESB: homepage na internet. Brasil, 2009. Disponível em <[http://www.cresesb.cepel.br/atlas\\_eolico\\_brasil/mapas\\_1a.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/atlas_eolico_brasil/mapas_1a.pdf)>. Acesso em 01 ago. 2009.

CRUZ, Joao. **Ocean wave energy**. Berlim: Springer, 2008.

CRUZ, João M.B.P; SARMENTO, Antonio J.N.A. **Energia das ondas: Introdução aos aspectos tecnológicos, econômicos e ambientais**. Portugal: Instituto do Ambiente, 2004.

EUROPEAN COMISSION RESEARCH. **Wavenet**: Relatório Final do European Thematic Network on Wave Energy. [s.l.], 2003. Disponível em: < [www.wave-energy.net](http://www.wave-energy.net)>. Acesso: em 5 jun. 2009.

FNMOC: homepage na internet. Estados Unidos, 2009. Disponível em < <https://www.fnmoc.navy.mil/public/>>. Acesso em 23 ago. 2009.

FRIGAARD, Peter; KNAPP, Wilfried; KOFOED, Jens Peter. **Wave Dragon – Wave power plant using low head turbines**. 2004. Disponível em: <[www.wavedragon.net](http://www.wavedragon.net)>. Acesso em: 05 jul. 2009.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY IMPLEMENTING AGREEMENT ON OCEAN ENERGY SYSTEMS (IEA-OES). **2008 Annual report**. [s.l.], 2009.

ISLAY LIMPET WAVE POWER. **Publishable report**. 2002. Universidade de Belfast, Reino Unido.

KHAN, Jahangir; BHUYAN, Gouri S.. **Ocean energy: global technology development status**. Relatório preparado pela Powertech Labs para a IEA-OES. Disponível em: <[www.iea-oceans.org](http://www.iea-oceans.org)>. Acesso: em 12 maio 2009.

LETCHER, Trevor M. (Ed.). **Future energy: Improved, Sustainable and Clean Options for Our Planet**. Londres: Elsevier, 2008.

PELAMIS: homepage na internet. Escócia: 2009. Disponível em: < [www.pelamiswave.com](http://www.pelamiswave.com)>. Acesso em: 10 jul. 2009.

ROSA, Aldo V. **Fundamentals of renewable energy processes**. Londres: Elsevier, 2005.

SOONS, E. J. **Analysis of the Wells rotor in oscillating air- & water flows**. 2006. Disponível em: < [www.wave-energy.net/index\\_files/documents/Soons.pdf](http://www.wave-energy.net/index_files/documents/Soons.pdf) >.

SØRENSEN, Bent. **Renewable energy: Its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects**. 3. ed. Londres: Elsevier Science, 2004.

SØRENSEN, Hans Cristian. **Wave Dragon: an offshore wave power plant**. Apresentação. Dinamarca: 2005.

TEASE, W.K.; LEES, J.; HALL, A.. **Advances in oscillating water column air turbine development**. 2008. Disponível em: < [http://www.wavegen.co.uk/research\\_papers.htm](http://www.wavegen.co.uk/research_papers.htm)>. Acesso em: 05 jul. 2009.

TEDD, James. **Testing, analysis and control of Wave Dragon, wave energy converter**. 2007. Tese (Doutorado) – Universidade de Aalborg, Dinamarca. Disponível em: <[www.wavedragon.net](http://www.wavedragon.net)>. Acesso em: 05 jul. 2009.

THORPE, Tom. **A brief review of wave energy**. 1999. Relatório produzido para o Departamento de Comércio e Indústria do Reino Unido, Reino Unido.

TWIDELL, John W.; WEIR, Anthony D.. **Renewable energy resources**. 2. ed. Nova Iorque: Taylor & Francis, 2006.

VINING, Jennifer. **Ocean wave energy conversion**. 2005. Relatório submetido a Dr. Annette Meutze – Universidade de Wisconsin-Madison, Madison, Estados Unidos.

WATERS, Rafael. **Energy from ocean waves: Full Scale Experimental Verification of a Wave Energy Converter**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Acta Universitatis Upsaliensis, Uppsala, Suécia.

WAVE POWER: homepage na internet. Inglaterra: 2009. Disponível em: < [www.en.wikipedia.org/wiki/Wave\\_power](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Wave_power)>. Acesso em: 10 jul. 2009.

WAVE POWER GROUP: homepage na internet. Inglaterra: 2009. Disponível em: < <http://www.mech.ed.ac.uk/research/wavepower>>. Acesso em: 10 jul. 2009.