

ANÁLISE TEÓRICA DA PRODUÇÃO DE UM CONVERSOR DE ENERGIA ONDOMOTRIZ DO TIPO ABSORVEDOR PONTUAL

Pedro Vinícius Fernandes de Andrade – pedro.vfa95@gmail.com

Rafael Luz Espindola – rafael.espindola@ufersa.edu.br

Universidade Federal Rural do Semi-Árido – Campus Caraúbas, Departamento de Engenharia Mecânica

Resumo. A energia das ondas é uma fonte limpa e renovável, com boa previsibilidade e elevada densidade de potência quando comparada com outras fontes renováveis, como a solar e a eólica. O Brasil, diante do seu histórico de utilização de fontes renováveis e do seu extenso litoral, apresenta condições de aproveitar essa fonte. Porém, poucas pesquisas tem sido realizadas nesse campo, tendo o país como foco de estudo. Dessa forma, este trabalho apresenta uma análise teórica de um dispositivo de conversão de onda do tipo absorvedor pontual para a costa do Estado brasileiro do Rio Grande do Norte/RN. Foi utilizada uma análise matemática encontrada na literatura e informações de onda oriundas do projeto de reanálise ERA-Interim para se determinar a potência extraída pelo dispositivo, além da eficiência de conversão. Os resultados encontrados apontam como potência extraída máxima entre os quatro locais selecionados 145,95 kW e eficiência máxima de 19,83%.

Palavras-chave: Energia Ondomotriz, ERA-Interim, Energia Mecânica

1. INTRODUÇÃO

A matriz elétrica global sempre foi predominantemente focada em combustíveis fósseis. Em 2000, os mesmos ocupavam 86,6% dessa matriz. Em 2013, apesar de uma pequena redução, ainda representavam 86,3% (BP, 2014). Por causa da crise do petróleo da década de 70 e pelas descobertas dos efeitos nocivos ao ambiente dos produtos da queima de combustíveis fósseis, vêm sendo pesquisadas novas fontes que supram a necessidade energética humana, mas que sejam menos prejudiciais ao meio ambiente. Assim, a busca por fontes de energia limpas e renováveis se intensificou, tendo as pesquisas avançado em várias áreas, como por exemplo, energia solar, energia eólica, energia da biomassa, energia oceânica, entre outras.

Um bom exemplo de energia renovável é a energia das ondas nos oceanos, onde o recurso total atribuído segundo Thorpe (2014) é de 2 TW, e segundo a Wavemill Energy Corp. (2011) existe de 15 a 20 vezes mais energia disponível por metro quadrado do que solar ou eólica.

O Brasil é um país com um litoral gigantesco, em torno de 7.300 km de extensão (Tessler e Goya, 2005). Por causa disso, muito se pensa em utilizar sua costa para fins de geração de energia provinda de fontes alternativas. Porém, até o momento, só uma tentativa de utilização desse tipo de tecnologia foi realizada no país. Um protótipo para pesquisas da COPPE/UFRJ instalado no porto do Pecém, no Ceará (Ricarte *et al.*, 2005).

Os principais motivos para o pouco desenvolvimento da energia ondomotriz no país são a falta de investimento e pesquisa, e também, o fato do litoral brasileiro ter ondas relativamente pequenas, comparadas as da Europa, onde a energia transportada acaba sendo maior. Isso acaba sendo uma das razões pelo qual o investimento é tão baixo, uma vez que os investidores reconhecem que as ondas não vão render uma potência significativa, principalmente quando comparado às energias que possuem pesquisas mais avançadas (Gonçalves *et al.* 2008)

Apesar disso tudo, o Brasil tem um litoral com ondas constantes. Segundo Tessler e Goya (2005), as ondas do sul e sudeste tem um período entre 10 e 16 segundos e altura de 1 a 4 metros, enquanto que as do norte e nordeste têm entre 5 e 10 segundos e 1 a 2 metros nas mesmas características. Mesmo sendo relativamente pequenas, as ondas brasileiras são constantes e predominantemente unidirecionais, diferentes das ferozes ondas europeias. Isso pode ser útil devido a um menor custo de manutenção do dispositivo que esteja convertendo a energia, já que haverá diminuição do desgaste. Além disso, por elas serem constantes, podem acabar rendendo potências aproximadas se forem bem aproveitadas.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é realizar uma análise teórica da energia que poderia ser convertida utilizando-se um dispositivo de conversão ondomotriz (WEC – wave energy converter) do tipo absorvedor pontual, instalado na costa do Brasil, mais especificadamente no litoral do Estado do Rio Grande do Norte.

2. DISPOSITIVOS DE CONVERSÃO ONDOMOTRIZ

O princípio da energia ondomotriz é aproveitar a energia cinética ou potencial proveniente nas ondas e, com um conversor adequado, transformá-la em energia elétrica. Existem mais de 1500 patentes registradas de conversores da energia das ondas (WEC) segundo Costa (2004), e são classificados de duas formas: em relação ao local de instalação, e em relação à característica de conversão.

2.1 Classificação em relação à localização

Em relação ao local de instalação, segundo Cruz e Sarmiento (2004), se dividem em costeiros, próximos da costa ou afastados da costa.

a) Dispositivos costeiros

Os dispositivos costeiros (*onshore* ou *shoreline*, em inglês) são fixos nas orlas e apresentam vantagens em relação à instalação e à manutenção, pois não exige que trabalhadores passem dias em alto mar para a construção do mesmo. Além disso, o desgaste em relação à erosão marítima é relativamente menor, comparado aos dispositivos mais afastados da costa, que são constantemente erodidos com ventos fortes, ondas maiores e uma concentração de sal desgastante. Porém, por estarem em locais onde a água tem baixa profundidade, terão baixo rendimento, pois as ondas que carregam uma maior quantidade de energia se encontram em alto mar.

b) Dispositivos próximos da costa

Os dispositivos próximos da costa (*nearshore*), instalados em profundidades de cerca de 20 metros, são situados próximos a molhes e quebra-mares. Estes, por sua vez, já necessitam de gastos adicionais com especialistas, mesmo que funcionem instalados na distância da orla onde são situados quebra-mares. A erosão é maior que a presente na costa e sua manutenção é dificultada pela distância e o difícil acesso.

c) Dispositivos afastados da costa

Os afastados da costa (*offshore*) exploram ondas potentes e são instalados em locais com 40 a 50 metros de profundidade. Estes são os mais caros entre os 3 tipos, pois a instalação e manutenção do mesmo é difícil. Além disso, as ondas que serão convertidas por esses aparelhos possuem mais energia e o desgaste com o vento e a salinidade vai fazer o equipamento precisar de um reforço robusto e resistente. Tudo isso aumenta o preço desses dispositivos, tendo como sua única vantagem, trabalhar com ondas que carregam bem mais energia e são bem mais potentes que as ondas que se aproximam da costa.

2.2 Classificação em relação à característica de conversão

Já em relação à característica de conversão, segundo Lagoun *et al.* (2010), nós podemos ter os seguintes dispositivos: atenuadores, absorvedores pontuais, pêndulo invertido, coluna de água oscilante e galgamento.

a) Atenuador

O atenuador (Fig. 1a) é um dispositivo que flutua sobre as ondas e que trabalha paralelo à direção delas. Movimentos ao longo do seu comprimento podem ser selecionados e convertidos em energia. (Lagoun *et al.*, 2010). O projeto Pelamis, em Portugal, é um exemplo atual em funcionamento desse tipo de conversor, e é a primeira estação comercial de energia ondomotriz do mundo. Ele é um grande dispositivo em formato de cobra com vários cilindros articulados entre si. Esses cilindros tem um diâmetro de 3,5 metros e são feitos de 700 toneladas de aço-carbono. O movimento nas articulações entre os cilindros faz com que os êmbolos presentes sejam comprimidos e tracionados, estes êmbolos irão pressurizar um fluido que irá passar por um motor hidráulico presente em um dos cilindros, o motor acoplado a um gerador, produzindo assim a eletricidade. O dispositivo já está funcionando e tem uma potência implantada de 750 kW (cada uma das 4 junções tem 250 kW) e uma produção total anual de $2,2 \times 10^6$ kWh.

b) Absorvedor pontual

Também chamados de boias (Fig. 1b), são dispositivos pequenos quando comparados aos demais conversores. Apresentam geralmente formato cilíndrico, o que pode variar de acordo com o fabricante. Podem ser fixos ao fundo do mar, ou, se estiverem em alta profundidade, são ancorados por meio de cabos. Apresentam um movimento oscilatório de subida e descida, e captam energia de todas as direções por terem diâmetro consideravelmente menor que o comprimento de onda que passará por eles. Dois exemplos de projetos desse tipo de conversor são o CETO e o SEAREV. O CETO é um pequeno dispositivo esférico flutuante submerso, sendo movimentado pela diferença de pressão que a passagem da onda causa. Quando a crista da onda está acima do dispositivo, a pressão é alta e faz o dispositivo ser empurrado para baixo, já quando o vale da onda está acima do dispositivo, a pressão em cima é menor fazendo com que ele suba. Já o SEAREV, possui módulos flutuantes na superfície do mar que irão oscilar a medida que a onda passa por ele, realizando a conversão de energia.

Existem inúmeras vantagens e desvantagens, na utilização do conversor submerso ou na superfície. Estar submerso pode impedir, em parte, uma corrosão acentuada, mas exigirá um maior cuidado com a elevação da pressão a medida que a profundidade aumenta, e ainda têm-se uma maior dificuldade na manutenção. Já quando na superfície, temos uma maior facilidade de manutenção, mas um maior prejuízo visual da paisagem do local (Rodrigues, 2008).

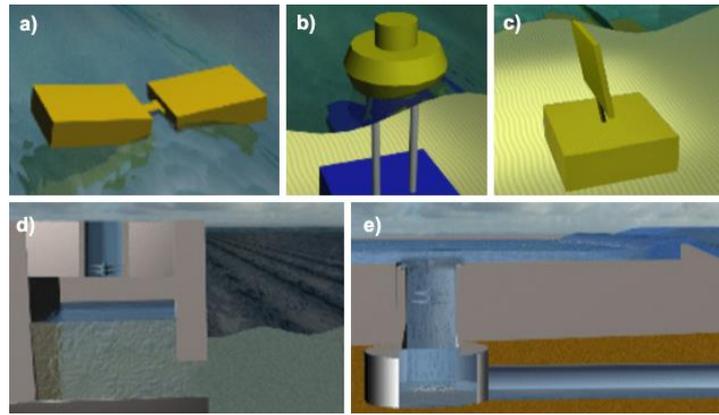


Figura 1 - Tipos de WEC: a) atenuador; b) absorvedor pontual; c) pêndulo invertido; d) coluna de água oscilante; e) galgeamento. Fonte: Adaptado de Lagoun *et al.* (2010).

c) Pêndulo invertido

Esse tipo de dispositivo (Fig. 1c) pode ser instalado tanto na costa, onde as ondas irão empurrá-lo transversalmente fazendo com que este mova um êmbolo hidráulico para produzir energia através de turbinas, ou próxima à costa, aonde ele irá pressionar um embolo hidráulico de acordo com a diferença de pressão que ondas causam no fundo do mar, sempre fazendo um movimento angular que irá propulsionar a conversão de energia. O dispositivo WEC da empresa OYSTER é um exemplo de pêndulo invertido que é posicionado próximo à costa, em uma profundidade de aproximadamente 10 metros. Ele é uma grande placa que será empurrada pelas ondas, e esse movimento irá empurrar um êmbolo que pressurizará um líquido em uma turbina, essa turbina por sua vez irá gerar energia elétrica.

d) Coluna de água oscilante (OWC)

É um aparelho parcialmente submerso (Fig. 1d), onde existe uma abertura para que a coluna de água seja empurrada pelas ondas. Quando essa coluna sobe, o ar dentro da câmara é forçado a sair por uma abertura na parte superior, onde está instalada uma turbina. Esse ar pressurizado é ejetado da câmara, fazendo a turbina girar e produzir energia mecânica. Quando a coluna de água baixa após a passagem da onda, a diferença de pressão existente irá fazer com que o ar que foi expulso volte para a câmara e possa ser utilizado pela turbina novamente para extração de energia.

Apesar do princípio desse dispositivo funcionar também longe da costa, a maioria dos projetos que utilizam essa ideia, incluindo os já operacionais, preferem a costa, onde a conversão pode ser realizada sem os problemas e dificuldades do alto mar. No entanto, a instalação na costa causa um impacto ambiental de grande proporção, já que será preciso instalar uma fundação em uma rocha na orla. A poluição visual e sonora que este dispositivo provoca também é um problema considerável, principalmente quando instalado na costa, onde pode prejudicar a paisagem da região.

Um exemplo de dispositivo desse tipo de dispositivo em alto mar é o OCEANLINX, instalado na Austrália. Já na costa, tem-se como exemplos os projetos LIMPET (Land Installed Marine Power Energy Transmitter - Transformador de Energia Marinha Instalado em Terra-Firme) no Reino Unido, e o PICO em Portugal, que obteve uma produção anual de 1 MWh em testes realizados. (Lagoun *et al.*, 2010).

e) Galgeamento

Nesse dispositivo (Fig. 1e), as ondas se movem em direção a uma rampa inclinada, galgando-a devido à energia cinética, e se acumulando em um reservatório. Quando quantidade suficiente de água é acumulada, é liberada a vazão dessa água de volta para o oceano. A água escoia pela ação da gravidade e passa por turbinas. Assim como numa hidrelétrica, a energia potencial da água acumulada será transformada em energia mecânica pelas turbinas. A borda com angulação para acumulo de água deve estar sempre direcionada de encontro ao movimento das ondas.

3. PRINCÍPIO DE CONVERSÃO DE UM ABSORVEDOR PONTUAL

De acordo com McCormick (1981) qualquer técnica capaz de gerar ondas, também pode ser utilizada para extrair energia delas. Assim, se imaginarmos um corpo flutuante que apresenta dois tipos de movimento, linear na direção z e angular θ , como o mostrado na Fig. 2, teremos uma situação onde o dispositivo é capaz de gerar ondas e, de acordo com a proposição de McCormick, de extrair energia.

Para o caso de um dispositivo utilizado para extração da energia das ondas, os dois movimentos mostrados na Fig. 2 são gerados pela passagem de uma onda monocromática, e são função do comprimento L do flutuador normal a frente da onda de comprimento λ . Caso $L = N\lambda$, com N igual a um número inteiro e positivo, o flutuador apresenta forças na direção z que se anulam. Assim, não há movimento vertical (*heave*), porém, um binário é produzido, e como consequência o flutuador apresenta movimento angular (*pitch*). Já na situação em que $L = N\lambda/2$, com N igual a um número ímpar, haverá uma força resultante na direção z e apenas o movimento de *heave* ocorrerá.

Neste trabalho optou-se por analisar um flutuador apenas com movimento de *heave*, ou seja, o flutuador apresenta uma restrição com relação ao seu movimento de *pitch*.

As condições descritas podem ser aproximadas com as de um *swell*, ondas de longo período que tem origem na região de tempestade e viajam longas distâncias assimilando ondas menores, produzindo assim, ondas aproximadamente monocromáticas.

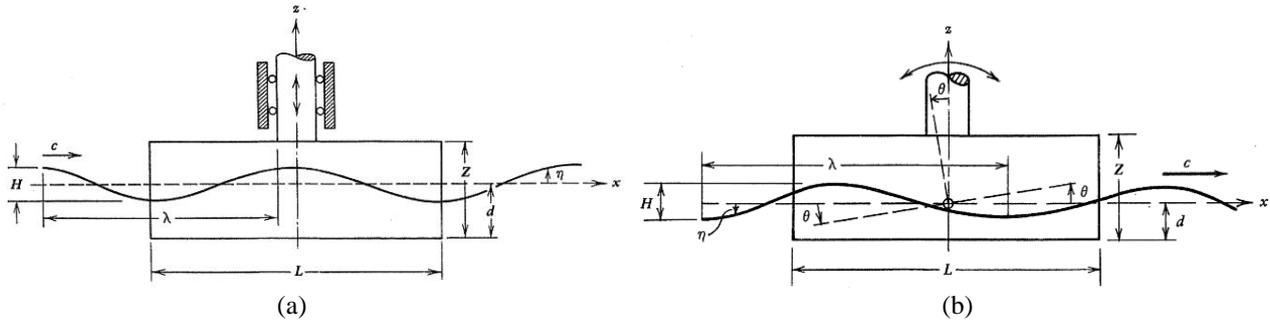


Figura 2 - Movimentos induzidos por uma onda monocromática em um dispositivo flutuante: a) *heave* puro; b) *pitch* puro. Fonte: Adaptado de McCormick (1981).

Um flutuador pode apresentar tanto um período natural de *heave* quanto um de *pitch*. De acordo com McCormick (1973) e Bhattacharyya (1978), a frequência natural de *heave* de um corpo flutuante pode ser determinada a partir da Eq. (1):

$$f_z = \frac{1}{T_z} = \frac{\omega_z}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho g A_{wp}}{m + m_w}} \quad (1)$$

onde T_z é o período natural de *heave*, ω_z é a frequência circular natural de *heave*, ρ é a massa específica da água do mar (aproximadamente 1030 kg/m^3), A_{wp} é a área no plano da água do flutuador, m é a massa do sistema de flutuação e m_w é a massa adicional, isto é, a massa de água excitada pelo movimento de *heave* do flutuador. O valor de m_w varia com o formato geométrico do flutuador. Para o caso de um cilindro na vertical, ela pode ser calculada de acordo com a Eq. (2).

$$m_w = \frac{\rho D^3}{6} \quad (2)$$

Na fase de projeto de um conversor de ondas flutuante, deve-se buscar uma frequência natural para o flutuador, que ressoe com a onda de maior energia.

A força induzida pela onda no flutuador durante a sua passagem foi descrita por McCormick (1973) utilizando-se da teoria de navios para formulá-la. Para um flutuador cilindro a força induzida pode ser determinada através da Eq. (3).

$$F_z = F_0 \cos(\omega t) = \frac{\rho g H \pi R^2}{4} \left(1 - \frac{\pi^2 R^2}{2\lambda^2} \right) \left(e^{-2\pi/\lambda} + 1 \right) \cos(\omega t) \quad (3)$$

O movimento de *heave*, por sua vez, pode ser determinado pela Eq. (4). Assim, como a velocidade (Eq. (5)) e a aceleração (Eq. (6)) do flutuador podem ser encontradas através da derivação da equação do movimento.

$$z = Z_0 \cos(\omega t + \gamma - \sigma_z) = \frac{\left(\frac{F_0}{\rho g A_{wp}} \right) \cos(\omega t + \gamma - \sigma_z)}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_z^2} \right)^2 + \left(\frac{2\Delta_z \omega}{\omega_z} \right)^2}} \quad (4)$$

onde γ é o ângulo de fase que depende das componentes da força da onda e σ é o ângulo de fase que depende do fator de amortecimento Δ_z .

$$v_z = \frac{dz}{dt} = -\omega Z_0 \text{sen}(\omega t + \gamma - \sigma_z) \quad (5)$$

$$a_z = \frac{d^2 z}{dt^2} = -\omega^2 Z_0 \cos(\omega t + \gamma - \sigma_z) = -\omega^2 z \quad (6)$$

A amplitude do movimento, como pode ser visto na Eq. (4), assim como a velocidade e a aceleração (Eq. (5) e Eq. (6)), dependem do amortecimento do sistema. Assim, no projeto de um conversor, um dos objetivos é minimizar o amortecimento para se obter a maior resposta.

A partir das equações de movimento, velocidade e aceleração, as energia cinética e potencial do sistema flutuante podem ser estabelecidas. Considerando, para a energia cinética, que a massa do sistema é a massa do flutuador mais a massa adicional, seu valor pode ser obtido pela Eq. (7).

$$E_{cz} = \frac{1}{2} (m + m_w) \omega^2 Z_0^2 \sin^2(\omega t + \gamma - \sigma_z) \quad (7)$$

Já a energia potencial do sistema flutuante pode ser determinada pela Eq. (8).

$$E_{cz} = \frac{1}{2} \rho g A_{wp} Z_0^2 \cos^2(\omega t + \gamma - \sigma_z) \quad (8)$$

A potência mecânica de um corpo simétrico que apresenta movimento de *heave* puro é determinada pelo produto entre a força induzida pela onda F_z (Eq. (3)) e a velocidade de *heave* (Eq. (5)). Assim, a potência mecânica de um corpo flutuante pode ser calculada pela Eq. (9). Enquanto que a potência média pode ser determinada através da Eq. (10), considerando que $\sigma_z = 90^\circ$ como resultado da ressonância e $\gamma = 0$ devido à simetria do corpo em relação aos planos x - z e y - z .

$$P_z = F_z \frac{dz}{dt} \quad (9)$$

$$\bar{P}_z = \frac{1}{T} \int_0^T P_z dt = \frac{F_0 \omega Z_0}{2} \quad (10)$$

A eficiência de extração de energia do flutuador (Eq. (11)) pode ser determinada entre a razão da energia total do flutuador, pela energia transportada pela onda.

$$\varepsilon_z = \frac{E_z}{E} = \frac{E_{cz} + E_{pz}}{E} \quad (11)$$

onde E é a energia transportada pela onda monocromática, e pode ser calculada pela Eq. (12).

$$E = \frac{\rho g H^2 \lambda D}{8} \quad (12)$$

4. METODOLOGIA

O primeiro passo para se realizar a análise teórica de conversão de um WEC do tipo absorvedor pontual foi a determinação das características de onda do local onde se realizará a análise. Existem diversas maneiras de se obter essas características, seja por medição direta através de uma boia, indireta com a utilização de sensoriamento remoto por satélites ou radares, ou ainda utilizando-se os resultados de modelagens matemáticas para o clima de ondas. Neste trabalho optou-se pela utilização de dados de reanálise do projeto ERA-Interim.

Em seguida, definiu-se as características geométricas do WEC. Esses parâmetros, como apresentado anteriormente no tópico 3 são: diâmetro, altura total, altura afundada, massa, massa adicional e frequência natural do flutuador. A definição destas características pode ser feita através de uma otimização dos parâmetros baseado nas características de onda local, ou baseado-se em WEC já existentes. Aqui optou-se pela utilização de um WEC já existente como referência, buscando-se as informações junto do desenvolvedor.

Com as características tanto da onda quanto do WEC determinou-se a força que a onda induz no WEC através da Eq. (3), e a amplitude máxima que essa força produz através da Eq. (4). Determinados esses dois parâmetros, tanto a potência média convertida (Eq. (10)), quanto a energia mecânica adquirida pelo WEC (Eq. (8)) foram calculadas. Determinou-se ainda a eficiência mecânica da conversão a partir (Eq. (11)), uma vez que a energia transportada pela onda pôde ser conhecida a partir da Eq. (12).

A Fig. 3 apresenta um fluxograma da metodologia empregada neste trabalho.

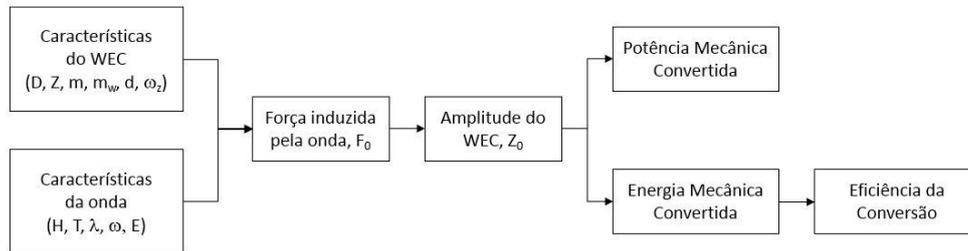


Figura 3 - Fluxograma da metodologia

5. RESULTADOS

Para encontrar as principais características de uma onda foram utilizados dados de reanálise do projeto ERA-Interim, desenvolvido pela ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*). O período de cobertura do projeto se inicia em 1979 e continua até o presente momento. Os produtos dessa reanálise são dados gradeados que incluem uma larga variedade de parâmetros de superfície com resolução de 3h, que descrevem tanto o clima como ondas oceânicas e condições da superfície terrestre. Incluem também parâmetros aéreos com resolução de 6h, que cobrem a troposfera e a atmosfera (Dee *et al.*, 2011). O modelo de ondas utilizado para produzir alguns dos dados da reanálise do ERA-Interim é baseado no modelo espectral de onda de 3ª geração WAM, e inclui uma série de melhorias tanto nos aspectos físicos, quanto numéricos, em relação ao projeto anterior, o ERA-40. Dentre as melhorias apresentadas, as mais significativas para aplicações climáticas são a introdução de um solução para tratar efeitos batimétricos não resolvidos e a reformulação do termo de fonte de dissipação (Dee *et al.*, 2011). O modelo apresenta uma resolução espacial de $1^\circ \times 1^\circ$, o que equivale a uma distância horizontal máxima de 110 km.

Para o estudo realizado neste trabalho, foram retiradas informações de ondas próximas ao litoral do Nordeste do Brasil, mais especificamente do litoral do Rio Grande do Norte, como mostra a Tab. 1. Foram selecionadas quatro localidades para cobrir quase todo o litoral do RN, com suas coordenadas mostradas na Tab. 1. Com os valores de altura, H, e período da onda, T, estimou-se os parâmetros de comprimento da onda, λ , frequência natural, ω , e energia transportada pela onda, E. Os valores obtidos para esses parâmetros também se encontram na Tab. 1.

Tabela 1 - Altura e período de onda em pontos selecionados do litoral do RN.

Pontos	Coordenadas	H (m)	T (s)	λ (m)	ω (rad/s)	E (kN.m)
1	4,50° S; 37,00° O	1,64	7,36	84,58	0,85	2.068,63
2	4,75° S; 36,25° O	1,46	6,84	73,05	0,92	1.415,98
3	5,25° S; 35,25° O	1,63	7,54	88,76	0,83	2.144,65
4	5,75° S; 34,50° O	1,79	8,02	100,42	0,78	2.926,12

Dos tipos de WEC existentes na literatura, o absorvedor pontual se mostra o mais versátil por poder ser utilizado à qualquer distância em relação à costa, flutuando ou submerso, além de não ser dependente da direção da onda, caso apresente um desenho simétrico em relação ao eixo vertical. Sendo assim, ele foi escolhido para ser o objeto de análise nesse trabalho.

Buscou-se então, dentre os WEC absorvedores pontuais algum que pudesse servir de modelo para a determinação dos parâmetros geométricos utilizados na análise. Optou-se por utilizar com referência o WEC Power Buoy PB40 (Ocean Power Technologies, 2015) por ele já estar em um estado mais avançado de projeto. Na ocasião do estudo ele estava em fase de testes. De acordo com o desenvolvedor desse WEC ele apresenta as seguintes características $m = 114.220$ kg, $Z = 33,8$ m e $D = 7,2$ m. Assim, utilizando-se essas informações calculou-se os parâmetros de massa adicional, altura submersa e frequência natural do flutuador. A Tab. 2 sintetiza os dados referentes as flutuador.

Tabela 2 - Informações geométricas do WEC.

D (m)	Z (m)	m (kg)	m_w (kg)	d (m)	ω_z (rad/s)
7,2	33,8	114.220	64.074,24	2,72	1,52

Seguindo a metodologia apresentada, obteve-se para cada local selecionado a força induzida pela onda, a amplitude do movimento de *heave*, a energia mecânica total, a potência média e a eficiência do flutuador, utilizando-se como valor de amortecimento 0,1. A Tab. 3 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 3 - Resultados obtidos utilizando-se um fator de amortecimento igual a 0.1.

Ponto	F_0 (kN)	Z_0 (m)	ω (rad/s)	E_z (kN.m)	P_z (kW)	ε (%)
1	303,60	1,06	0,85	306,60	137,93	14,82
2	265,67	1,00	0,92	280,92	122,00	19,83
3	303,32	1,04	0,83	290,52	131,66	13,54
4	337,10	1,10	0,78	318,27	145,95	10,87

A variação da força induzida pela onda e a amplitude do movimento de *heave* para o ponto de melhor eficiência de conversão são apresentadas na Fig. 4.

Foi discutido anteriormente, que durante a fase de projeto, normalmente busca-se a minimização do fator de amortecimento a fim de maximizar a amplitude do movimento, e conseqüentemente a maximização da potência extraída da onda. A Fig. 5 apresenta os resultados da amplitude e da potência média do ponto 1 levando-se em consideração a variação do fator de amortecimento. Percebe-se claramente através dos resultados expostos nos gráficos que a maximização realmente acontece com a minimização do fator de amortecimento.

Apesar de apenas a variação da amplitude e da potência média para o ponto 1 ter sido apresentada, resultados semelhantes são obtidos com esta mesma análise para os demais pontos selecionados.

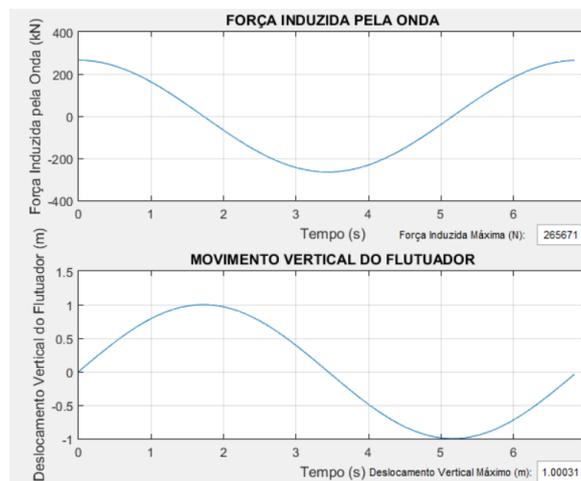


Figura 4 - Variação da força induzida pela onda e da amplitude do movimento para o ponto 2.

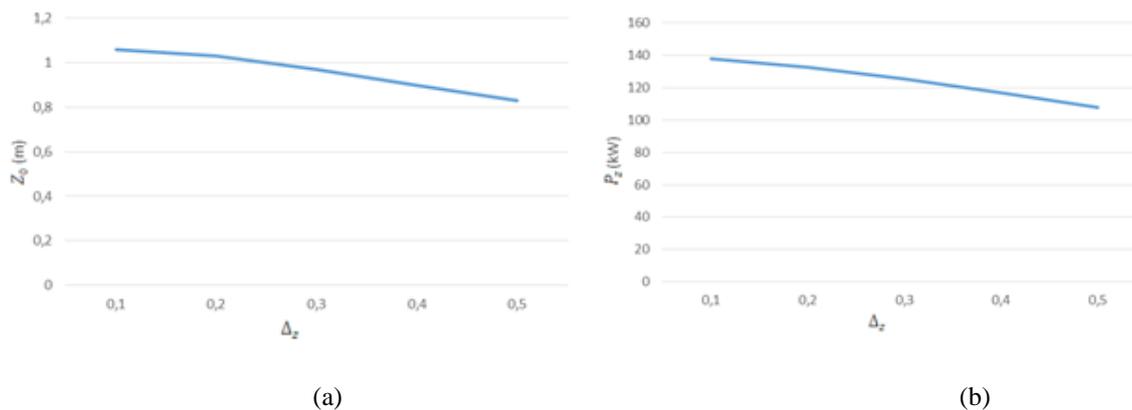


Figura 5 – Amplitude e potência média em função do fator de amortecimento para o ponto 1.

6. CONCLUSÕES

Pode-se concluir que o ponto em que a frequência natural da onda (ω) mais se aproxima da frequência natural de *heave* (ω_z) do WEC em questão é também o ponto que possui a maior eficiência de extração mecânica. Isso acontece

devido à proximidade de uma ressonância nessa situação. Esse fato faz com que um maior aproveitamento do conversor seja observado.

Observa-se também que não necessariamente o ponto selecionado com maior energia disponível na onda (ponto 4), será o que o dispositivo apresenta melhor eficiência (ponto 2). Os corpos estarem em ressonância ou não acaba tendo um impacto maior na eficiência do conversor. Assim, não se pode decidir sobre o melhor local para instalação de um conversor de características geométricas definidas, unicamente olhando-se a energia disponível na onda. Ainda assim, os quatro pontos apresentam potenciais parecidos variando de 122 kW a 145,95 kW, mostrando a constância do mar no litoral do RN. Apesar das ondas serem pequenas, o mar ser constante ajuda bastante na conversão da energia.

Uma redução do fator de amortecimento, significa uma aumento tanto da amplitude quanto da potência média do conversor. Esse efeito também é observado em outros fatores como eficiência e energia retirada pelo conversor, que são funções derivadas desses fatores.

Agradecimentos

Os autores agradecem os apoios financeiros concedidos pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

REFERÊNCIAS

- Bhattacharyya, R., 1978. Dynamics of Marine Vehicles, New-York: Wiley-Interscience.
- BP, 2014. BP Statistical Review of World Energy, Londres: BP. Disponível em: http://www.bp.com/content/dam/bp-country/de_de/PDFs/brochures/BP-statistical-review-of-world-energy-2014-full-report.pdf. Acesso em: 10 Out. 2014.
- Costa, P., 2004. Energia das ondas do mar para geração de eletricidade, Dissertação de Mestrado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro.
- Cruz, J. M., Sarmiento, A. J., 2004. Energia das ondas, introdução aos aspectos tecnológicos, econômicos e ambientais, Portugal: Instituto do Ambiente.
- Dee, et al., 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 137, n. 656, Part A, pp. 553-597.
- Gonçalves, W. M., Feijó, F. T., Abdallah, P. R., 2008. Energia de ondas: aspectos tecnológicos e econômicos e perspectivas de aproveitamento no Brasil, III Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica – SEMENG'08, Rio Grande.
- Lagoun, M. S. et al., 2010. Ocean Wave Converters: State of the Art and Current Status. 2010 IEEE International Energy Conference, Manama, Bahrain. pp.636-641.
- McCormick, M. E., 1973. Ocean Engineering Wave Mechanics, New York: Wiley-Interscience.
- McCormick, M. E., 1981. Ocean Wave Energy Conversion. New York: Dover Publications.
- Ocean Power Technologies, 2015. PB40. Disponível em: <http://www.oceanpowertechologies.com/pb40>. Acesso em: 24 Jan. 2015.
- Ricarte, E. et al., 2005. Princípios para Implantação da Usina Piloto de Energia das Ondas e suas Aplicações, VIII Congresso Brasileiro de Defesa do Meio Ambiente, Rio de Janeiro.
- Rodrigues, L., 2008. Wave power conversion systems for electrical energy production, International Conference on Renewable Energies and Power Quality – ICREPQ'08.
- Tessler, M., Goya, S., 2005. Processos Costeiros Condicionantes do Litoral Brasileiro, Revista do Departamento de Geografia, vol. 17, pp 11-23
- Thorpe, T. W., 1999. A brief review of wave energy, Technical report, Energy Technology Support Unit (ETSU), Reino Unido.
- Wavemill Energy Corp., 2011. Electric Power from Ocean Waves. Disponível em: <http://www.wavemill.com>. Acesso em: 10 Out. 2014.

THEORETICAL ANALYSIS OF ENERGY CONVERSION BY A POINT ABSORBER WEC

Abstract. *Wave energy is a clean and renewable source, with good predictability and high power density when compared to other renewable sources like solar and wind. Brazil is in a position to take advantage of this source for his history in use of renewable sources and for his extensive coastline. However, only few studies are conducted in the country in this area. Thus, this paper presents a theoretical analysis of a point absorber wave conversion device for the coast of Rio Grande do Norte/RN in Brazil. Was used a mathematical analysis found in the literature and wave information from ERA -Interim reanalysis project to determine the power drawn by the device, besides the conversion efficiency. The results found point as maximum power extracted from the four selected places 145.95 kW and maximum efficiency of 19.83 %.*

Key words: *Wave Energy, ERA-Interim, Mechanical Energy*