

Energia de ondas: aspectos tecnológicos e econômicos e perspectivas de aproveitamento no Brasil

Willian Mattes Gonçalves¹, Flávio Tosi Feijó², Patrícia Raggi Abdallah³

¹ Acadêmico do curso de Economia/FURG. Bolsista PROBIC/FURG. will.mattes@yahoo.com.br

² Doutor em Economia/UFRGS. Professor Adjunto do Departamento de Ciências Econômicas, Administrativas e Contábeis (DCEAC) da FURG. tosifl@yahoo.com.br

³ Doutora em Economia/ESALQ-USP. Professora Adjunta do DCEAC/FURG.
patriziaraggi@yahoo.com.br

RESUMO: O presente artigo explora a possibilidade de inserção de tecnologias de geração de energia elétrica a partir da energia de ondas marinhas na costa brasileira. Para tanto, foram revisadas as principais tecnologias implementadas no mundo para a extração de energia advinda das ondas, incluindo os custos associados à instalação de uma unidade-piloto. De acordo com os dados mais recentes, um aproveitamento intensivo desse recurso na costa brasileira seria capaz de fornecer 50 TWh.

PALAVRAS-CHAVE: Economia da energia; fontes renováveis de energia; energia de ondas.

ABSTRACT: This paper explores the possibility of electricity generation based on wave energy at the brazilian coast. Thus, we present a review of the main technologies available around the world to this sort of energy production, including the principal range of costs related to them. Accordingly to the most recent available data, intensive utilization of this resource at the brazilian coast would be able to generate around 50 TW-h.

KEYWORDS: Energy economics; renewable energy sources; wave energy.

1. INTRODUÇÃO

As preocupações relacionadas com as questões ambientais têm figurado com forte proeminência nos debates científicos e acadêmicos. Ao longo das últimas décadas, as dimensões atingidas pela sociedade contemporânea, no que diz respeito à intensificação da demanda por recursos naturais, renováveis ou não, motivam um crescente número de pesquisas que pretendem apontar vias possíveis para a sustentabilidade intertemporal desses recursos.

Os processos de geração de energia desempenham um papel fundamental na consecução dos objetivos econômicos, sociais e ambientais das nações modernas, e são capazes de representar um ponto de estrangulamento quando mal planejados e gerenciados. No mesmo tocante, grande parte desses processos demanda uma alta quantidade de combustíveis altamente poluentes, dependendo do tipo de matriz em que estão baseados, e exigem uma reformulação setorial adequada de modo que contemplem as exigências do desenvolvimento econômico e social em conjunção com a redução das agressões ambientais.

É notável que a mudança de paradigmas a respeito do desenvolvimento, sobretudo com a incorporação da noção de sustentabilidade⁴, permitirá uma participação crescente dos processos de geração de energia baseados em fontes renováveis. No entanto, a performance dessa inserção está sujeita a uma vasta gama de fatores que inclui investimentos em pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias, mapeamentos do aproveitamento potencial das novas fontes de energia, verificação de viabilidades técnica e econômica, e a formação de um arcabouço institucional que contemple políticas direcionadas a objetivos desejados.

Embora seja um tipo de recurso ainda incipiente em sua utilização no mundo, o potencial energético contido nos oceanos apresenta-se como uma alternativa promissora para a geração de energia elétrica, o que justifica a necessidade de estudos sobre o aproveitamento desse recurso, especialmente na costa brasileira. De acordo com CRUZ e SARMENTO [1], o potencial energético global atribuído à energia das ondas é da ordem de 2 TW⁵, sendo equivalente à potência elétrica média anual consumida mundialmente.

⁴ Uma definição sucinta de desenvolvimento sustentável é apresentada por World Commission on Environment and Development 1987 Report (*apud* UNDP World Assessment Energy, 2000, p. 31), sendo aquele “*that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.*”

⁵ Unidade de medida de potência equivalente a 1.000 Mega-watts.

Neste artigo, tem-se como objetivo uma caracterização das principais tecnologias utilizadas para a extração da energia das ondas no mundo, e a detecção dos principais componentes de custos associados à sua instalação, através de revisão bibliográfica. A classe de dispositivos de conversão da energia das ondas analisada neste trabalho é a mais recente e aquela que permite beneficiar-se dos regimes de ondas mais poderosos, característicos de zonas de elevada profundidade (*offshore*). Para tanto, o artigo encontra-se dividido em quatro seções seguintes que abordam, respectivamente, uma introdução técnica sobre o aproveitamento da energia das ondas; uma caracterização dos principais tipos de equipamentos utilizados na extração desse tipo de energia; uma descrição dos principais componentes de custos relacionados com a instalação de uma usina de geração de energia elétrica a partir da energia das ondas; e uma breve contextualização da energia das ondas ao caso brasileiro, com os potenciais impactos de sua implantação na costa litorânea.

2. ASPECTOS TÉCNICOS DO APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS ONDAS

As ondas resultam do efeito do vento sobre a superfície dos oceanos, caracterizadas pela movimentação vertical de partículas fluidas, cuja direção de propagação energética se dá perpendicularmente à linha de crista da onda. Os mecanismos precisos de transferência da energia dos ventos para as ondas são bastante complexos. No entanto, ESTEFEN *et al.* [3] identificam os seguintes aspectos: i) o fluxo de ar sobre a superfície do mar transfere energia através de tensões cisalhantes, resultando na formação e no crescimento das ondas; ii) alterações dos campos de pressão e das tensões cisalhantes, em decorrência de fluxos turbulentos de ar, levam a uma intensificação do processo de formação das ondas; e iii) a partir de certo tamanho, as ondas podem sofrer uma ação mais intensa do fluxo de ar, o que se reflete também no crescimento das ondas.

O fluxo de energia, P , de uma onda senoidal, por unidade de frente, segundo a teoria linear da onda, pode ser expressa teoricamente pela seguinte equação:

$$P = \frac{\rho g^2}{32\pi} H^2 T$$

Onde ρ é a massa específica da água, g é a aceleração da gravidade, H é a altura da onda e T é o período da onda.

No entanto, a definição acima comporta uma modelagem simplificada quando comparada às condições reais do mar, onde existe predominância da superposição aleatória de inúmeros desses processos simplificados. Outras modelagens procuram definir a distribuição da energia das ondas, em condições reais, em função da frequência das ondas. Ainda nesse sentido, modelagens mais sofisticadas incluem a distribuição da energia das ondas com base na direção das ondas, capturando a parcela de energia capaz de ser interceptada por um dispositivo unidirecional de extração de energia.

3. AS TECNOLOGIAS DE EXTRAÇÃO DE ENERGIA DAS ONDAS

Nas últimas décadas, a extração da energia das ondas tem motivado os pesquisadores a encontrar diferentes soluções para equacionar o desafio tecnológico. Segundo ESTEFEN *et al.* [3],

“A flutuação dos níveis de potência das ondas ao longo do ano é uma das maiores dificuldades encontradas pelos projetistas de aparatos para a extração de energia das ondas, pois enquanto uma usina de ondas deve operar de forma eficiente em níveis de potência da ordem de 20 kW/m, deve ser também capaz de suportar a ação de ondas extremas com potências da ordem de 1.000 kW/m.” (2003, p. 490)

As tecnologias de conversão da energia das ondas são classificadas usualmente com base no princípio de operação do equipamento ou com base na distância entre o equipamento e a linha de costa (CRUZ e SARMENTO, 2004). De acordo com esta última classificação, podem ser classificadas em dispositivos costeiros (*shoreline*), dispositivos próximos da costa (*near-shore*), e dispositivos afastados da costa (*offshore*). O motivo pelo qual é feita essa classificação deve-se às profundidades resultantes das distâncias dos dispositivos à costa, uma vez que o regime de ondas é mais energético em maiores profundidades, sendo assim vantajoso colocar tais dispositivos em profundidades superiores. No caso dos dispositivos *shoreline* as profundidades serão normalmente inferiores a 20 m e os dispositivos são assentados no fundo do mar. No segundo caso, *nearshore*, a profundidade fica em torno dos 50 m e os dispositivos são flutuantes.

A primeira classificação está associada ao modo de conversão da energia das ondas em energia elétrica, isto é, ao tipo de dispositivo. Temos assim três classes principais de dispositivos de conversão da energia das ondas, que podem ser de Coluna de Água Oscilante, CAO (*Oscillating Water Column*), Corpos Flutuantes, podendo ser de absorção pontual (*Point Absorbers*) ou progressiva (*Surging devices*), e Galgamento (*Overtopping devices*). É importante ressaltar que esses dispositivos podem eventualmente ser usados em conjunto em um parque de geração de energia. A seguir, são apresentados os dispositivos pertencentes à classe de equipamentos capazes de operar em maiores profundidades e, dessa forma, beneficiarem-se de regimes mais poderosos e energéticos de ondas.

3.1 Archimedes wave swing (AWS)⁶

O *Archimedes Wave Swing* é um dispositivo de conversão de energia das ondas da classe dos corpos flutuantes. Com um diâmetro de 10 a 15 m, bastante inferior ao comprimento de onda (cerca de 150 m), o AWS pode ser considerado um dispositivo de absorção pontual. O AWS é formado por dois cilindros ocos submersos, no interior dos quais o ar pressurizado equilibra o cilindro superior (flutuador) e a coluna de água exterior acima dele. A passagem das ondas altera a pressão sobre o cilindro flutuador, provocando um movimento oscilatório. Esse movimento é utilizado para acionar um gerador elétrico linear, responsável pela produção da energia elétrica. Os dispositivos finais prevêm uma potência instalada de aproximadamente 5 MW.

3.2 Pelamis⁷

O *Pelamis* é um dispositivo de conversão de energia das ondas do tipo progressivo. Os dispositivos progressivos são sistemas alongados com uma dimensão longitudinal da ordem de grandeza do comprimento de onda e estão dispostos no sentido de propagação da onda, de modo a gerarem um efeito de bombeamento progressivo, associado à passagem da onda. Cada dispositivo é composto de quatro tubos circulares e três módulos de conversão de energia, perfazendo uma capacidade unitária de aproximadamente 750 kW, sendo o seu comprimento de 120 m e o diâmetro externo igual a 3.5 m. O movimento de propagação das ondas provoca a oscilação dos cilindros em relação às juntas que os unem e, dessa forma, a pressurização de óleo

⁶ Desenvolvido pela *Teamwork Technology* (Países Baixos). <http://www.waveswing.com>

⁷ Desenvolvido pela *Ocean Power Delivery Ltd.* (Escócia). <http://www.oceanpd.com>

interno que passa por motores hidráulicos, responsáveis pela geração da energia elétrica. Uma das componentes importantes do Pelamis é o seu sistema de fixação ao fundo do mar, que, dadas as características do dispositivo, assume uma relevância fundamental.

3.3. Wave Dragon⁸

O *Wave Dragon* é um dispositivo de conversão de energia das ondas que pode ser considerado como um dispositivo de galgamento afastado da costa (*offshore*). O sistema consiste basicamente em dois refletores e de um reservatório que armazena a água e ainda de um determinado número de turbinas de baixa queda, através das quais a energia elétrica é produzida. Um dispositivo *Wave Dragon* é projetado para, em escala real, atingir uma potência nominal de 7 MW, num intervalo que pode variar entre 4 e 11 MW, de acordo com o clima médio de ondas do Atlântico (36 a 40 kW/m). Este sistema foi o primeiro a introduzir eletricidade em uma rede elétrica, em Nissung, Dinamarca (CRUZ e SARMENTO, 2004).

4. COMPONENTES DE CUSTOS

A determinação dos custos totais compreende o levantamento e a soma de todos os custos de investimento. Estes podem variar de acordo com o projeto, mas, basicamente, incluem *equipamentos* (novos e usados); *licenças*; *patentes*; *despesas de instalação*, etc. (EPRI, 2004)

4.1 Equipamentos

No caso dos equipamentos (EPRI, 2004), podem ser mencionados: *turbinas* (componentes que são diretamente responsáveis pela extração de energia do fluxo tidal, tais como o rotor, e seus controladores, e cabo principal); *estruturas de extração* (componentes estruturais de extração, tais como dutos de alojamento, ou qualquer outro componente estrutural requerido); *geradores*; *fundações, aportagem e ancoragem* (componentes requeridos para a fixação, em determinado local, do dispositivo de conversão de força do fluxo tidal); *interconexões elétricas* (cabos requeridos para a conexão das plantas individuais a um ponto de interconexão comum); *interconexões paralelas* (todos os sistemas de cabos, engrenagens, linhas de transmissão e infra-

⁸ Desenvolvido pela *Wave Dragon ApS*, um consórcio internacional europeu. <http://www.wavedragon.com>

estrutura requeridas para a conexão do ponto de interconexão comum ao ponto de conexão baseado em terra); *comunicação, comandos e controle* (equipamentos e infra-estrutura requeridos para estabelecer uma ligação de duas vias entre solo e sistemas de geração, com fins de comunicação, controle e comandos); *custos de instalação* (custos requeridos para o transporte do sistema até o local de operação, para completar todas as conexões, e verificação do local); *instalações gerais e engenharia* (custos de engenharia associados ao planejamento do parque de geração e de instalações gerais requeridas para a operação da planta. Neste item poderiam ser incluídas modificações em docas, compras de manutenção etc. para a operação e manutenção do parque).

4.2 Encargos financeiros e provisões econômicas

No caso de custos relacionados com encargos e provisões econômicas, destacam-se: *custo de desenvolvimento do proprietário* (estimado em aproximadamente 5% dos custos de instalação acima); *provisões econômicas* (estimadas em aproximadamente 2% dos custos de equipamentos); *taxas financeiras* (estimadas em aproximadamente 2% do primeiro ano de dívida); e *demais encargos*.

4.3 Demais custos

Entre os demais custos, podem ser mencionados os *custos subestação-subestação* que consistem no custo de capital inicial requerido para qualquer custo de transmissão/distribuição entre subestações que seja incluído no custo estimado, entretanto, desde que seja creditado de volta com juros dentro dos primeiros 5 (cinco) anos de operação. Por simplificação, esse custo não é fatorado junto ao custo de eletricidade (CDE) ou nos cálculos da taxa interna de retorno.

4.4 Custos de operação e manutenção

Por sua vez, os Custos Anuais Programados de Operação e Manutenção (O&M) compreendem os componentes de O&M que constituem de seguro, mão-de-obra e “partes”. A mão-de-obra, além de pessoal capacitado, inclui despesas com equipamentos como lanchas, barcos de mergulho, etc. para a execução das atividades de O&M. “Partes” são simplesmente itens de reposição. Os custos de O&M não incluem custos infreqüentemente incorridos na revisão

dos dispositivos e outros componentes. Estes custos estão incluídos no Custo de Reposição Atualizado (CRA). As despesas referem-se aos pagamentos anuais associados à operação e à manutenção da planta, e incluem O&Ms recorrentes e não-recorrentes (que são estimados, para efeitos de análise econômica, baseados em projetos relacionados da indústria *offshore*). A maior parte dos custos de O&M associados com os dispositivos de conversão de energia tidal pode ser agrupada em três categorias: i) Manutenção Não-programada: execução de reparos, tipicamente ocorrendo após violentas tempestades; ii) Manutenção Preventiva Programada; iii) Revisões e Reposições Programadas de Dispositivos.

Quanto ao Custo Anual Não-programado de O&M, tem-se a provisão para manutenção não-programada estimada em uma porcentagem do custo anual programado de O&M. O Custo Atualizado de Reposições e Revisões Periódicas (CARP), uma vez que, dependendo do tipo específico de equipamento, requerem-se maiores revisões do dispositivo e do sistema de fixação, e são programadas para ocorrer a cada 5, 10 ou 15 anos. Essas maiores revisões podem se dirigir às engrenagens, sustentações, lacres e outras partes móveis, bem como ao cabo de fixação e componentes. Uma vez que são custos incorridos em intervalos de vários anos, e não rotineiramente a cada ano, a sua contabilização correta requer um aporte anual de fundos. O objetivo desse aporte é disponibilizar recursos para quando surgir a necessidade de reposições ou revisões. O aporte envolve cálculo de Valor Presente Líquido, em nível dos custos de revisão e reposição, a uma base anualizada, consistente com os outros elementos de custos. Por se tratarem de investimentos, são elegíveis a taxas de crédito de investimentos.

Assim, o Custo Total da Planta (CTP), isto é, custo total instalado e incumbido, consistirá nos elementos de custo supramencionados. O Investimento Total na Planta (ITP) é o montante de capital total para a construção da planta, considerando-se os juros durante o período de construção. $ITP = CTP + \text{Juro durante a Construção}$.

5. A ENERGIA DAS ONDAS E O CASO BRASILEIRO

Os estudos sobre aproveitamento da energia das ondas ainda se encontram em fase bastante incipiente no Brasil, agravados por obstáculos significativos ao seu desenvolvimento como a ausência de dados sobre o potencial energético do mar brasileiro, dificuldade de atração de

investidores e a ausência de mecanismos institucionais que incluam projetos de investimentos nesse tipo de geração de energia em programas de incentivos ao desenvolvimento de energias alternativas.

ESTEFEN *et al.* [3] reportam os dados obtidos do potencial energético da costa brasileira, com base na medição realizada pelo satélite Topex/Poseidon, referente a um período de 6 anos e meio (setembro de 1992 a março de 1996, e fevereiro de 1999 a setembro de 2000). A Tabela 1 reproduz aqui esses resultados.

Tabela 1. Valores médios de H^9 , Te^{10} e P^{11} ao largo da costa brasileira obtidos a partir das medidas dos altímetros do satélite Topex/Poseidon entre setembro de 1992 a março de 1996 e fevereiro de 1999 a setembro de 2000.

Área	Pista	Latitude (°S)	Longitude (°W)	Te(s)	H(m)	P(kW/h)
São Mateus - Vitória	024	19 – 21	38.09 – 38.94	8,29	1,76	14,6
	061	19 – 21	37.59 – 38.44	8,41	1,86	16,5
Fundão - Campos	024	20 – 22	37.66 – 38.52	8,42	1,87	16,8
	061	20 – 22	38.01 – 38.87	8,45	1,91	17,1
	202	20 – 22	40.50 – 40.84	7,96	1,49	9,6
Rio de Janeiro	126	23 – 23.5	42.66 – 42.88	8,61	1,92	20,1
	239	23 – 23.5	42.14 – 42.36	8,48	1,88	18
Santos - Curitiba	163	24 – 26	45.35 – 46.35	8,43	1,82	16,9
	228	24 – 26	47.80 – 47.70	8,27	1,65	13,5
Florianópolis - Caxias	163	27 – 29	46.82 – 47.82	8,64	2,07	22,7
Porto Alegre - Rio Grande	163	30 – 32	48.32 – 49.40	8,93	2,37	32,5

Fonte: TOLMASQUIM, M. T. (Org) *Fontes renováveis de energia no Brasil*. 2003. p. 520.

É possível observar que a potência disponibilizada pelas ondas aumenta de acordo com a latitude até atingir 32,5 kW/h no extremo Sul do país (Pista 163), compreendendo um recurso total de aproximadamente 40 GW. ESTEFEN *et al.* [3] admitem um máximo de capacidade de aproveitamento do recurso das ondas entre 10 e 15% do total disponível. Em outras palavras, um aproveitamento intensivo do recurso seria capaz de produzir anualmente o equivalente a 50 TWh.

⁹ Altura da onda.

¹⁰ Compreende um período médio, denominado período de energia ou de potência, sendo expresso em kW/m.

¹¹ Potência disponibilizada pela onda, expressa em kW/h.

Em virtude das limitadas experiências com energia de ondas no mundo ainda, é difícil estimar o quão viável economicamente será a sua operação em um estágio maduro de desenvolvimento, ou em larga escala. No entanto, algumas tecnologias de extração *offshore* de energia das ondas já são competitivas em certos nichos de mercado, como em pequenas comunidades ou ilhas que fazem uso de geração de energia em pequena escala a partir de diesel combustível. De acordo com os custos apresentados por FRAENKEL [4], uma geração a partir de óleo diesel custa tipicamente entre US\$ 0,10 a US\$ 0,50 por quilowatt-hora (kW/h), enquanto algumas tecnologias *offshore* produzem a mesma quantidade de energia a custos entre US\$ 0,06 e US\$ 0,15.

A mensuração detalhada dos benefícios econômicos e sociais advindos de fontes renováveis é bastante difícil e, normalmente, está vinculada ao tipo de projeto a ser empreendido, incluindo os diferentes equipamentos utilizados. A partir da revisão de uma experiência com energia de ondas na Escócia, WEC [6] ressalta ainda como os principais benefícios a criação de empregos diretos e indiretos; externalidades tecnológicas, principalmente quando o país dispõe de *know-how* na indústria *offshore*; e dinamização econômica de áreas rurais.

Além disso, representaria um incremento na capacidade instalada de geração de energia elétrica baseado em uma fonte renovável e não-poluente. Ademais, um projeto de energia de ondas estaria apto à elegibilidade ao Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, sendo possível a oferta de créditos de carbono no mercado internacional.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O equacionamento dos desafios ambientais que se põem diante da humanidade requer uma especial atenção aos processos de geração de energia, dada a sua indispensabilidade para o continuado desenvolvimento humano e para o crescimento econômico. O Brasil apresenta uma relativa eficiência energética do ponto de vista ambiental com sua matriz preponderantemente baseada em geração hidrelétrica. Estimções das emissões de dióxido de carbono (CO₂) per capita para a geração de energia elétrica apontam para 1,76 tonelada no Brasil, consideravelmente abaixo da média da América Latina, estimada em 4,18 toneladas, e de países como Estados Unidos e Japão, que emitem em média 20 e 9,5 toneladas per capita, respectivamente. O desenvolvimento da extração de energia de ondas na costa brasileira reafirmaria a posição brasileira na eficiência energética ambiental.

Por outro lado, em vista do nível de potência disponível na costa brasileira, com destaque para a Região Sul do país, é razoável admitir-se que os empreendimentos de energia de ondas mais viáveis economicamente serão aqueles mais afastados da costa, onde o potencial energético das ondas é maior e, portanto, beneficiar-se-ão de uma maior capacidade de geração de energia elétrica. Apresentaram-se, neste trabalho, as principais classes de tecnologias disponíveis para tais empreendimentos e a estrutura de custos relacionados com sua instalação e operação. A estimação desses custos é parte essencial dos estudos de viabilidade econômica da operação de usinas de energia elétrica com base em ondas marinhas, bem como para a seleção dos tipos de dispositivos a serem utilizados.

A escassez de informações e de pesquisas sobre a inserção de tecnologias de geração de energia elétrica a partir das ondas no Brasil ainda representa uma das maiores deficiências para a prospecção e o desenvolvimento de aplicações efetivas no país. Entretanto, os esforços conjuntos de laboratórios de pesquisa, da iniciativa privada e do setor governamental apontam para boas perspectivas sobre o aproveitamento econômico da energia das ondas na costa brasileira.

7. REFERÊNCIAS

1. CRUZ, J. M.; SARMENTO, A. J. **Energia das ondas: introdução aos aspectos tecnológicos, económicos e ambientais**. Portugal: Instituto do Ambiente Alfragide, 2004.
2. ENERGY POWER RESEARCH INSTITUTE – EPRI. **Economic assessment methodology for offshore wave power plants**. [s.l.], 2004.
3. ESTEFEN, S. F; FERNANDES, A. C.; ESPERANÇA, P. T. *et alli*. Energia das ondas. In: TOLMASQUIM, M. T. (Org.) **Fontes renováveis de energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.
4. FRAENKEL, P. L. New developments in tidal and wavepower technologies. In: **Proceedings of the Silver Jubilee Conference: toward a renewable future**. Conference C73 of the Solar Energy Society. Brighton, UK. 1999.
5. UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME. **World energy assessment: energy and the challenge of sustainability**. New York, 2000.
6. WAVE ENERGY CENTER – WEC. **Wavenet full report**. Lisbon, 2003.