

Avaliação e Aproveitamento da Energia de Ondas Ocoânicas no Litoral do Rio Grande do Sul

Leandro Eduardo Assis*, Alexandre Beluco*, Luís Emílio B. Almeida*

leandroeassis@hotmail.com; albeluco@iph.ufrgs.br; almeida@iph.ufrgs.br.

Recebido: 18/03/10 - revisado: 16/06/11 - aceito: 15/05/13

RESUMO

O aproveitamento da energia de ondas oceânicas constitui uma oportunidade real para suprir parte das demandas energéticas em diversos países. Atualmente, os impactos ambientais têm limitado o crescente uso dos combustíveis fósseis. Além disso, os elevados custos de investimento necessários para expansão do atual modelo de geração de energia configuram um cenário desafiador para os próximos anos. Dentro desse panorama, o objetivo deste trabalho consiste em avaliar o potencial energético de ondas oceânicas no litoral do Rio Grande do Sul. Os dados de ondas utilizados nas avaliações foram coletados na zona marítima próxima ao Porto de Rio Grande durante os anos de 1996 a 1999, totalizando dezesseis meses de monitoramento da agitação marítima da região. O conjunto de dados foi tratado e agrupado mês a mês e nas quatro estações climáticas resultando informações de potenciais energéticos mensal, sazonal e anual. A média anual encontrada foi de 8,6 kW por metro de frente de onda. Um breve estudo de viabilidade econômica revelou que é viável implantar uma usina para aproveitamento da energia de ondas com custos de investimento semelhantes aos projetos de usinas eólicas atualmente em implantação no Brasil. O estudo também incluiu uma avaliação técnico-econômica para quatro alternativas de aproveitamento. O trabalho apresenta ainda a alternativa mais viável para explorar o potencial energético identificado, apontando que esta modalidade de geração de energia pode ser utilizada como importante ferramenta no desenvolvimento sustentável da região.

Palavras-chave: Energia dos oceanos. Energia de ondas. Potencial energético. Avaliação técnico-econômica.

INTRODUÇÃO

Os aproveitamentos energéticos baseados em recursos renováveis enfrentam várias dificuldades de aceitação, devidas principalmente aos elevados investimentos iniciais e aos baixos rendimentos finais. Entre os recursos disponíveis, as usinas baseadas em energia hidráulica e energia eólica apresentam desenvolvimento completo, mas outros recursos têm sido amplamente desenvolvidos, mostrando-se capazes de fornecer suprimentos bastante razoáveis.

Entre os recursos disponíveis, a energia de ondas oceânicas ainda se encontra em fase intermediária de desenvolvimento, mas apresenta razoável desempenho econômico, alcançando em vários empreendimentos custos específicos por potência instalada um pouco superiores aos custos atuais de usinas eólicas.

Uma das dificuldades dos sistemas de geração a partir de ondas oceânicas é o alto investimento inicial. A maioria das tecnologias ainda não alcançou maturidade tecnológica e isso exige ainda pesados investimentos em desenvolvimento. Contudo, alguns estudos apontam que quando estes sistemas alcançarem condição de maturidade terão custos de instalação e geração semelhantes aos projetos das centrais eólicas mais caros (CRUZ; SARMENTO, 2004). E isto não significa que estas tecnologias não sejam atrativas, principalmente em circunstâncias onde disponibilidade de outros recursos renováveis se mostrem limitadas.

Segundo Stefen et al. (2006), a energia obtida a partir de ondas oceânicas pode ter impactos positivos na matriz energética brasileira, visto que o litoral é extenso, com aproximadamente 9.000 km. A estimativa é de que seja possível disponibilizar aproximadamente 40 GW para o sistema interligado brasileiro, considerando apenas o aproveitamento ao longo do litoral das regiões sul e sudeste do Brasil.

Este artigo é dedicado à identificação de potencial energético no litoral do Estado do Rio

*Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), UFRGS

Grande do Sul, no extremo sul do Brasil, a partir de dados coletados em frente ao Porto de Rio Grande. Além disso, o artigo apresenta alguns apontamentos sobre a viabilidade econômica de usinas baseadas em recursos energéticos ainda em fase de amadurecimento e discute o emprego de usinas baseadas nas concepções conhecidas como Osprey, Limpet e Pelamis, além de um projeto desenvolvido pela Coppe, da UFRJ, para geração de energia na região considerada.

FORMAÇÃO DE ONDAS

As ondas do mar são, em última análise, uma forma de energia solar. O solo, a água, a vegetação e em geral todos os elementos presentes na atmosfera e na superfície do planeta têm diferentes capacidades caloríficas. Aquecem-se de modos diferentes sob efeito de radiação solar incidente, e de mesmo modo se resfriam também de modos diferentes devido à ausência ou à redução de insolação.

O ar próximo das superfícies de menor capacidade calorífica se aquece e expande com maior rapidez, de forma contrária ao que acontece com o que está próximo das superfícies em resfriamento, ou do que está próximo das superfícies de maior capacidade calorífica. Formam-se assim zonas de baixas e de altas pressões, forçando o ar a se movimentar de umas às outras para compensar diferenças ou desequilíbrios de pressão. Esse movimento das massas de ar ocorre das zonas de altas pressões para as zonas de baixas pressões, ao nível do solo, ocorrendo o movimento contrário nas camadas mais altas da atmosfera. Esse movimento é o vento e conforme os ventos atuam sobre a superfície dos oceanos, transferem sua energia e provocam a formação de ondas.

TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA

Os mecanismos de transferência de energia do vento para a superfície da água são complexos, podendo-se identificar alguns aspectos importantes. O ar que escoa sobre a superfície do mar transfere energia através da atuação de tensões cisalhantes, resultando na formação e crescimento das ondas. O fluxo turbulento do ar, próximo à superfície livre, gera uma intensa variação das tensões cisalhantes e

do campo de pressões, quando estas oscilações entram em fase com as ondas já existentes ocorre uma intensificação no processo de geração das ondas. Por último, quando as ondas atingem um determinado tamanho, o vento pode exercer uma ação mais intensa na sua face, acarretando um crescimento ainda maior.

A quantidade de energia transferida e a altura das ondas geradas pelo vento dependem não só da intensidade do vento, mas de sua duração e da dimensão da zona onde este atua, que se designa por *fetch* ou comprimento de geração. Em cada uma destas etapas ocorre concentração de energia de modo que níveis de potência solar da ordem de 100 W/m² podem eventualmente se transformar em ondas com níveis de potência acima de 1.000 W por metro de comprimento de onda (THORPE, 1999).

CLASSIFICAÇÃO DAS ONDAS

As ondas podem ser classificadas a partir de diversos critérios, de acordo com seu período ou sua frequência, com as forças perturbadoras e com as forças restauradoras.

As ondas de menor período têm como principal força perturbadora o vento, que atua na interface entre atmosfera e oceano. O vento transfere energia da atmosfera para o oceano, resultando no movimento irregular da superfície, que é denominado por agitação marítima. Neste processo, a gravidade atua como força restauradora, para recuperar a condição de equilíbrio.

As ondas de maior período têm como principais forças perturbadoras os sistemas de tempestades e tsunamis, bem como o movimento da Terra na órbita do Sol e o movimento da Lua na órbita da Terra. A força de Coriolis age como força restauradora primária.

Tsunami é uma palavra de origem japonesa que designa ondas longas geradas em oceanos, mares, baías, lagos, a partir de movimentos sísmicos, ou de vulcanismo, ou de deslizamentos de solo submarino, ou de impacto de meteoritos, ou até de fenômenos meteorológicos (BRYANT, 2001).

Segundo Silveira e Varriale (2005) as ondas que se propagam na interface líquido-gás, devido à influência do campo gravitacional, são denominadas ondas de gravidade. Na interface líquido-gás há também a possibilidade de surgirem ondas de tensão superficial. No entanto, efeitos de tensão superficial são totalmente desprezíveis para as ondas oceânicas, por serem perceptíveis apenas se seu

comprimento de onda for inferior a um centímetro.

No presente trabalho, foram consideradas as ondas de gravidade superficiais, cuja força perturbadora é o vento e a força restauradora é a ação da gravidade, visto serem as que apresentam maior conteúdo energético a ser explorado.

ENERGIA DAS ONDAS

Em um sistema dinâmico conservativo submetido a oscilações de pequena amplitude, a energia cinética e a energia potencial são iguais. A densidade média de energia cinética pode ser obtida calculando a energia cinética de um elemento de fluido de altura dz , comprimento dx e de largura unitária, integrando entre a superfície e o fundo, como aparece na equação (1).

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

Nessa equação, E_c é a densidade média de energia cinética; u e v são as componentes horizontal e vertical da velocidade das partículas de água; dz é a altura do elemento fluido; dx é o comprimento do elemento fluido; η é a elevação da superfície; ρ é a massa específica da água; λ é o comprimento de onda.

Substituindo estas componentes pelas expressões que as definem em águas profundas, obtém-se as equações (2) e (3), onde a é a amplitude da onda; ω é a frequência angular; k é o número de onda; t é o tempo.

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

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

A densidade média de energia cinética E_c [Nm/m^2] é fornecida pela equação (4), onde g é a aceleração da gravidade, em m/s^2 ; e a é a amplitude, em metros.

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

A densidade média de energia potencial em relação ao nível médio ($z=0$) é dada pela equação (5), onde E_p é a densidade média de energia potencial em Nm/m^2 .

$$E_p = \frac{1}{\lambda} \int_0^\lambda dx \int_0^\eta \rho g z dz = \frac{1}{2} \rho g \frac{1}{\lambda} \int_0^\lambda \eta^2 dx = \frac{1}{4} \rho g a^2 \quad (5)$$

Usando as equações (4) e (5), obtém-se a densidade média de energia total para ondas de gravidade, dada pela equação (6) onde E_T é a densidade média de energia total expresso em Nm/m^2 .

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

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

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

A velocidade de propagação da energia da onda é dada pela equação (8).

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

Assim, o fluxo médio de energia P é calculado para ondas monocromáticas simples através da equação (9).

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

O mar pode ser modelado como um processo aleatório, resultado da superposição de um grande número de componentes monocromáticas. Assim, parâmetros de ondas como período, altura e direção devem ser tratados por métodos estatísticos. Os parâmetros estatísticos mais utilizados são a altura significativa H_s e o período médio de energia T_e .

O fluxo de energia para um mar real é calculado através da equação (10), onde $S(f, \theta)$ é a distribuição de densidade de energia em termos de frequência e direção.

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

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

$$P[W/m] = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e \quad (11)$$

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

$$P[kW/m] = 0,4906 H_s^2 T_e \quad (12)$$

Esta é a equação que foi empregada na avaliação do recurso energético na área de estudo.

MATERIAIS E MÉTODO

A avaliação do recurso energético das ondas exige dados referentes à altura e ao período das ondas oceânicas. Estes dados podem ser obtidos com medições *in situ*, com medições remotas ou com modelagens numéricas.

As medições *in situ* são geralmente efetuadas por bóias-ondógrafo ou por sistemas submersos, como por exemplo, sensores acústicos e sensores de pressão. Esses métodos de obtenção de dados são de difícil execução, existindo risco de destruição ou avaria dos equipamentos. Neste trabalho, foram utilizadas medidas *in situ* que foram obtidas através de uma bóia-ondógrafo, conforme detalhado a seguir.

Durante o período de aquisição dos dados ocorreram dois sinistros, impossibilitando uma coleta contínua dos dados apresentados.

DESCRIÇÃO E POSICIONAMENTO DO ONDÓGRAFO

O equipamento utilizado para coleta de dados foi um ondógrafo direcional da marca Waverider e aparece na figura 1. É uma bóia de 0,9 m de diâmetro, dotada de acelerômetros capazes de

medir as acelerações sofridas pela bóia em função do movimento sobre as ondas.

O ondógrafo foi programado para coletar dados com intervalo de três horas, para alturas significativas inferiores a 2 metros. No caso de tempestades, a aquisição era praticamente contínua, com intervalo de 30 minutos entre as aquisições.

Em outubro de 1996, o ondógrafo foi posicionado na batimetria de 15 m e nas coordenadas 32° 10' S e 51° 58' W, em frente ao molhe leste da barra do Porto de Rio Grande. A figura 1, à direita, mostra um registro do lançamento do ondógrafo. A figura 2 mostra uma imagem do Google Earth (2011) com sua localização.



Figura 1 - Boia ondógrafo, à esquerda, e seu lançamento em Rio Grande, RS, em outubro de 1996
Fonte: Strauch (1999).



Figura 2 - Localização do ondógrafo nas imediações do Porto de Rio Grande, RS

Após o fundeio, seguiu-se a obtenção dos dados por praticamente dez meses ininterruptos, até que em agosto de 1997, durante uma tempestade, rompeu-se o fundeio do ondógrafo, deixando-o à deriva. O ondógrafo foi novamente reposicionado, sofrendo novo e definitivo sinistro em abril de 1998.

Após cerca de dezesseis meses de monitoramento, com interrupções em agosto de 1997 e em abril de 1998, foi possível elaborar uma base preliminar de dados, estabelecendo o comportamento das ondas na região do Porto de Rio Grande, RS. Estes dados foram utilizados para efetuar uma quantificação de potencial energético disponível na região.

RECURSO ENERGÉTICO

Os dados coletados forneceram informações relativas à direção de propagação, à altura significativa, ao período e à energia de pico das ondas.

A avaliação do recurso energético considerou o período médio de energia (T_e), que é essencial para quantificar o recurso energético, que foi obtido a partir do período médio de cruzamento de zeros para os referidos intervalos de coleta de dados.

A equação (13) mostra a expressão utilizada para determinação do período médio de energia, onde T_z é o período de cruzamento de zeros.

$$T_e = 1,21 T_z \quad (13)$$

A seguir são apresentados os resultados de recurso energético sazonal e anual para a região selecionada neste estudo.

A tabela 1 apresenta os valores médios mensais para a altura significativa e o período médio de energia, além dos valores médios mensais para a potência por metro de frente de onda.

A tabela 2 mostra valores médios sazonais para a altura significativa, para o período médio de energia e para a potência por metro de frente de onda.

O maior valor de potência por metro de frente de onda está disponível no mês de maio, enquanto o valor mínimo aparece em janeiro.

Considerando médias sazonais, o valor máximo estará disponível no outono, enquanto os meses de primavera e de verão apresentam médias sazonais bastante próximas entre si, estando o valor

mínimo disponível no verão.

O valor médio anual de potência por metro de frente de onda é de 8,60kW/m.

VIABILIDADE ECONÔMICA

Esta análise não pretende ser rigorosa e tem como finalidade uma comparação entre as alternativas de geração eólica e a partir de ondas, quanto aos aspectos de investimentos iniciais, custos de operação e manutenção, amortização e retorno dos investimentos.

A análise é feita somente para a instalação desses sistemas e para o primeiro ano de operação. Anos subsequentes podem ser analisados, considerando-se taxas de inflação e depreciação dos equipamentos.

O método da anuidade, que determina o custo anual do capital A , em função da taxa de juro i , do capital inicial C e do período de amortização n , aparece na equação (14).

$$A = C \frac{i}{1 - (1+i)^{-n}} \quad (14)$$

Tabela 1 - Valores médios mensais de $\bar{H}_s$ [m], $\bar{T}_e$ [s] e P [kW/m] para o período de 1996 a 1998

Meses	$\bar{H}_s$ [m]	$\bar{T}_e$ [s]	P [kW/m]
janeiro	1,23	5,30	4,02
fevereiro	1,73	5,90	8,82
março	1,72	6,20	9,17
abril	1,97	6,20	12,00
maio	2,06	6,70	14,20
junho	1,71	6,54	9,60
julho	1,33	6,00	5,30
agosto	1,73	6,33	9,50
setembro	1,45	5,90	6,20
outubro	1,63	5,90	7,90
novembro	1,70	5,60	8,10
dezembro	1,60	5,60	7,17

Tabela 2 - Valores médios sazonais de $\bar{H}_s$ [m], $\bar{T}_e$ [s] e P [kW/m] para o período de 1996 a 1998

Meses	$\bar{H}_s$ [m]	$\bar{T}_e$ [s]	P [kW/m]
primavera	1,61	5,71	7,40
verão	1,62	5,80	7,70
outono	1,88	6,40	11,35
inverno	1,60	6,30	8,06

Para que uma dada usina seja rentável, os proventos anuais R da venda de energia devem suportar a anuidade e os custos de operação e manutenção.

Exprimindo os custos de operação e manutenção como uma fração x do capital investido como é comum em projetos de sistemas energéticos, é possível escrever a equação (15).

$$R = A + xC \quad (15)$$

Por outro lado, os proventos anuais da venda da energia são dados pelo produto da energia anualmente produzida p pela tarifa de venda s , conforme (16).

$$R = p s \quad (16)$$

O custo de capital C pode ser expresso em termos da potência instalada P , através do custo unitário de potência instalada b , conforme (17).

$$C = bP \quad (17)$$

E a produção média anual de energia elétrica pode ser referida à potência nominal do equipamento elétrico (em MW) através da equação (18), onde h é o número de horas equivalentes à potência nominal.

$$p = hP \quad (18)$$

Combinando as equações (14) a (18), obtém-se o custo unitário de potência instalada b_0 (em US\$/MW) compatível com as condições de viabilidade econômica, isto é, aquele que permite que os proveitos suportem os encargos financeiros e de manutenção, em (19), onde s vem expresso em US\$/MWh.

$$b_0 = \frac{hs}{x + \frac{i}{1 - (1+i)^{-n}}} \quad (19)$$

Essa equação será aplicada a um projeto típico de energia eólica. A tabela 3 indica os valores de referência das variáveis independentes que aparecem na equação (19) e os valores de referência calculados para o investimento por unidade de potência instalada.

Tabela 3 - Investimento por unidade de potência instalada obtido através do método da anuidade

ITENS AVALIADOS	EÓLICA
Período de amortização	9
Taxa de Juros	3%
Custo O & M (% investimento)	3%
Nº de horas de funcionamento	2.300
Tarifa de venda [US\$/kWh]	0,130*
Investimento [US\$/kW]	1.887,25

Fonte: Cruz e Sarmento (2004). Com adaptações.

* Tarifa de venda da energia eólica estimado por MATTUELLA, 2005, para empreendimentos a serem construídos em Nova Hartz, São Lourenço do Sul e Tapes, no Rio Grande do Sul.

Aplicando a mesma taxa de juros a projetos de energia das ondas obtêm-se os valores da tabela 4 para duas situações distintas:

- I. Uma tarifa de US\$ 0,317/kWh, (CRUZ; SARMENTO, 2004), correspondente a uma situação de tecnologia em fase inicial de desenvolvimento, caso em que se considerou razoável admitir um período de amortecimento de 13,5 anos;
- II. Uma tarifa de US\$ 0,125/kWh, (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA, 2010) correspondente a uma situação de tecnologia em fase final de desenvolvimento, caso em que foram adotados a tarifa e o período de amortização considerados para a energia eólica.

Em ambos os casos se admitem 2.190 horas de funcionamento e um custo anual de manutenção e operação de 8% do investimento, superior em 5% ao valor usado na energia eólica, devido à agressividade do ambiente marinho e ao sobre custo associado às operações no mar (CRUZ; SARMENTO, 2004).

Nestas condições, as usinas que aproveitam a energia de ondas que estão em uma fase inicial de desenvolvimento, só serão rentáveis se o custo de investimento não for superior a US\$ 4.030,10 para cada kW instalado.

A conclusão é que para projetos que alcançaram maturidade tecnológica, o investimento máximo não deverá ultrapassar o valor de US\$ 1.452,80 para cada kW instalado, tornando-se competitivo com os atuais projetos de parques eólicos em implantação no Brasil.

Tabela 4 - Investimento necessário para projetos de energia de ondas, para tecnologias em fase inicial e em fase final de desenvolvimento

ITENS AVALIADOS	Tecnologia em fase inicial	Tecnologia em fase final
Período de amortização (anos)	13,5	9,0
Taxa de Juros	3%	3%
Custo O & M (% investimento)	8%	8%
Nº de horas de funcionamento	2.190	2.190
Tarifa de venda [US\$/kWh]	0,315	0,125
Investimento [US\$/kW]	4.030,10	1.452,80

TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS

As tecnologias analisadas neste estudo, em função dos valores de potência instalada, poderiam ser classificadas como Pequenas Centrais Hidrelétricas, segundo os critérios estabelecidos pela ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. O esquema sugerido no Estudo de Inventário da Eletrobrás foi adotado neste trabalho, onde foram realizadas análises comparativas das alternativas tecnológicas para a área selecionada. Na sequência, procedeu-se a uma análise econômica preliminar com o propósito de selecionar uma alternativa para explorar os recursos disponíveis no local. Os critérios adotados para a seleção prévia das tecnologias foram: capacidade de geração (potências nominais entre 0,5 MW e 0,75 MW), eficiência dos modos de conversão de energia, disponibilidade e forma de fixação do dispositivo na costa.

Considerando potência e modo de fixação dos aparelhos, as tecnologias pré-selecionadas foram: [1] dispositivo OSPREY, com potência nominal de 0,5 MW; [2] dispositivo LIMPET, com potência nominal de 0,5 MW; [3] dispositivo COPPE, com potência nominal de 50 kW, a ser expandido com a agregação de módulos para atingir 0,5 MW; e [4] dispositivo PELAMIS, potência nominal de 0,75 MW.

Os dispositivos de coluna de água oscilante (em inglês, *oscilating water column*, OWC) consistem basicamente em estruturas ocas parcialmente submersas, que se encontram abertas para o mar abaixo da superfície livre da água do mar. O processo de geração de eletricidade segue duas fases: quando uma onda entra na estrutura o ar que se encontrava dentro dela é forçado a passar por uma turbina, como consequência direta do aumento de pressão na "câmara de ar". Quando a onda regressa ao mar, o ar passa novamente na turbina, desta vez no sentido inverso, dada a pressão inferior no interior da "câmara de ar". Para aproveitar estes movimentos de sentidos opostos, utilizam-se normalmente, turbinas do tipo Wells, que possuem a propriedade de manter o sentido de rotação independentemente do sentido do escoamento. A potência dessas centrais depende do número de turbinas instaladas, sendo que se podem utilizar grupos de cerca de 0,5 MW de potência instalada. Este limite de potência tem a ver com as amplitudes de pressão de ar que normalmente é possível criar neste tipo de centrais e com as dimensões máximas das turbinas.

O dispositivo de conversão de energia desenvolvido pela COPPE da UFRJ (COSTA, 2004) foi projetado para produzir 50 kW, a ser expandido com a agregação de módulos para atingir 500 kW. O aproveitamento da energia das ondas é feito através de flutuadores fixados em estruturas horizontais articuladas que se movimentam atuando como braços de alavanca. Estes braços de alavanca, numa certa relação, multiplicam as forças oriundas do flutuador para acionar bombas hidráulicas de movimentos alternados. Estas bombas succionam e comprimem o fluido durante a movimentação dos flutuadores para abastecer e manter elevada a pressão de uma câmara hiperbárica. Esta câmara é previamente pressurizada com gás nitrogênio, contendo certa proporção de volume de água, caracterizando um acumulador hidráulico. A água, que abastece a câmara hiperbárica, é então liberada na forma de jato, para acionar uma turbina numa vazão igual ou menor àquela enviada pelas bombas, através de uma válvula controladora de vazão. A

rotação obtida no eixo da turbina é transmitida a um gerador elétrico para a conversão da energia mecânica em eletricidade.

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

A preferência por dispositivos *on shore* se deu devido à existência de um quebra mar na zona avaliada em Rio Grande, que poderia ser aproveitado para fixação dos aparelhos. Essa estrutura existente confere-lhes vantagens imediatas: uma maior facilidade de instalação e manutenção, ausência de grandes extensões de cabos submarinos e de sistemas de fixação complexos, visto que a possibilidade de aproveitar a estrutura existente causará reduções significativas no investimento (CRUZ; SARMENTO, 2004).

Tabela 5 - Custos de operação e manutenção, da energia gerada e da potência instalada para usinas de geração a partir de ondas baseadas nas tecnologias Osprey, Limpet, Pelamis e Coppe, para uma taxa de retorno de 15% e período de amortização de 20 anos

ITEM	OSPREY	LIMPET	PELAMIS	COPPE
Custo O&M	3%	1,5 a 2,7%	8%	9,6%
Custo [US\$/kWh]	12,857	16,826	0,180	0,103
Custo [US\$/MW]	3.035.190	2.804.252 a 5.278.592	5.278.648	2.820.000
Potência nominal [MW]	2	0,5	0,75	0,5
Capacidade instalada [MW]	20	20	20,25	20

Os aparelhos pré-selecionados estão num estágio avançado de desenvolvimento, (exceto o protótipo da COPPE, que se encontra em fase de testes), e apresentam eficiência em torno de 35%, no item modo de conversão da energia e disponibilidade superior a 95% (THORPE, 1999).

Após uma seleção em fase preliminar, a escolha entre as alternativas foi efetuada buscando o menor custo médio de geração (CMG), conforme o Manual de Inventário Hidrelétrico (ELETROBRÁS, 2007). A tabela 5 apresenta um resumo das comparações técnico-econômicas para as quatro alternativas que foram pré-selecionadas. Os resultados indicam que a escolha deve recair sobre o protótipo em desenvolvimento pela COPPE, que apresenta custo de US\$ 0,103/kWh.

CONCLUSÕES

A análise do conjunto de dados referentes aos meses de fevereiro a Junho apresentou os maiores resultados de recurso energético, especialmente para o mês de maio (14,2 kW por metro de frente de onda). Os meses de julho a janeiro apresentaram resultados mais moderados (entre 4,02 kW/m a 9,5 kW/m), especialmente para o mês de janeiro, onde a média foi de 4,02 kW/m para o período de monitoramento.

Como era esperado, uma análise por estação climática revelou que o outono apresenta o maior resultado (11,6 kW/m e altura significativa de 1,9m). A primavera, por sua vez, apresentou o menor resultado (média de 7,4 kW/m e altura significativa de 1,61m).

A média anual encontrada foi de 8,6 kW/m, superando os resultados obtidos em algumas localidades na costa do Brasil, consideradas mais promissoras do ponto de vista de geração de energia, especialmente em Porto de Pecém na costa do Ceará, onde está prevista a instalação de uma usina de aproveitamento de energia de ondas.

Do estudo realizado concluiu-se que os projetos de energia de ondas que estão em fase inicial de desenvolvimento serão rentáveis se o custo de investimento não for superior a US\$ 4.030,10 por kW instalado. Por outro lado, para os projetos que alcançaram maturidade tecnológica, o investimento máximo não deverá ultrapassar o valor de US\$ 1.452,80/kW, para tornarem-se competitivos com os atuais projetos de centrais eólicas no Brasil.

O dispositivo da COPPE foi selecionado em virtude de possuir os menores custos de geração e de instalação, sendo a alternativa mais competitiva nos aspectos avaliados. Contudo do ponto de vista técnico, o protótipo ainda apresenta algumas áreas de incerteza que só poderão ser sanadas a partir da realização de testes em condições reais de operação. Os testes são primordiais para validar os índices técnico-econômicos aqui apresentados.

O dispositivo OSPREY mostrou-se adequado para ser instalado na zona avaliada neste estudo, atendendo ao requisito de profundidade necessária para instalação. Contudo, esta alternativa tornou-se inviável devido ao seu elevado custo de geração.

De maneira similar, o dispositivo LIMPET que possui o mais elevado custo médio de geração (CMG), não atende à recomendação do Estudo de Inventário da Eletrobrás, que sugere que a alternativa selecionada apresente o menor custo médio de geração (CMG).

A tecnologia PELAMIS requer o maior custo de investimento, sendo projetada para aplicações *offshore*. Essa alternativa foi considerada inviável, pois deve ser instalada a 100 km da costa, (o que implica em um elevado custo de transmissão da eletricidade gerada), com grande possibilidade de sofrer avarias no sistema de transmissão, devido ao fluxo de navios que se dirigem para o Porto de Rio Grande.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. ABEEOLICA, [2010]. Disponível em: <www.abeeolica.org.br>. Acesso em: 23 nov. 2010.

BRYANT, E. *Tsunami*. The underrated hazard. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

COSTA, P. R. Energia das ondas do mar para geração de eletricidade. 2004. Dissertação (Mestrado) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Rio de Janeiro, 2004.

CRUZ, J. M. B. P. SARMENTO, A. J. N. A. *Energia das ondas: introdução aos aspectos tecnológicos, econômicos e ambientais*. Instituto Superior Técnico WEC - Wave Energy Centre. Alfragide, Portugal: Instituto do Ambiente, 2004.

ELETROBRÁS. *Manual de inventário hidrelétrico de bacias hidrográficas*. 3. ed. Brasília, DF: [s.n.], 2007. Disponível em: <<http://www.eletrobras.com/elb/data/Pages/LUMISF99678B3PTBRIE.htm>>. Acesso em: 23 nov. 2010.

GOOGLE EARTH. Disponível em: <earth.google.com>. Acesso em: maio de 2011.

PELAMIS WAVE POWER. Disponível em www.pelamiswave.com. Acessado em: 13 maio 2011.

SILVEIRA, F. L. VARRIALE, M. C. Propagação das

Ondas Marítimas e dos Tsunami. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 22, n. 2, p. 19-208, 2005.

STEFEN, S.; COSTA, P. R.; PINHEIRO, M. M.; RICARTE, E.; MENDES, A.; ESPERANÇA, P. T. Geração de energia elétrica pelas ondas do mar. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE ENERGIA DE ONDAS, 2006, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio De Janeiro: COPPE-UFRJ, 2006.

STRAUCH, J. C. S. Estudo do clima ondulatório em Rio Grande. Rio Grande: Fundação Universidade de Rio Grande, 1999.

THORPE, T. W. *A brief review of wave energy*. Oxfordshire, UK: Harwell Didcot, 1999.

Evaluation And Use Of The Energy Of Ocean Waves On The Coast Of Rio Grande do Sul

ABSTRACT

Harnessing the power of ocean waves is a real opportunity to supply part of the energy demands in different countries. Currently, environmental impacts have limited the increasing use of fossil fuels. Moreover, the high investment costs required for expansion of the current model of power generation constitute a challenging scenario for the coming years. In this scenario, the objective of this study is to evaluate the potential energy of ocean waves on the coast of Rio Grande do Sul. The wave data used in the evaluations were collected in the sea area near the Port of Rio Grande from 1996 to 1999 totaling sixteen months of sea wave monitoring in the region. The data set was processed and grouped month by month and for the four seasons resulting in monthly, seasonal and annual potential energy information. The annual average was found to be 8.6 kW per meter of wave front. A brief economic feasibility study showed that it is feasible to establish a plant for harnessing the energy of waves with similar investment costs for wind farm projects currently being implemented in Brazil. The study also included a technical-economic evaluation of four alternatives for use. The work also presents the most viable alternative to exploit the energy potential identified, indicating that this form of power generation can be used as an important tool in sustainable development of the region.

Keywords: ocean energy , wave energy, potential energy, technical-economic evaluation.