

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO
AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO E APROVEITAMENTO DA ENERGIA DE ONDAS
OCEÂNICAS NO LITORAL DO RIO GRANDE DO SUL**

por

Leandro Eduardo de Assis

Dissertação de Mestrado

Porto Alegre, Abril de 2010.

AVALIAÇÃO E APROVEITAMENTO DA ENERGIA DE ONDAS OCEÂNICAS NO LITORAL DO RIO GRANDE DO SUL

por

Leandro Eduardo de Assis

Engenheiro Mecânico

Dissertação de Mestrado submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, IPH, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

Área de Concentração: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Beluco

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Luiz Emílio Almeida – IPH/UFRGS

Prof. Dr. José Antônio Scotti Fontoura – FURG/RS

Prof. Dr. Paulo Cesar Colonna Rosman – COPPE/UFRJ

Prof. Dr. Airton Cabral de Andrade – PUC/RS

Prof. Dr. André Silveira

Diretor do IPH

Porto Alegre, Abril de 2010.

AGRADECIMENTOS

Ao Deus de toda sabedoria e conhecimento que me direcionou em todos os momentos desta pesquisa, me ajudando a discernir o certo do errado e a enfrentar com coragem todos os desafios, fazendo deles uma oportunidade de crescimento;

Ao professor e orientador Alexandre Beluco pela perseverança incondicional em concretizar este trabalho;

Aos amigos do Núcleo de Tecnologias do Gás – SENAI/RS pelo incentivo e confiança em meu potencial;

Ao Programa de Pós Graduação do Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS pela grande oportunidade de crescimento nos campos acadêmico e profissional;

Aos amigos e irmãos da Igreja Batista Central de Porto Alegre, pelo apoio, amizade e amor demonstrados durante estes anos de convivência;

Aos meus pais, Geraldo e Edna, pelo apoio e amor sem medida, confiando que este trabalho seria concretizado;

A minha irmã, Kelly, pelas palavras de incentivo e expressão de alegria ao ver este sonho realizado.

Os homens aprontam os cavalos para a batalha...

Mas quem dá a vitória é Deus, o Senhor!

Provérbios 21:31

RESUMO

O aproveitamento do recurso energético de ondas oceânicas constitui-se em uma real oportunidade para suprir parte das demandas energéticas em diversos países, visto que algumas localidades possuem notável potencial energético que pode ser aproveitado para geração de energia elétrica.

Atualmente, os impactos ambientais têm limitado o crescente uso dos combustíveis fósseis para geração de calor, trabalho ou energia. Os elevados custos de investimento necessários para expansão do atual modelo de geração de energia, também configuram um cenário desafiador para os próximos anos.

Sob esta perspectiva ambiental e econômica, o objetivo deste trabalho consiste em avaliar o recurso energético de ondas oceânicas e investigar a viabilidade do seu aproveitamento para atendimento das necessidades energéticas causando poucos impactos ambientais.

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 recurso energético 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 atuais projetos de centrais eólicas no Brasil.

O estudo também incluiu uma avaliação técnico-econômica para quatro alternativas de aproveitamento destacando as características técnicas e custos envolvidos na implantação das usinas. O trabalho conclui apresentando a alternativa mais viável para explorar este recurso energético, apontando que esta modalidade de geração de energia pode ser utilizada como importante ferramenta no desenvolvimento sustentável da região.

ABSTRACT

“Assessment and use of energy ocean waves of the south coastine of Rio Grande.”

The exploitation of the ocean wave energy resource is in a real opportunity to meet the demands of energy in several countries, as some localities have considerable potential energy that can be used for generation of electricity.

Currently, the environmental impacts have limited the increasing use of fossil fuels for generation of heat, work or energy. The high cost of investment needed for expansion of the current model of generation of energy, also set a scenario challenging for the next few years.

Under this environmental approach and economic stability, the present study aims to evaluate the use of energy waves and investigate the feasibility of their use to meet energy needs while causing the least environmental impact.

Data from waves used in assessments was collected in the ocean area near the Port of Rio Grande during the years of 1996 to 1999, totaling sixteen months of tracking the maritime unrest in the region. The dataset was treated and grouped month by month with the resulting four seasons of weather information on energy resources listed monthly, seasonally and annually. It found an average of 8,6 kW per meter of the wave front.

A brief study of the economic viability revealed that it would be feasible to establish a plant with waves where the costs of investing in such a project would be comparable to the wind plants in Brazil. The study also covered an technical-economical assessment with four alternatives for use, highlighting the technical characteristics and costs involved in the deployment of plants. The study concludes by presenting a more viable alternative to exploit this energy resource, pointing out that this mode of generating energy can be used as an important tool in the sustainable development of the region.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA E ESTADO ATUAL DO CONHECIMENTO DO TEMA	13
1.2	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E ESTUDO	14
1.3	QUESTÃO DE PESQUISA	17
1.4	PROPOSIÇÕES	17
1.5	OBJETIVOS	18
	1.5.1 <i>Geral</i>	18
	1.5.2 <i>Específicos</i>	18
1.6	ESCOPO DA DISSERTAÇÃO	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1	ORIGEM DAS ONDAS	20
2.2	ONDAS SENOIDAIS	23
2.3	ENERGIA CINÉTICA, POTENCIAL E TOTAL.....	25
2.4	POTÊNCIA DE ONDAS	26
2.5	AGITAÇÃO MARÍTIMA.....	27
2.6	ANÁLISE TEMPORAL	28
2.7	ANÁLISE ESPECTRAL	29
2.8	EXTRAÇÃO DA POTÊNCIA DAS ONDAS	32
3	TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS.....	34
3.1	CLASSIFICAÇÃO DAS TECNOLOGIAS	34
3.2	DISPOSITIVOS COSTEIROS	35
	3.2.1 <i>Dispositivos de coluna de água oscilante (OWC)</i>	35
	3.2.2 <i>Conversor de energia de ondas da COPPE/UFRJ</i>	37
3.3	DISPOSITIVOS PRÓXIMOS DA COSTA	40
	3.3.1 <i>OSPREY</i>	40
	3.3.2 <i>Conversor Oscilante de Translação</i>	41
3.4	DISPOSITIVOS AFASTADOS DA COSTA	42
	3.4.1 <i>Archimedes Wave Swing</i>	42
	3.4.2 <i>Pelamis</i>	43

3.4.3	<i>Wave Dragon</i>	44
4	AVALIAÇÃO DO RECURSO ENERGÉTICO DAS ONDAS	46
4.1	DESCRIÇÃO DO ONDÓGRAFO E DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO.....	47
4.1.1	<i>Descrição geral</i>	47
4.1.2	<i>Especificações do ondógrafo</i>	48
4.2	AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS DE ONDAS	49
4.3	METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO	51
4.3.1	<i>Recurso energético mensal</i>	53
4.3.2	<i>Recurso energético na Primavera, Verão, Outono e Inverno</i>	54
4.3.3	<i>Recurso energético sazonal e anual</i>	55
5	ANÁLISE ECONÔMICA E SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS PARA O APROVEITAMENTO	56
5.1	CONDIÇÕES DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	56
5.2	ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA O APROVEITAMENTO	60
5.2.1	<i>Estudos preliminares: Comparação Técnico-Econômica das alternativas</i>	60
5.2.2	<i>Dispositivo de Coluna de água oscilante (OWC OSPREY)</i>	63
5.2.2.1	Considerações técnicas.....	63
5.2.2.2	Considerações econômicas da OWC OSPREY	64
5.2.3	<i>Dispositivo LIMPET</i>	67
5.2.3.1	Considerações técnicas.....	67
5.2.3.2	Considerações econômicas do Dispositivo LIMPET	68
5.2.4	<i>Protótipo da COPPE/UFRJ</i>	70
5.2.4.1	Considerações técnicas.....	70
5.2.4.2	Considerações econômicas do Protótipo.....	70
5.2.5	<i>Dispositivo PELAMIS</i>	71
5.2.5.1	Considerações Técnicas	71
5.2.5.2	Considerações econômicas do Dispositivo PELAMIS	71
5.2.6	<i>Alternativa selecionada para o aproveitamento</i>	72
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	75
6.1	CONCLUSÕES.....	75
6.2	RECOMENDAÇÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
6.3	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

LISTA DE SÍMBOLOS

Caracteres Romanos

a	Amplitude da onda;	
a	Custo anual do capital;	[USD\$/ano]
b	Custo unitário de potência instalada,	[USD\$/MW]
b_0	Custo do MW instalado em condições de viabilidade econômica;	[USD\$/MW]
C_g	Velocidade de grupo;	
c	Velocidade de fase ou celeridade;	
C	Capital inicial;	[USD\$/ano]
D_p	Direção de pico;	
E_c	Energia cinética;	
E_p	Energia potencial;	
E_p	Energia de pico;	
E_T	Densidade média de energia total;	
f	Frequência da onda;	[s ⁻¹]
\bar{f}	Frequência média das ondas;	[s ⁻¹]
g	Aceleração da gravidade;	[m/s ²]
G	Proveitos anuais da venda de energia;	[USD\$/MWh/ano]
H	Distância entre cava e crista sucessivas;	
$h,$	Número de horas equivalentes à potência nominal;	
H_s	Altura significativa;	[m]
i	Taxa de juros,	[%]
k	Número de onda;	
m_n	Momento espectral de ordem n;	
m_0	Momento espectral de ordem zero;	
m_1	Momento espectral de primeira ordem;	
m_2	Momento espectral de segunda ordem	
n	Período de amortização;	[anos]
N_0	Número de cruzamentos de zeros ascendentes;	
\vec{k}	Vetor número de onda;	

\bar{x}	Vetor posição;	
$p(x)$	Densidade de probabilidade;	
P^*	Ponta disponível da alternativa de referência;	[kW]
P	Fluxo médio de energia por unidade de comprimento de crista;	[kW/m]
p	Produção média anual de energia elétrica;	[MWh/ano]
P_i	Ponta disponível da alternativa i;	[kW]
$S(f)$	Espectro de frequência ;	
$S(f, \theta)$	Espectro direcional;	
s	Tarifa de venda;	
T_R	Duração do registro;	
\bar{T}_e	Período médio de energia;	[s]
T_R	Tempo de duração do registro;	[s]
\bar{T}_0	Período médio de cruzamento de zeros;	[s]
u	Componente horizontal da velocidade;	
v	Componente vertical da velocidade;	
\bar{T}	Período médio de energia;	[s]
T_p	Período de pico;	[s]

Caracteres gregos

σ_η	Desvio padrão;	
$\eta\{x, t\}$	Elevação da superfície livre;	[m]
ω	frequência angular;	[rad/s]
ρ	Densidade da água do mar;	[kg/m ³]
σ_n^2	Variância da elevação da superfície;	
λ	Comprimento de onda;	[m]

Caracteres Monetários

\$USD	Dólares Americanos;
-------	---------------------

LISTA DE ABREVIATURAS

<i>AWS</i>	Archimedes Wave Swing;	
<i>CAI_i</i>	Custo anual de investimento da alternativa i;	[USD\$/ano]
<i>CMG_i</i>	Custo médio de geração da alternativa i;	[USD\$/MWh]
<i>CRE</i>	Custo de referência de energia;	[USD\$/MWh]
<i>CRE_S</i>	Custo de referência da energia secundária;	[USD\$/MWh]
<i>CRP</i>	Custo de referência de ponta;	[USD\$/kW/ano]
<i>CO&M_i</i>	Custo anual de operação e manutenção da alternativa i;	[USD\$/ano]
<i>EF*</i>	Energia firme da alternativa de referência;	[MW]
<i>EF_i</i>	Energia firme da alternativa i;	[MW]
<i>ES*</i>	Energia secundária da alternativa de referência;	[MW]
<i>ES_i</i>	Energia secundária da alternativa i;	[MW]
LIMPET	Land Installed Marine Power Energy transmitter	
OPD	Ocean Power Delivery;	
OSPREY	Ocean Swell Powered Renewable Energy;	
OWC	Coluna de água oscilante;	
PELAMIS	Conversor de Energia de Ondas Flutuante	
PCH'S	Pequenas centrais hidrelétricas;	
O&M	Custo de Operação e Manutenção	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Mecanismos de transferência de energia para as ondas.....	21
Figura 2.2: Distribuição aproximada da energia superficial e classificação de ondas oceânicas.....	22
Figura 2.3: Representação de uma onda senoidal com comprimento de onda λ e altura H	23
Figura 2.4: Elemento de fluido de altura dz , comprimento dx e de largura unitária.....	25
Figura 2.5: Processo de formação da agitação marítima.....	27
Figura 3.1: Funcionamento de uma OWC e Central piloto europeia da ilha do Pico, Açores.....	36
Figura 3.2: Montagem da turbina eólica da central LIMPET, na ilha de Islay, Escócia.....	37
Figura 3.3: Central LIMPET em operação na ilha de Islay, Escócia.	37
Figura 3.4: Usina de ondas concebida na COPPE.....	38
Figura 3.5: Flutuadores e bombas hidráulicas instalados em quebra mar.	38
Figura 3.6: Conjunto câmara hiperbárica, turbina hidráulica e gerador elétrico.....	39
Figura 3.7: OSPREY com suporte para inclusão de uma turbina eólica.....	41
Figura 3.8: Conversor oscilante de translação de ondas.....	41
Figura 3.9: AWS. Esquema de funcionamento do sistema.	43
Figura 3.10: Ilustração do dispositivo AWS e Central piloto rebocada do porto de Viana do Castelo.....	43
Figura 3.11: Protótipo de 750 kW em construção e operando em alto mar.	44
Figura 3.12: Parque offshore de energia de ondas com dispositivos Pelamis.....	44
Figura 3.13: Esquema de funcionamento do Wave Dragon.....	45
Figura 3.14: Wave Dragon. Protótipo em testes no laboratório.....	45
Figura 3.15: Wave Dragon. Protótipo em testes no mar.	45
Figura 4.1: Lançamento do ondógrafo direcional em Rio Grande em outubro de 1996.....	47
Figura 4.2: Localização do ondógrafo em Rio Grande/RS.	48
Figura 4.3: Espectro direcional representado em 3 dimensões.	50
Figura 4.4: Exemplo de distribuição de potência por intervalo de frequência para ondas em águas profundas no Atlântico.....	52
Figura 4.5: Média do recurso energético sazonal e anual referente aos anos de 1996 a 1999 para um conjunto de 10.921 observações.	55
Figura 5.1: Queda dos custos de capital para uma turbina eólica offshore.	64
Figura 5.2: Queda dos custos de capital para 10 aparelhos OSPREY em M\$USD.	65
Figura 5.3: Eficiência de captura de um dispositivo OSPREY em ondas monocromáticas.....	65
Figura 5.4: Influência da taxa de desconto no custo de geração do dispositivo OSPREY.....	66
Figura 5.5: Taxa interna de retorno para o dispositivo OSPREY.	67
Figura 5.6: Composição dos custos de investimento total para o dispositivo LIMPET.....	68
Figura 5.7: Efeito da taxa de desconto nos custos da eletricidade para o dispositivo LIMPET.....	69
Figura 5.8: Efeitos dos preços da eletricidade na taxa interna de retorno para o dispositivo LIMPET.	69

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1: Especificações do Ondógrafo Direcional Waverider.	49
Tabela 4.2: Planilha gerada pelo software de animação.....	51
Tabela 4.3: Valores médios de \overline{H}_s (m), \overline{T}_e (s) e Potência (kW/m) obtidos para os meses de Janeiro, Fevereiro e Março de 1996 a 1999.....	53
Tabela 4.4: Valor médios de \overline{H}_s (m), \overline{T}_e (s) e Potência (kW/m) obtidos para os meses de Abril, Maio e Junho de 1996 a 1999.....	53
Tabela 4.5: Valor de \overline{H}_s (m), \overline{T}_e (s) e Potência (kW/m) obtidos para os meses de Julho, Agosto e Setembro de 1996 a 1999.....	53
Tabela 4.6: Valores médios de \overline{H}_s (m), \overline{T}_e (s) e Potência (kW/m) obtidos para os meses de Outubro, Novembro e Dezembro de 1996 a 1999.....	54
Tabela 4.7: Valores de \overline{H}_s (m), \overline{T}_e (s) e Potência (kW/m) obtidos durante a Primavera e Verão de 1996 a 1999.....	54
Tabela 4.8: Valores de \overline{H}_s (m), \overline{T}_e (s) e Potência (kW/m) obtidos durante o Outono e Inverno de 1997 a 1999.....	54
Tabela 5.1. Investimento por unidade de potência instalada obtido através do método da anuidade.	58
Tabela 5.2. Investimento por unidade de potência instalada obtido através do método da anuidade para projetos de energia das ondas para uma tarifa correspondente a tecnologia em fase inicial e em fase final de desenvolvimento.....	59
Tabela 5.3. Parâmetros do dispositivo OSPREY.	66
Tabela 5.4. Saída anual de energia da turbina eólica.....	66

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresentará uma breve visão do estado atual do conhecimento sobre a avaliação e aproveitamento de recursos energéticos de ondas oceânicas, bem como os principais sistemas de aproveitamento de energia de ondas para introduzir o tema desta dissertação. Os objetivos deste trabalho serão apresentados na seção 1.3 ao final do capítulo.

1.1 Justificativa e Estado atual do conhecimento do tema

Mesmo que as primeiras patentes de sistemas para aproveitamento da energia das ondas tenham aparecido no final do século XVIII, apenas a meados do século XX, no Japão, apareceu a primeira aplicação industrial com a utilização da energia das ondas em bóias de sinalização marítima. Contudo, o desenvolvimento de tecnologia de aproveitamento de energia das ondas para a produção de energia elétrica em mais larga escala teve início anos mais tarde, a meados da década de 1970, na seqüência do primeiro choque petrolífero. Desde então tem havido um esforço mais ou menos continuado, em diversas partes do mundo, nomeadamente na Europa (Reino Unido, Noruega, Dinamarca, Suécia, Portugal e Irlanda), Ásia (Japão, China, Índia e Austrália) e América (Estados Unidos e México), visando a substituição gradativa dos combustíveis fósseis (FALCÃO, 2004).

Esse esforço iniciou-se com investigação de natureza fundamental (teórica e experimental) e prosseguiu com investigação cada vez mais aplicada, até aos dias de hoje, em que ocorrem os primeiros testes com protótipos em alto mar.

Atualmente, diversas tecnologias de extração de energia de ondas encontram-se em fase de teste no mar. Aqui citamos algumas:

1. Coluna de água oscilante (OWC);
2. Archimedes Wave Swing (AWS);
3. Pelamis;
4. Wave Dragon.

Predomina uma convicção de que a tecnologia de aproveitamento de energia das ondas está numa fase de perceptível evolução, que poderá estar concluída dentro de poucos anos,

sendo este o intervalo de tempo disponível para que empresas ou nações se interessem pelo seu desenvolvimento.

Estudos desenvolvidos no Reino Unido sobre o potencial energético disponível nos oceanos indicam valores da ordem de 1 TW, o que significa a possibilidade de suprir toda a demanda energética do planeta. Embora o aproveitamento de toda a energia disponível nos oceanos na forma de ondas seja praticamente impossível, a conversão em eletricidade de uma pequena fração deste enorme potencial energético pode ter grande significado para os países que dominarem esta tecnologia. No caso do Brasil, embora as alturas de onda típicas não apresentem valores energéticos dos mais elevados, sua regularidade e a pouca ocorrência de fenômenos ambientais com capacidade de destruição dos equipamentos de conversão indicam a possibilidade de um aproveitamento economicamente viável, dependendo da tecnologia empregada (ESTEFEN, 2004).

1.2 Definição do Problema e Estudo

A principal causa dos impactos ambientais que se verificam hoje em dia está relacionada ao uso indiscriminado dos combustíveis fósseis. Independentemente do grau de desenvolvimento do país, o uso destes combustíveis, seja para a geração de energia elétrica, produção de calor ou força mecânica, ainda é dominante na matriz energética da maioria das nações (GARCIA, 2004). Desta forma, uma maior utilização de energias renováveis proporcionaria grandes benefícios ambientais, abrindo espaço, também, para o desenvolvimento tecnológico e a produção de novos conhecimentos na área energética (SANTOS, et al., 2006).

Pode-se definir a energia renovável como aquela que é obtida a partir de fontes naturais, estando disponível de forma cíclica.

As fontes de energia sofreram uma grande mudança nos últimos 150 anos. A maior parte da energia consumida no século XIX era em forma de biomassa – lenha, carvão e resíduos agrícolas – também conhecidos como fontes tradicionais de energia. A produção e o uso do carvão expandiram-se rapidamente no final do século XIX, fazendo do carvão a principal fonte de energia mundial durante cerca de 70 anos, iniciando-se por volta de 1890. Em meados do século XX, a produção e uso do petróleo rapidamente se aceleraram, tornando-o a fonte de energia dominante durante os últimos 40 anos. Além disso, tanto o uso do gás natural quanto o da energia nuclear cresceram rapidamente nos últimos 25 anos.

Os combustíveis fósseis respondem por cerca de 80% do fornecimento global de energia atualmente. Entre os combustíveis fósseis, o petróleo é responsável pela maior fatia e

responde por cerca de 35% do fornecimento global de energia. O carvão é responsável por cerca de 23% e o gás natural por cerca de 21% do total. As fontes de energia sustentável respondem por cerca de 14% do fornecimento global, mas a maior parte delas está em forma de fontes tradicionais. As modernas fontes de energia renovável, incluindo as hidroelétricas e eólica, bem como modernas formas de bioenergia, respondem por cerca de 4,5% do fornecimento total. A energia nuclear fornece os 6% restantes do fornecimento global (UNPD, 2000).

Segundo SANTOS et al., 2006, o Brasil apresenta expressiva participação das fontes renováveis na matriz energética, obtendo larga vantagem em relação aos países desenvolvidos. Enquanto nos países industrializados a participação da energia renovável atinge 6%, no Brasil o percentual alcança 46,9%. Tal fato decorre, dentre outros fatores, da pequena utilização da energia nuclear e da significativa participação da biomassa e da hidroeletricidade na oferta total de energia do país.

A construção de usinas termelétricas, oleodutos e gasodutos, além de outros equipamentos para o fornecimento de energia são capital intensivos. Análises mostram que, se o uso mundial de energia continuar a crescer na ordem de 2% ao ano, investimentos em fornecimento de energia da ordem de US\$ 11-13 trilhões serão necessários, no período de 2000 - 2020, e US\$ 26-35 trilhões adicionais serão necessários, no período de 2020 - 2050 (GELLER, 2003).

Será especialmente problemático levantar grandes somas de capital para expandir o fornecimento de energia em países em desenvolvimento e de economias de transição (NAKICENOVIC, 2000).

A queima de combustíveis fósseis causa poluição interna e externa do ar e isto está prejudicando a saúde pública e desequilibrando ecossistemas. A poluição interna do ar está relacionada à emissão de particulados no interior de ambientes tais como residências, apartamentos, escritórios, etc. Enquanto que a poluição externa do ar é ocasionada por emissões dos processos industriais, queima de combustíveis fósseis ou outras atividades que liberam gases diretamente para a atmosfera.

As atividades energéticas correspondem por 85% das emissões de dióxido de enxofre, 45 % da emissão de particulados, 41% de emissões de chumbo, 40% das emissões de hidrocarboneto e 20% das emissões de óxido nitroso na atmosfera (HOLDREN e SMITH, 2000). Esses poluentes do ar, por sua vez, resultam em chuva ácida, neblina com fumaça nas cidades, além de fuligem. A queima de combustível fóssil é também a maior fonte de geração de produtos químicos tóxicos conhecidos como causadores de câncer.

A contaminação do meio ambiente pode ser especialmente nociva em regiões com grande produção de energia. O Cazaquistão, por exemplo, é um grande produtor de petróleo, gás natural, carvão e urânio. Mas também apresenta grave poluição do ar, contaminação do solo e poluição tanto da água da superfície quanto da subterrânea (DAHL e KURALBAYEVA, 2001). A poluição vem afetando severamente o mar Cáspio e seus ecossistemas.

Tão grave quanto à poluição externa do ar em muitos países em desenvolvimento, a poluição interna do ar, causada pela queima de lenha, resíduos agrícolas ou gás no interior de residências para cozinhar e aquecer, é um perigo ainda maior para a saúde.

Em Porto Alegre, capital do Rio Grande do Sul, análises de gases comprovaram que em algumas residências, o índice de monóxido de carbono oriundo da combustão em aquecedores de água a gás são superiores aos limites estabelecidos pela regulamentação específica do INMETRO, podendo ocasionar morte por intoxicação (ASSIS e HACKBART, 2006).

Na África do Sul, residências rurais que queimam lenha para cozinhar e aquecer o ambiente apresentam níveis de particulado internos 13 vezes maiores que o nível máximo recomendado pela Organização Mundial da Saúde - OMS. A pesquisa epidemiológica mostra que indivíduos expostos a tal nível de material particulado têm cinco vezes mais riscos de contrair doenças respiratórias se comparados àqueles que vivem sob condições normais (SPALDING-FECHER, et. al., 2000).

O dióxido de carbono e o metano são responsáveis por cerca de 80% do aquecimento ocorrido desde a era pré-industrial devido às emissões de gases de longa residência atmosférica. As atividades relacionadas à energia também resultam em emissão de sulfatos, particulados e na formação de ozônio na troposfera, o que também vem a contribuir para o aquecimento global.

O aquecimento global começa a apresentar uma série de impactos adversos. Entre eles, uma ocorrência mais freqüente e extrema de problemas climáticos, como secas, enchentes e ondas de calor, que, por sua vez, causam mortes, danos materiais e perdas agrícolas. A continuarem as atuais tendências de fornecimento e de demanda de energia, sofreremos um aquecimento global dramático durante o século XXI (NAKICENOVIC, 2000).

Segundo ROGNER e POPESCU, 2000, o desenvolvimento da energia sustentável deveria ser capaz de fornecer serviços adequados de energia para satisfazer as necessidades humanas básicas, melhorando o bem estar social, além de desenvolver um bem estar econômico em todo o mundo. O desenvolvimento de energia sustentável por essência, não põe em risco a qualidade de vida das gerações atuais nem a das futuras gerações, além de não ameaçar ecossistemas críticos.

A expansão do uso de energias renováveis pode ajudar a diversificar os suprimentos de energia, estimular novos negócios e contribuir para o desenvolvimento econômico e social das diversas regiões do Brasil, além de proporcionar uma melhora da qualidade atmosférica e da saúde pública, oferecendo diversas vantagens ambientais quando comparadas às fontes tradicionais de geração de energia (GELLER, 2003).

Sob estas perspectivas ambientais, econômicas e de saúde pública, as usinas a partir de ondas oceânicas podem contribuir no atendimento das necessidades energéticas causando poucos impactos ambientais, sem poluição externa e interna do ar, com capitais de implantação, manutenção e operação competitivos quando comparados aos projetos de centrais eólicas mais caros (CRUZ e SARMENTO, 2004).

1.3 Questão de Pesquisa

De acordo com o problema de pesquisa apresentado acima, o presente trabalho tem como questão de pesquisa principal:

“Qual o recurso energético disponível no litoral do Rio Grande do Sul que pode ser aproveitado para geração de eletricidade?”

Para dar um direcionamento mais preciso ao desenvolvimento da pesquisa foram elaboradas questões de pesquisa secundárias, que estão apresentadas abaixo:

- Como avaliar o recurso energético disponível em ondas oceânicas?
- Que tecnologia de extração poderá ser empregada no aproveitamento deste recurso energético?
- Qual a viabilidade econômica desta modalidade de aproveitamento de energia?

1.4 Proposições

No desenvolvimento deste estudo será levado em consideração o pressuposto de que existe a possibilidade de aproveitar o recurso energético das ondas oceânicas no litoral do Rio Grande do Sul, mediante a utilização de uma tecnologia de extração adequada ao regime de ondas da região.

Com o intuito de dar foco a pesquisa e aumentar a confiabilidade dos resultados, são colocadas as seguintes proposições, que estão diretamente relacionadas às questões de pesquisa secundárias apresentadas acima:

- A utilização de instrumentação específica para efetuar a aquisição de dados de ondas é viável para gerar informações que serão utilizadas na avaliação do recurso energético disponível. Esta instrumentação específica consiste em um ondógrafo direcional, um sistema de aquisição e um software para tratamento dos dados;
- A tecnologia de extração de energia será selecionada em conformidade com o dados de ondas da região, ou seja, levando-se em consideração o período e altura de ondas, o conteúdo energético e a profundidade de instalação dos equipamentos. Adicionalmente, serão avaliados os aspectos econômico-energéticos para aproveitamento deste recurso, a saber: os custos de manutenção e operação, de instalação e de geração da energia.
- A viabilidade para implantação de uma usina de ondas será revelada mediante um breve estudo de viabilidade econômica, onde as alternativas de geração eólica e de ondas oceânicas serão comparadas, quanto aos aspectos de investimentos iniciais, custos de operação e manutenção, períodos de amortização e indicadores de retorno dos investimentos.

1.5 Objetivos

1.5.1 Geral

Avaliar o recurso energético de ondas oceânicas no litoral do Rio Grande do Sul, a partir de dados *in situ* e apresentar alternativas tecnológicas para o seu aproveitamento, considerando as atuais condições da região e suas perspectivas a médio e longo prazo.

1.5.2 Específicos

Constituem objetivos específicos deste trabalho:

1. Compilar e sistematizar um material técnico atualizado sobre energia de ondas, através de uma revisão do estado de desenvolvimento destas tecnologias;

2. Avaliar o recurso energético das ondas oceânicas e quantificar as energias mensal, sazonal e anual disponível;
3. Realizar uma análise econômica preliminar para implantação de uma usina de ondas, comparando-a com a modalidade de geração eólica;
4. Avaliar algumas alternativas tecnológicas possíveis de serem empregadas no aproveitamento do recurso energético disponível, apontando os investimentos requeridos para a implantação das opções avaliadas.
5. Indicar a tecnologia mais adequada considerando aspectos econômico-energéticos para o aproveitamento do recurso dentre as tecnologias avaliadas neste estudo.

1.6 Escopo da dissertação

Apresenta-se a seguir o detalhamento da composição do estudo, distribuído ao longo de seis capítulos:

O primeiro capítulo descreve o estado atual de conhecimento e importância do tema; a problemática que o trabalho propõe responder e os objetivos da dissertação.

No segundo capítulo são desenvolvidos aspectos teóricos do aproveitamento da energia das ondas, tais como: origem das ondas, o movimento, energia, potência, extração de energia e descreve as classificações existentes para os sistemas de extração de energia.

O terceiro capítulo apresenta as principais tecnologias utilizadas para o aproveitamento dos recursos energéticos, bem como o seu atual estágio de desenvolvimento.

O quarto capítulo apresenta particularidades do processo de aquisição de dados de ondas na zona costeira de Rio Grande, o seu tratamento e a metodologia utilizada para a avaliação do recurso energético, bem como os resultados obtidos para a área de estudo.

O quinto capítulo traz um breve estudo de viabilidade econômica para implantação de uma usina de ondas comparando-a com a modalidade de geração eólica. Na seqüência, avalia algumas alternativas para o aproveitamento do recurso energético, destacando os aspectos técnicos, custos de implantação, manutenção e operação. O capítulo é concluído apontando a alternativa mais viável para explorar o recurso energético da região.

O último capítulo apresenta as conclusões do presente estudo e faz recomendações de aspectos relevantes, identificados durante a pesquisa, para a continuidade dos estudos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo trás uma fundamentação teórica que auxiliará na compreensão das formas utilizadas para a extração e aproveitamento do recurso energético de ondas oceânicas. Primeiramente, será desenvolvida a teoria para ondas em águas profundas e na seqüência, será descrito o tratamento estatístico adotado para os dados coletados em campo. O capítulo será concluído com a apresentação de equações que permitem determinar o fluxo de energia presente no conjunto de dados considerado.

2.1 Origem das ondas

O solo, a água, as árvores e em geral todos os elementos da Terra têm diferentes capacidades caloríficas que motivam que se aqueçam de modos diferentes pela radiação solar, e diferente também é seu processo de resfriamento devido à ausência ou diminuição da radiação. Segundo COSTA, 2004, as ondas do mar são em última análise uma forma de energia solar.

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 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 (GARCIA, 2004).

Conforme os ventos atuam sobre a água dos oceanos, transferem sua energia e provocam a formação de ondas.

Segundo COSTA, 2004, os mecanismos de transferência de energia do vento para as ondas são complexos, podendo-se identificar os seguintes aspectos:

- O ar que escoa sobre a superfície do mar transfere energia através da atuação das 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.

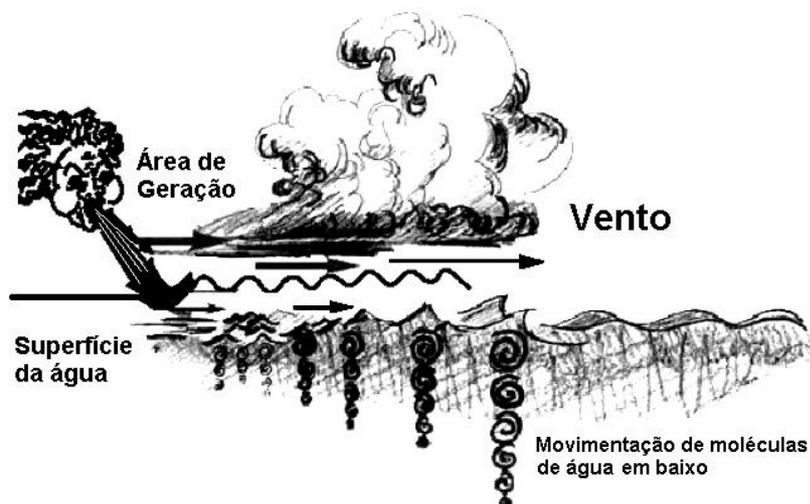


Figura 2.1: Mecanismos de transferência de energia para as ondas.

Fonte: Adaptado de Costa, 2004.

O enrugamento da superfície do mar é originado pelas flutuações da pressão e das tensões tangenciais devidas ao caráter turbulento do vento. A maior rugosidade da superfície do mar produz maior atrito ao vento, o que origina uma transferência mais intensa de energia do vento para a superfície, logo mais energia na camada superficial, o que significa ainda maior rugosidade e ondas também maiores (GONÇALVES, 2003).

A quantidade de energia transferida e a altura das ondas geradas pelo vento dependem não só da intensidade do vento, mas 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/m^2 podem eventualmente se transformar em ondas com níveis de potência acima de 1000 W por metro de comprimento de onda (THORPE, 1999).

As ondas do mar podem ser classificadas por diversos critérios, de acordo com o período ou 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 atmosfera/oceano. O vento transfere energia da atmosfera para o oceano, resultando no movimento irregular da superfície do oceano, 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 tsumamis, 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 japonesa que designa ondas geradas em oceanos, mares, baías, lagos, a partir ou de movimentos sísmicos, ou de vulcanismo, ou de deslizamento de terra submarino, ou de impacto de meteorito, ou até de fenômenos meteorológicos (BRYANT, 2001).

Desta forma, os *tsunami* são *ondas longas*, que em alto-mar possuem entre 10 km e 500 km de *comprimento de onda*. Esta característica torna os *tsunami* muito diferentes das outras ondas, mesmo daquelas que podem ser observadas durante as tempestades (SILVEIRA e VARRIALE, 2004).

Segundo SILVEIRA e VARRIALE, 2004, 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 marítimas*, pois eles somente se fazem sentir na *velocidade de propagação* das ondas na água se o *comprimento de onda* for inferior a centímetro.

No presente trabalho consideram-se as **ondas de gravidade superficiais**, cuja força perturbadora é o vento e a força restauradora é a gravidade, visto serem as que apresentam maior conteúdo energético. A figura a seguir, apresenta a distribuição da densidade de energia por banda de frequência e com as forças restauradoras de acordo com a sua origem, ou seja, a força perturbadora.

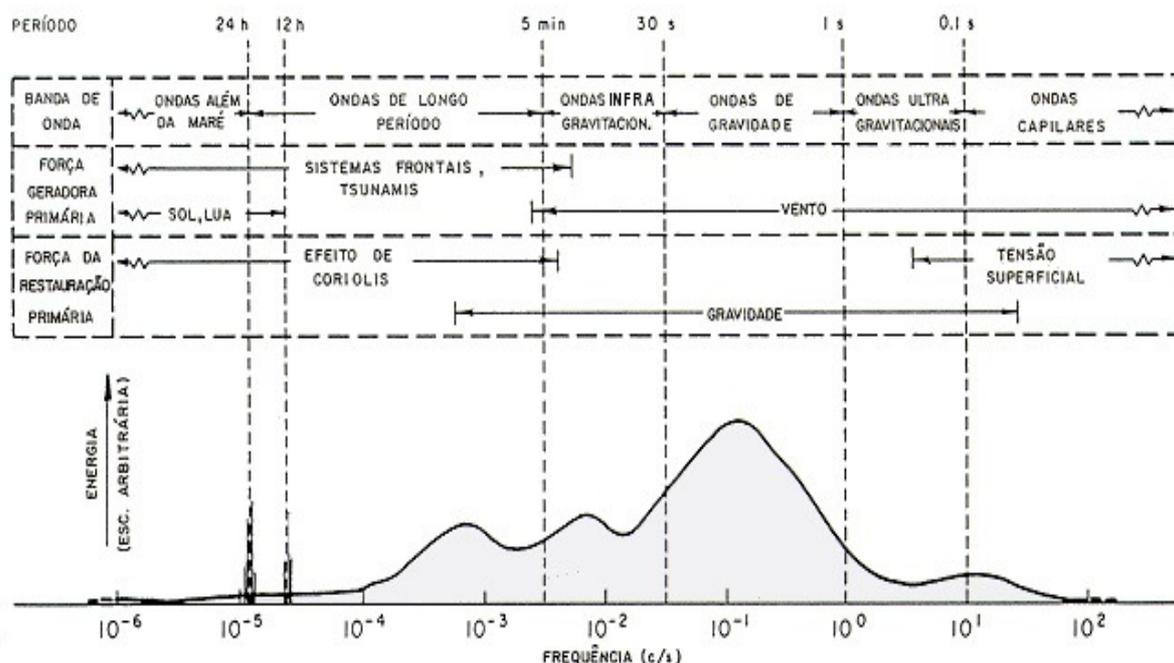


Figura 2.2: Distribuição aproximada da energia superficial e classificação de ondas oceânicas.

Fonte: ALFREDINI, 2000, com adaptações.

Em situações de águas profundas as ondas de superfícies podem propagar-se a grandes distâncias com pequena dissipação de energia. Por esta razão, as ondas que atingem a linha da costa podem ser resultado da atuação do vento sobre grandes áreas do oceano, durante um período de várias horas ou dias.

Segundo DILLENBURG et al., 2004, as ondas de superfície ao se aproximarem da plataforma continental tem a sua altura reduzida devido aos processos de refração e dissipação de energia por atrito com o fundo. Este fenômeno foi constatado ao longo de diversos trechos do Rio Grande do Sul, acentuando-se principalmente nas porções centrais mais reentrantes ao longo da costa.

Devido à elevada variabilidade do vento na zona de geração, a superfície do mar apresenta-se bastante irregular, sendo composta por ondas de diferentes comprimentos e direções. A agitação gerada desta forma denomina-se vaga (wind sea). As ondas que se propagam para fora da zona de geração recebem a denominação genérica de ondulação (swell). Apresentam maior comprimento de onda, adquirindo características mais próximas das de uma onda regular. No mar é usual coexistir os dois tipos de agitação. Os estados de mar com predominância de ondulação apresentam, em geral, um maior conteúdo energético, pelo que serão mais favoráveis para o aproveitamento da energia (GONÇALVES, 2003).

2.2 Ondas Senoidais

Considere-se uma onda senoidal elementar de comprimento de onda λ , período T que se propaga num fluido invíscido e incompressível (oceano) de profundidade constante h ,

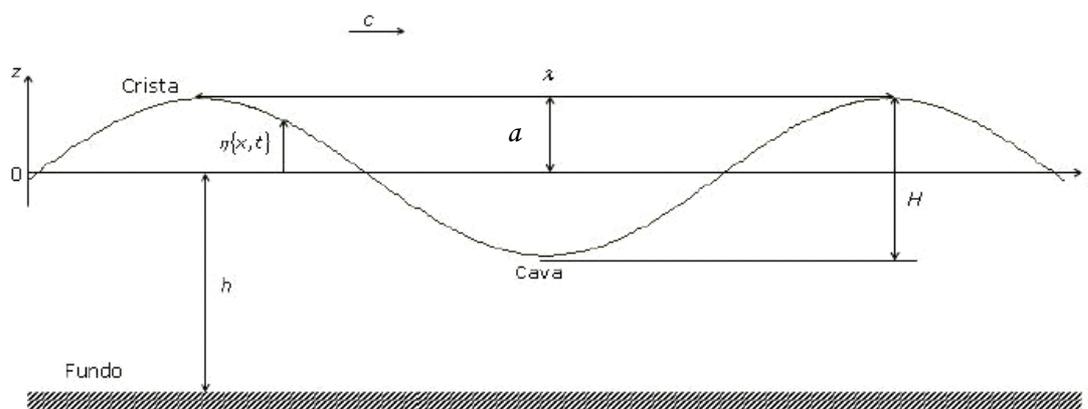


Figura 2.3: Representação de uma onda senoidal com comprimento de onda λ e altura H .

Fonte: Gonçalves, 2003. Com adaptações.

A elevação da superfície é dada por $\eta\{x, t\}$.

A altura H é a distância entre cava e crista sucessivas, o comprimento de onda λ é a distância entre duas cristas (ou duas cavas) sucessivas, o período T é o intervalo de tempo que decorre entre a passagem de duas cristas ou cavas consecutivas no mesmo ponto.

A frequência da onda f é definida como o inverso do período T

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.1)$$

a frequência angular ω defini-se por

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.2)$$

e o número de onda k é dado por

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.3)$$

A velocidade a que se propaga a forma da onda é denominada de velocidade de fase ou celeridade, sendo obtida através de:

$$c = \frac{\lambda}{T} \quad (2.4a)$$

ou

$$c = \frac{\omega}{k} \quad (2.4b)$$

No caso das ondas senoidais a amplitude da onda a é:

$$a = \frac{H}{2} \quad (2.5)$$

definindo-se como a metade da altura H a distância entre a superfície livre e a crista (ou cava). A elevação da superfície livre $\eta\{x, t\}$ pode ser representado por:

$$\eta = a \cos(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t), \quad (2.6)$$

sendo $\vec{x} = x_1 \vec{e}_1 + x_2 \vec{e}_2$ o vetor posição, \vec{k} o vetor número de onda, t o tempo e ω a frequência angular.

2.3 Energia cinética, potencial e total

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:

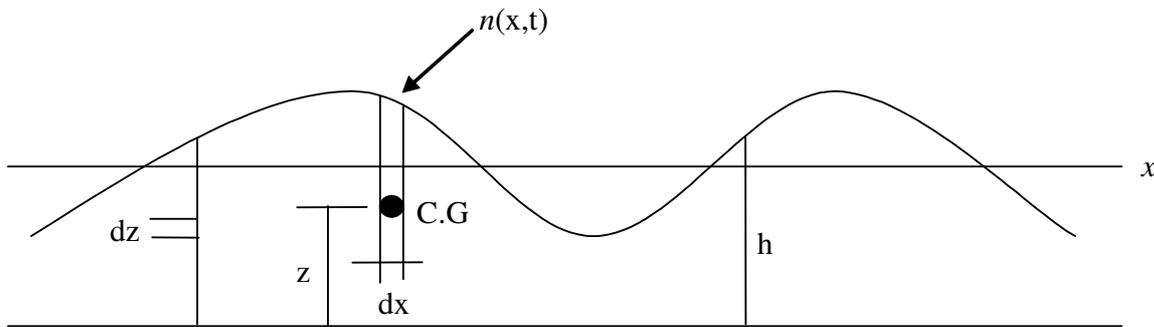


Figura 2.4: Elemento de fluido de altura dz , comprimento dx e de largura unitária.

Fonte: DEAN, 1984. Com adaptações.

Integrando entre a superfície e o fundo obtém-se a energia cinética:

$$E_c = \frac{1}{\lambda} \int_0^\lambda dx \int_{-h}^{\eta} \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2) dz \quad (2.7)$$

Onde u e v são as componentes horizontal e vertical da velocidade das partículas de água. Substituindo estas componentes pelas expressões que as definem em águas profundas:

$$u = a \omega \exp kz \cos(kx - \omega t) \quad (2.8)$$

e

$$v = a \omega \exp kz \sin(kx - \omega t) \quad (2.9)$$

Obtemos a densidade média de energia cinética:

$$E_c = \frac{1}{4} \rho g a^2 \quad (2.10)$$

onde E_c é expresso em $[\text{Nm}/\text{m}^2]$ no Sistema Internacional de Unidades.

A densidade média de energia potencial em relação ao nível médio ($z=0$) é dada por:

$$E_p = \frac{1}{\lambda} \int_0^\lambda dx \int_0^\eta \rho g z dz = \frac{1}{2} \rho g \frac{1}{\lambda} \int_0^\eta \eta^2 dx \quad (2.11a)$$

$$E_p = \frac{1}{4} \rho g a^2 \quad (2.11b)$$

onde E_p é expresso em $[\text{Nm}/\text{m}^2]$ no Sistema Internacional de Unidades.

Usando as expressões (2.10) e (2.11b) a densidade média de energia total para ondas de gravidade é:

$$E_T = E_c + E_p = \frac{1}{2} \rho g a^2 \quad (2.12)$$

onde E_T é expresso em $[\text{Nm}/\text{m}^2]$ no Sistema Internacional de Unidades.

2.4 Potência de ondas

O fluxo médio de energia P 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 através de:

$$P = E_T \cdot c_g \quad (2.13)$$

A densidade média total de energia é dada por (2.12). Desse modo temos:

$$P = \frac{1}{2} \rho g a^2 c_g \quad (2.14)$$

sabendo que a velocidade de grupo c_g é dada por:

$$c_g = \frac{c}{2} = \frac{g}{2\omega} = \frac{gT}{4\pi} \quad (2.15)$$

Pode-se calcular a potência P em águas profundas através de:

$$P = \frac{1}{8\pi} \rho g a^2 T = \frac{1}{32\pi} \rho g H^2 T \quad (2.16)$$

2.5 Agitação marítima

A agitação marítima pode ser considerada, numa aproximação linear, como resultado da soma de várias componentes ondulatórias periódicas, com diferentes amplitudes, frequência, direção e fase, produzindo assim o aspecto irregular da superfície do mar conforme ilustra a figura a seguir:

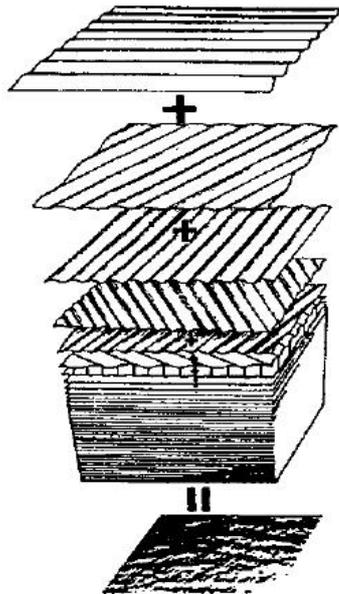


Figura 2.5: Processo de formação da agitação marítima.

Fonte: Pierson et al., 1958.

A agitação marítima é um processo estocástico, estacionário e ergódico. O processo estocástico depende de variáveis aleatórias, necessitando de um tratamento estatístico. Já no processo estacionário, os parâmetros estatísticos permanecem invariáveis no decorrer do tempo. Enquanto que no processo ergódico há possibilidade de todas as informações estatísticas serem obtidas a partir de uma única realização.

Assim, o estado do mar pode ser caracterizado por um conjunto de parâmetros que podem ser estimados a partir de um registro temporal da elevação da superfície ou a partir do espectro de variância da elevação da superfície do mar.

A superfície do mar apresenta um comportamento aleatório, sendo caracterizada pela elevação do mar em relação ao nível médio do mar $\eta = \eta(x, y, z)$ e descrita pelo declive da superfície segundo duas direções perpendiculares x e y :

$$\eta_x = \frac{\partial \eta}{\partial x} \text{ e } \eta_y = \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (2.17)$$

A análise dos registros temporais de η pode ser efetuada a partir de dois métodos: análise temporal e análise espectral.

A análise no tempo baseia-se em estatísticas das ondas individuais, calculando separadamente as alturas e os períodos, o que não permite determinar o fluxo de energia que depende destes dois parâmetros. A análise espectral, no caso particular das ondas do mar, permite caracterizar a distribuição da energia de um estado de agitação pelos períodos das diferentes ondas elementares em que o mesmo pode ser decomposto. A seguir, apresentaremos uma breve descrição da análise temporal e espectral.

2.6 Análise Temporal

Considerando as hipóteses apresentadas, o estado do mar pode ser descrito a partir de um registro contínuo no tempo. A variância desse registro contínuo da elevação da superfície do mar, η , define-se por:

$$\sigma_\eta^2 = \frac{1}{T} \int_0^{T_R} \eta^2(t) dt \quad (2.18)$$

sendo T_R a duração do registro; η a elevação da superfície do mar e σ_n^2 a variância da elevação da superfície do mar.

Os parâmetros obtidos a partir deste tipo de análise são a altura significativa H_s , e o período médio de cruzamento de zeros \bar{T}_0 .

O conceito de altura significativa foi idealizado como uma maneira de representar as características verdadeiras da superfície do mar, na forma de ondas monocromáticas. A altura significativa é definida como sendo a média da terça parte das maiores alturas observadas durante um lapso de tempo suficiente para ser representativo do estado do mar.

As alturas individuais das ondas seguem a distribuição de Rayleigh, cuja densidade de probabilidade é dada por:

$$p(x) = \left\{ \frac{\pi x}{2\mu_x^2} \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{x}{\mu_x} \right)^2 \right] \right\} \text{ se } x \geq 0 \quad (2.19)$$

ou

$$p(x) = \{0\} \text{ se } x \leq 0 \quad (2.20)$$

O período médio de cruzamentos de zero \bar{T}_0 , é obtido a partir do número de cruzamentos de zeros ascendentes N_0 e da duração do registro T_R , pela expressão:

$$\bar{T}_0 = \frac{T_R}{N_0} \quad (2.21)$$

2.7 Análise espectral

Num determinado estado de mar encontra-se presente uma larga gama de frequências f e de direções θ , contribuindo para a variância ou energia de um sinal aleatório. Assim, a variância σ^2 do espectro direcional $S(f, \theta)$ representa a distribuição da densidade de energia em termos da frequência f e direção θ , que permite descrever o estado de mar:

$$\sigma^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} S(f, \theta) df d\theta \quad (2.22)$$

Algumas vezes não são consideradas as características direcionais e utiliza-se apenas o espectro de frequência ou energia $S(f)$ que resulta da integração de $S(f, \theta)$ em direção e se relaciona com o espectro direcional por:

$$S(f) = \int_0^{2\pi} S(f, \theta) d\theta \quad (2.23)$$

A função $S(f)$ representa a distribuição de energia da onda no domínio da frequência.

A informação contida no espectro direcional é geralmente condensada em parâmetros de altura H , período $T = 1/f$ e direção θ . Estes parâmetros são determinados utilizando-se os momentos espectrais, sendo o momento espectral m_n de ordem n definido por:

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n S(f) df \quad (2.24)$$

Os primeiros momentos espectrais são de especial importância para a descrição espectral de ondas oceânicas. O momento espectral m_0 é definido por:

$$m_0 = \int_0^{\infty} S(f) df \quad (2.25)$$

Onde o m_0 é denominado de momento-zero do espectro. Este parâmetro espectral é utilizado para achar a altura significativa H_s através de:

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (2.26)$$

Como já foi abordado, a altura significativa H_s representa a média de um terço das maiores alturas observadas.

O momento espectral m_1 é definido por:

$$m_1 = \int_0^{\infty} f^1 S(f) df \quad (2.27)$$

Sendo utilizado para determinar a frequência média ou período médio das ondas através de:

$$\bar{f} = \frac{m_1}{m_0} \quad (2.28)$$

Como o período médio \bar{T} da onda é definido por: $\bar{T} = \frac{1}{\bar{f}}$, temos que:

$$\bar{T} = \frac{m_0}{m_1} \quad (2.29)$$

onde \bar{T} é o período médio de energia. Desta maneira, a equação anterior assume a forma:

$$\bar{T} = \bar{T}_e = \frac{m_0}{m_1} \quad (2.30)$$

Segundo GONÇALVES, 2003, a partir deste parâmetro pode-se determinar o fluxo de energia, pois o mesmo depende da banda das baixas frequências do espectro, onde está concentrada a maior parte da energia.

Assim \bar{T}_e torna-se mais estável que o período médio de cruzamentos de zeros \bar{T}_o definido por:

$$\bar{T}_0 = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (2.31)$$

onde \bar{T}_0 representa a média de cruzamentos de zeros ascendentes consecutivos.

Ainda segundo o mesmo autor, a dependência de \bar{T}_0 com m_2 faz com que este período seja muito sensível a parte do espectro que corresponde às altas frequências, apresentando maior variabilidade e reduzido conteúdo energético.

2.8 Extração da Potência das ondas

O potencial energético é caracterizado pelo fluxo de energia por unidade de comprimento de frente de onda que para águas de profundidade constante é:

$$P = \rho g \int_0^{2\pi\infty} \int_0^{\infty} S(f, \theta) c_g(f, d) df d\theta \quad (2.32)$$

que depende do espectro de variância, isto é, da forma do espectro que é característica de cada estado de mar.

Em águas profundas a velocidade de grupo c_g é dada por:

$$c_g = \frac{c}{2} = \frac{g}{2\omega} = \frac{gT}{4\pi} \quad (2.33)$$

Assim, o fluxo de energia defini-se por:

$$P = \frac{\rho g^2}{4\pi} \int_0^{2\pi\infty} \int_0^{\infty} S(f, \theta) f^{-1} df d\theta \quad (2.34)$$

sendo ρ a densidade da água do mar igual a 1025 kg/m³ e g a gravidade local igual a 9,81 m/s².

Dividindo e multiplicando (2.32) por m_0 temos:

$$P[W / m] = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e \quad (2.35)$$

substituindo o termo $\rho g^2/64\pi$ pelo seu respectivo valor ($\rho g^2/64\pi = 490,6$), a potência encontrada em W/m pode ser expressa em kW/m através de:

$$P[kW / m] = 0,4906H_s^2 T_e \quad (2.36)$$

Esta é a equação que será empregada neste estudo para avaliar o recurso energético.

3 TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS

3.1 Classificação das tecnologias

Após décadas de estudos e desenvolvimento surgem na atualidade diferentes soluções capazes de responder ao desafio tecnológico que é representado pela extração de energia das ondas. Estas tecnologias não são concorrentes na atualidade, situação que poderá ser alterada num futuro próximo, tal como não será correto afirmar que estas serão as únicas soluções possíveis, dado o crescente interesse neste domínio e a permanente entrada de novas idéias, empresas e outras instituições nesta área (CRUZ e SARMENTO, 2004). É fundamental estabelecer critérios de classificação das diferentes tecnologias, que poderiam passar, à semelhança de tecnologias de extração de outras formas de energias renováveis, pela potência dos dispositivos.

O critério de classificação adotado na conferência Européia de energia de ondas (WAVENET 2003), prende-se com a distância à costa do dispositivo, agrupando-os da seguinte forma:

1. Dispositivos costeiros (*onshore*);
2. Dispositivos próximos da costa (*near-shore*);
3. Dispositivos afastados da costa (*offshore*).

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 apoiados no fundo do mar, enquanto no segundo caso, rondarão os 50 m e os dispositivos serão flutuantes. Com o aumento da profundidade aumenta a energia disponível para extração, dessa forma, seria extremamente vantajoso do ponto de vista de geração, adotar localidades com grandes profundidades.

Ao classificar os dispositivos de extração de energia de ondas com as expressões "Onshore, near-shore ou offshore" deve-se ter em mente que o fator preponderante é a profundidade evidenciada a essa distância e não o valor da distância à costa em si.

Uma outra forma de classificação é aquela que está associada ao modo de conversão de energia das ondas em energia elétrica, ou seja, o tipo de tecnologia. As principais classes de dispositivos de conversão de energia das ondas, são:

1. Coluna de água oscilante;
2. Corpos flutuantes;
3. Dispositivos de Galgamento;
4. Conversor oscilante de translação de ondas;
5. Dispositivos submersos de diferença de pressão;
6. Dispositivos com Câmara Hiperbárica.

3.2 Dispositivos costeiros

Os dispositivos costeiros são aqueles que se encontram fixos ou que são construídos na raiz da orla costeira. Esta proximidade confere-lhes vantagens imediatas, tais como uma maior facilidade de instalação e manutenção, ausência de grandes extensões de cabos submarinos e de sistemas de fixação complexos (CRUZ e SARMENTO, 2004).

Mas apresentam alguns inconvenientes nomeadamente restrições em termos da sua localização associadas a requisitos de profundidade de água e boa exposição, maior impacto ambiental, sobretudo visual e um nível de potência média das ondas mais reduzido, em relação ao largo, devido aos efeitos dissipativos de energia por rebentação e atrito no fundo. Isto pode ser parcialmente compensado situando os aparelhos em localizações de concentração natural de energia (RHINEFRANK et al., 2005).

De fato os efeitos de dissipação de energia devidos ao atrito, fruto da interação entre a onda e o fundo do mar, manifestam-se para profundidades inferiores a 80m e os associados à rebentação das ondas são dominantes para profundidades inferiores a 10 m, pelo que em média um dispositivo costeiro tem apenas disponível entre 25% e 50% do recurso disponível para um dispositivo afastado da costa (CRUZ e SARMENTO, 2004).

Nesta modalidade de sistemas, a Coluna de água oscilante (OWC) é a tecnologia mais investigada até à presente data com protótipos instalados em vários países, nomeadamente a Escócia, o Japão, a Índia, a China e Portugal. A seguir, descreveremos estes dispositivos:

3.2.1 Dispositivos de coluna de água oscilante (OWC)

Os dispositivos de coluna de água oscilante (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 destas 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.

A seguir, serão apresentados os dois exemplos atuais que melhor ilustram os dispositivos de (OWC) costeiros: a central piloto europeia da ilha do Pico, Açores, e a central LIMPET, na ilha de Islay, Escócia.

A central piloto europeia da ilha do Pico, Açores, foi projetada para gerar 400 kW, sendo o primeiro dispositivo no mundo a introduzir eletricidade produzida pela conversão de energia das ondas numa rede elétrica, embora tal tenha ocorrido apenas pontualmente e durante a fase de ensaios.

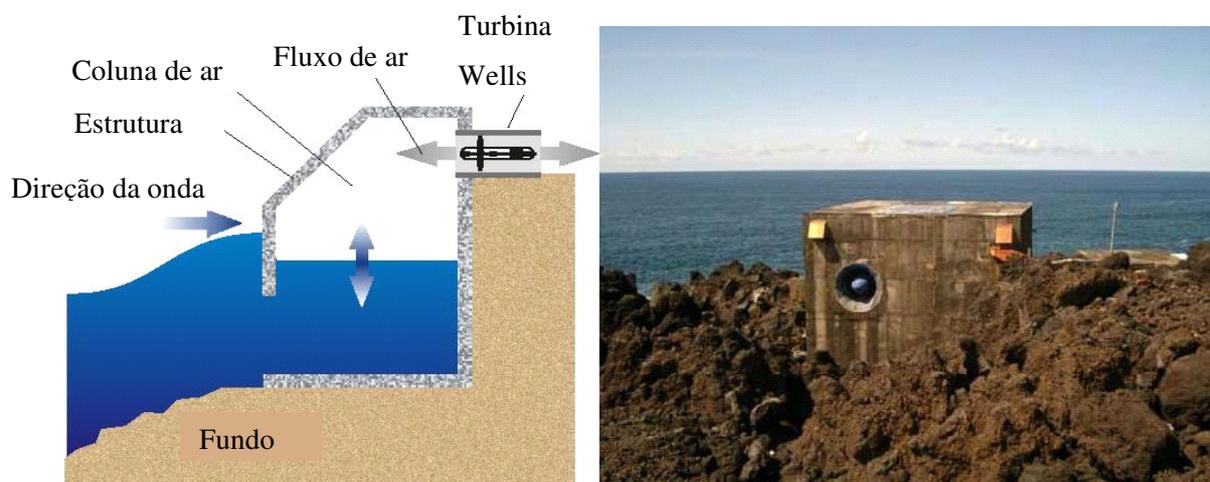


Figura 3.1: Funcionamento de uma OWC e Central piloto europeia da ilha do Pico, Açores.

Fonte: Wave Energy Centre, 2004. Com adaptações.

A central LIMPET foi projetada para gerar uma potência nominal de 500 kW sendo capaz de fornecer eletricidade à cerca de 400 habitações. A central LIMPET (sigla de Land Installed Marine Power Energy Transmitter) surgiu como a continuação natural do sucesso de um protótipo de 75 kW que se encontrava instalado na ilha escocesa de Islay, onde se localiza a central. Foi o primeiro dispositivo de conversão de energia das ondas a ser explorado comercialmente no Reino Unido.



Figura 3.2: Montagem da turbina eólica da central LIMPET, na ilha de Islay, Escócia.

Fonte: <http://www.wavegen.com.uk>. Acesso em Maio de 2009.



Figura 3.3: Central LIMPET em operação na ilha de Islay, Escócia.

Fonte: <http://www.wavegen.com.uk>. Acesso em Maio de 2009.

3.2.2 Conversor de energia de ondas da COPPE/UFRJ

Este dispositivo de conversão de energia das ondas encontra-se em fase de teste no Laboratório de Tecnologia Submarina (LTS), sendo projetado para produzir 50 kW, a ser expandido com a agregação de módulos para atingir 500 kW, suficientes para atender as necessidades de 200 famílias.

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.

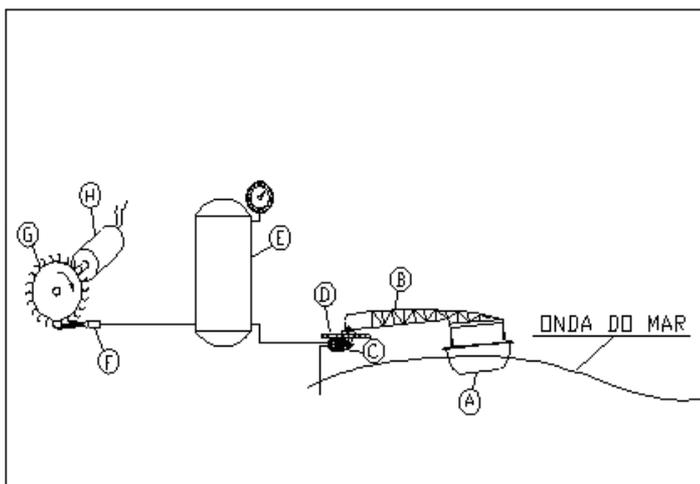


Figura 3.4: Usina de ondas concebida na COPPE.

Fonte: Costa, 2004.

Onde:

A é o flutuador;

B é o braço horizontal de articulação;

C é a bomba hidráulica de movimento alternativo;

D é a plataforma de sustentação e fixação dos equipamentos;

E é a câmara hiperbárica;

F é a válvula reguladora de vazão;

G é a turbina hidráulica;

H, é o gerador elétrico.

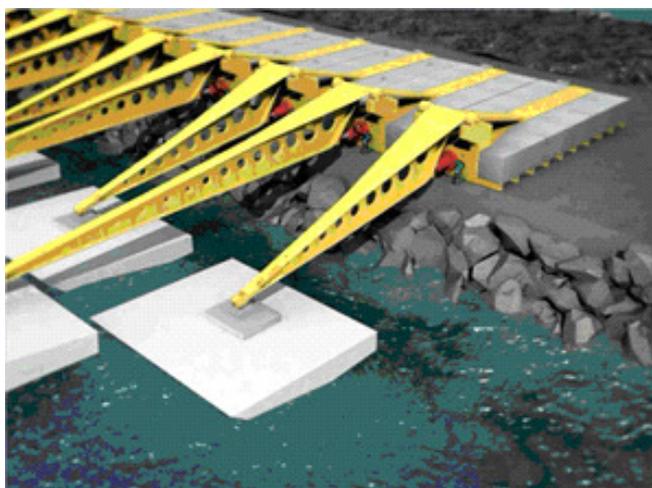


Figura 3.5: Flutuadores e bombas hidráulicas instalados em quebra mar.

Fonte: <http://www.lts.coppe.ufjf.br>. Acesso em Maio de 2009.

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.

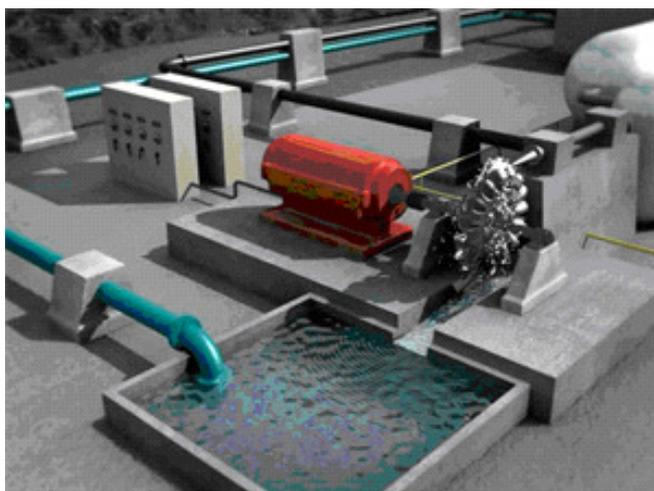


Figura 3.6: Conjunto câmara hiperbárica, turbina hidráulica e gerador elétrico.

Fonte: <http://www.lts.coppe.ufrj.br>. Acesso em Maio de 2009.

A potência hidráulica gerada é proporcional aos valores do produto entre o volume d'água liberado pela válvula controladora de vazão e a pressão existente na câmara hiperbárica durante a operação. Esta pressão atuante substitui uma queda d'água equivalente. Esta usina pode utilizar como reservatório d'água o próprio oceano, ou operar em circuito fechado com água tratada, armazenada num reservatório situado na própria instalação.

Após a sucção e bombeamento para a câmara hiperbárica, a água é então liberada em forma de jato, com alta pressão, para a turbina hidráulica. O ajuste da rotação da turbina é realizado por uma válvula reguladora de vazão volumétrica, ou bico com furo de diâmetro previamente calculado. Esta válvula, resistente a altas pressões, é utilizada também durante a parada da usina para manutenção ou em caso de emergência.

3.3 Dispositivos próximos da costa

Os sistemas near-shore são montados no oceano numa posição entre os sistemas costeiros (onshore) e os sistemas distantes da costa (offshore). Estes sistemas são caracterizados por serem usados para extrair a potência diretamente a partir da zona de rebentação e da água imediatamente além da zona de rebentação. Quando existem objetivos ambientais os aparelhos nearshore podem promover soluções alternativas aos aparelhos onshore (RHINEFRANK et al., 2005).

Os dispositivos do tipo OWC instalados em quebra-mares podem ser englobados nesta categoria, dado que um quebra-mar ou um molhe não constitui uma linha de costa natural. A incorporação de dispositivos nestas estruturas tem vantagens adicionais, pois elas já existem em muitos casos e uma estrutura adicional pode até reforçar o seu objetivo inicial.

Estudos recentes como os apresentados em NEUMANN e SARMENTO, 2000, apontam para a viabilidade econômica das centrais OWC integradas em quebra-mares. Apresentaremos a seguir, outro dispositivo do tipo OWC que pode ser genericamente englobado nesta categoria.

3.3.1 OSPREY

O OSPREY (Ocean Swell Powered Renewable Energy) foi desenvolvido em meados da década de 1990 pela empresa escocesa Wavegen, como sistema isolado de OWC, para ser colocado próximo da costa, em águas de 20 m de profundidade. Era constituído por uma estrutura metálica de parede dupla, que deveria ser rebocada até ao local de instalação, onde seria fundeada através do enchimento das suas paredes ocas, com materiais densos, ficando assente no mar. A ocorrência de um acidente na fase de fundeamento levou à interrupção do projeto. Nos anos seguintes, o projeto foi retomado com a possibilidade de inclusão de uma turbina eólica *offshore*.

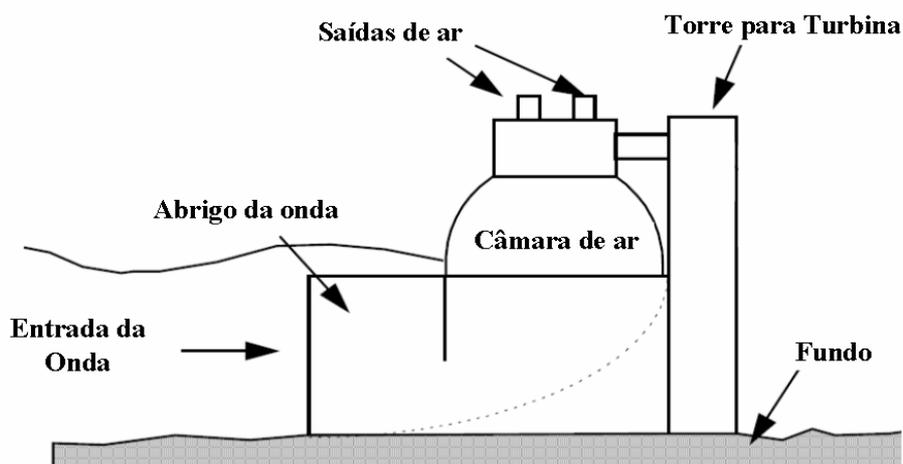


Figura 3.7: OSPREY com suporte para inclusão de uma turbina eólica.

Fonte: Thorpe, 1999. Com adaptações.

3.3.2 Conversor Oscilante de Translação

Os conversores oscilantes de translação das ondas (oscillating wave surge converters - OWSC) são coletores instalados perto da superfície, montados sobre um braço colocado sobre um eixo perto do fundo do mar. O movimento das partículas da água nas ondas provoca a oscilação do braço, sendo que o movimento de translação é aproveitado para geração de energia.

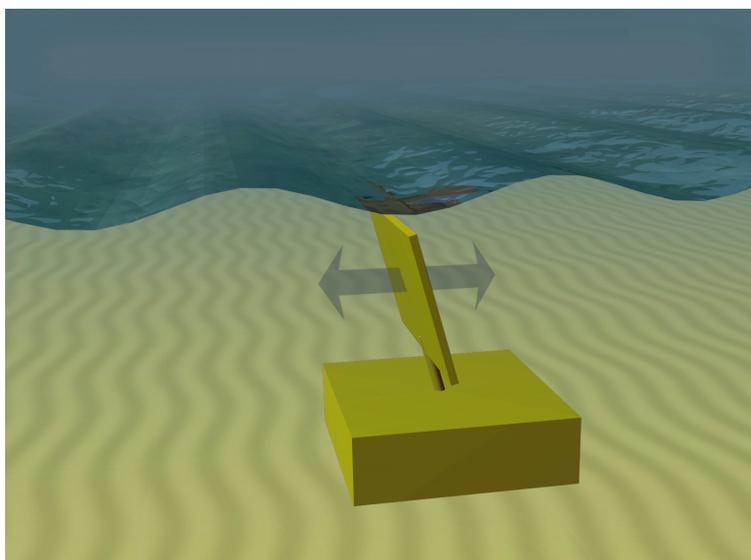


Figura 3.8: Conversor oscilante de translação de ondas.

Fonte: <http://www.aquaret.com> Acesso em Abril de 2010.

3.4 Dispositivos afastados da costa

Os dispositivos de conversão de energia das ondas mais recentes são intitulados de dispositivos de terceira geração, por serem capazes de aproveitar os regimes de ondas mais energéticos, característicos de zonas de elevada profundidade.

Esta classe de aparelhos permite explorar mais plenamente o recurso energético em águas de maior profundidade, apresentando menos restrições quanto à sua localização e têm certamente um menor impacto visual. Contudo, apresentam diversas dificuldades relacionadas principalmente com a sua manutenção, transporte de energia para terra e processos de ancoragem ao fundo (WAVE ENERGY CENTER, 2004).

Os custos e as perdas associados a esta transferência são suplantados por uma maior "produção" de energia, aumentando desta forma a relação Energia Produzida/Custos associados. O conceito generalizado na atualidade passa pela implementação de parques de diversos dispositivos quando o objetivo é a produção de energia elétrica em larga escala (CRUZ e SARMENTO, 2004).

Será dada uma breve descrição acerca do modo de conversão de energia das ondas para os dispositivos Archimedes Wave Swing, Pelamis, Wave Dragon e Mighty Whale destinados para aplicações distantes da costa.

3.4.1 Archimedes Wave Swing

O Archimedes Wave Swing (AWS) é um dispositivo cilíndrico de absorção pontual, completamente submerso com um corpo superior oco (flutuador) que oscila verticalmente sobre uma base fixa também oca. O interior dos dois corpos é preenchido por ar sob pressão, de tal forma que, na ausência de ondas, a pressão do ar interior produz uma força ascendente sobre o flutuador que equilibra o seu peso e a força resultante da pressão hidrostática produzida pela água exterior. Durante a passagem de uma onda, a pressão exterior oscila em torno da pressão hidrostática, provocando a oscilação vertical do flutuador sobre a base num processo em que o ar interior atua como mola pneumática, produzindo uma força vertical de restituição.

O movimento entre o flutuador e a base é utilizado para atuar um gerador de indução linear que liga estas duas partes do AWS, desta forma convertendo diretamente a energia mecânica contida neste movimento em energia elétrica.

O dispositivo AWS relativamente a outros dispositivos apresenta a vantagem de ser completamente submerso, eliminando desta forma possíveis impactos visuais e, por outro lado, evitando a ação destruidora das ondas junto à superfície em mar tempestuoso.

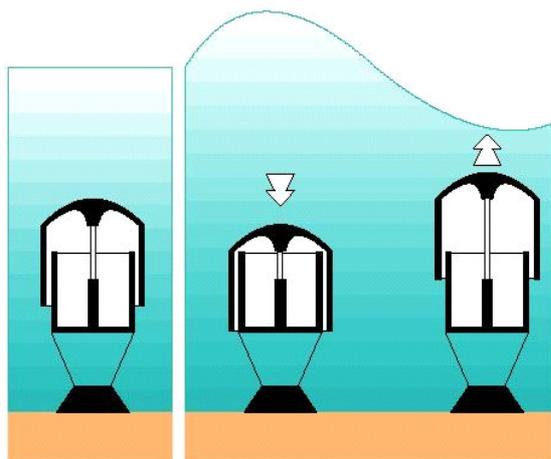


Figura 3.9: AWS. Esquema de funcionamento do sistema.

Fonte: <http://www.waveswing.com>. Acesso em Maio de 2009.

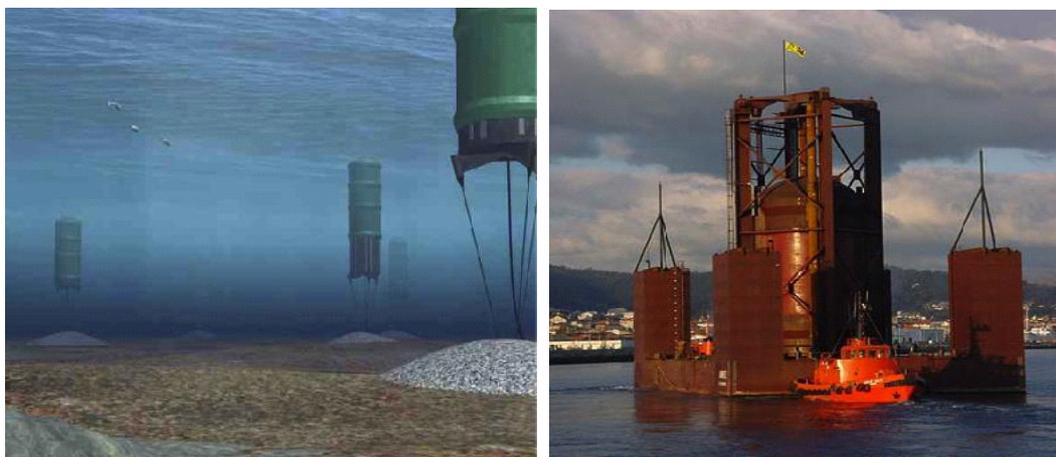


Figura 3.10: Ilustração do dispositivo AWS e Central piloto rebocada do porto de Viana do Castelo.

Fonte: <http://www.waveswing.com>. Acesso em Maio de 2009. Com adaptações.

3.4.2 Pelamis

O Pelamis 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 eletricidade produzida por todas as articulações transportada num único cabo umbilical para um ponto de ligação no fundo.



Figura 3.11: Protótipo de 750 kW em construção e operando em alto mar.

Fonte: <http://www.oceanpd.com>. Acesso em Maio de 2009. Com adaptações.



Figura 3.12: Parque offshore de energia de ondas com dispositivos Pelamis.

Fonte: <http://www.pelamiswave.com>. Acesso em Abril de 2010.

3.4.3 Wave Dragon

O Wave Dragon é um dispositivo flutuante para aplicação no alto mar. O seu princípio de funcionamento baseia-se na acumulação de água num reservatório sobrelevado relativamente ao nível médio da superfície livre do mar. A água acumulada é devolvida ao mar através de turbinas hidráulicas Kaplan de baixa queda que acionam geradores elétricos. A acumulação da água no reservatório sobrelevado produz-se através do galgamento de uma rampa inclinada pela onda. Para aumentar o desnível de galgamento, existem dois refletores parabólicos colocados a montante da rampa que nela concentram a onda incidente.

A estrutura metálica inclui dois concentradores parabólicos, turbinas do tipo Kaplan, os geradores elétricos, os sistemas de aquisição e controle, os sistemas auxiliares e o sistema de amarração.

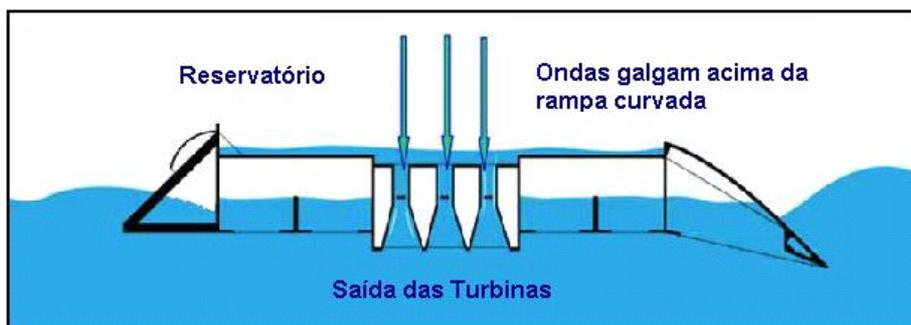


Figura 3.13: Esquema de funcionamento do Wave Dragon.

Fonte: Wave Energy Center, 2004. Com adaptações.



Figura 3.14: Wave Dragon. Protótipo em testes no laboratório.

Fonte: <http://www.wavedragon.net>. Acesso em Maio de 2009.



Figura 3.15: Wave Dragon. Protótipo em testes no mar.

Fonte: <http://www.wavedragon.net>. Acesso em Maio de 2009.

4 AVALIAÇÃO DO RECURSO ENERGÉTICO DAS ONDAS

Para a avaliação do recurso energético das ondas é necessário dispor de dados referentes à altura e ao período das ondas do mar. 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. Estes métodos de obtenção de dados exigem altos custos de investimento, são de difícil execução e podem correr risco de sofrer avarias (GONÇALVES, 2003).

As medições remotas utilizam radares altímetros que transmitem impulsos verticais na banda das micro-ondas, onde o tempo de retorno dos respectivos ecos permite calcular a distância entre o sensor e a superfície do oceano (WALSH, 1979). A forma do impulso de retorno permite efetuar uma estimativa da altura significativa das ondas oceânicas. A estimativa é feita com base na altura das ondas do mar, isto é, ondas com maior altura aumentam o intervalo de tempo que o impulso de retorno leva a chegar à antena.

Os modelos numéricos de agitação marítima permitem calcular, a partir do campo do vento à superfície do mar, série temporais de espectros direcionais nos nós de uma malha regular que cobre a bacia oceânica. Estes modelos são incluídos nas rotinas dos centros meteorológicos e produzem previsões e reconstituições de espectros direcionais a partir dos quais se calculam os parâmetros de altura, período e direção (ZIJLEMA, 2005). Estes modelos devem ser validados a partir de observações efetuadas no campo, especialmente quando os modelos utilizados não levam em conta a presença de ilhas que podem afetar a agitação que atinge as costas de outras ilhas, como acontece nas ilhas de Açores em Portugal (FALCÃO, 1989).

Neste trabalho utilizaram-se medidas *in situ* que foram obtidas através de uma bóia-ondógrafo. Durante o período de aquisição dos dados ocorreram dois sinistros que impossibilitaram uma coleta ininterrupta dos dados de ondas.

A seguir, descreveremos detalhes do sistema de aquisição de dados utilizado neste trabalho; os dados propriamente ditos e o tratamento dos mesmos. Ao final do capítulo serão apresentados os valores médios de energia disponível por mês, por estação climática e anual.

4.1 Descrição do ondógrafo e do sistema de aquisição

4.1.1 Descrição geral

O ondógrafo utilizado consiste em uma bóia de 0,9 m de diâmetro, dotada de acelerômetros capazes de medir com grande exatidão, as acelerações sofridas pela bóia em função do movimento sobre as ondas. As informações de aceleração são transformadas, através de processos matemáticos, em deslocamentos em cada um dos três eixos cartesianos (x,y,z).

A partir da aceleração vertical, obtém-se por dupla integração a elevação da superfície do mar. Por análise de Fourier, e a partir da série temporal da elevação da superfície, calcula-se o espectro de frequência $S(f)$, e a partir deste são calculados os parâmetros das ondas H_s , \bar{T}_0 , T_p e a direção das ondas.

Os dados brutos, em formato digital, são enviados via rádio para uma antena e repassados para um receptor que transcodifica o sinal e o envia para o computador destinado à aquisição dos dados, que posteriormente sofrerão um tratamento estatístico.

O sistema de fundeio do ondógrafo consiste em uma corda vertical ligada num ponto a duas cordas de borracha que garantem suficiente simetria horizontal da bóia, pequenos movimentos e baixas frequências. A bóia também está equipada com um sensor para medição da temperatura da superfície do mar.

Em outubro de 1996, o ondógrafo foi posicionado na batimetria de 15 m e nas coordenadas $32^\circ 10' S$ e $51^\circ 58' W$ na frente do molhe leste da barra do Porto de Rio Grande. Após o fundeio, seguiu-se a obtenção dos dados por praticamente 10 meses ininterruptos, até que em agosto de 1997, durante uma tempestade, rompeu-se o fundeio do ondógrafo, fazendo que o mesmo ficasse a deriva.



Figura 4.1: Lançamento do ondógrafo direcional em Rio Grande em outubro de 1996.

Fonte: Adaptado de STRAUCH, 1999.

Após o resgate, verificou-se que o equipamento estava avariado e sem condições de recuperação. Acionado o seguro, conseguiu-se em janeiro de 1998, instalar um novo equipamento para dar continuidade à coleta do clima ondulatório. Em abril de 1998, uma frente oceânica com características excepcionais, ondas máximas de 7,5 m, ocasionou um novo rompimento das amarras e felizmente após o resgate, verificou-se que o mesmo estava em perfeito estado de funcionamento. O equipamento foi reconduzido ao mar coletando dados até junho de 1999.

Após aproximadamente 16 meses de monitoramento do estado do mar, com uma interrupção em agosto de 1997 e outra em abril de 1998, tem-se uma base preliminar de dados estabelecendo o comportamento das ondas na região de Rio Grande. Estes dados serviram como base para a avaliação de recurso energético das ondas do mar para a zona de Rio Grande.

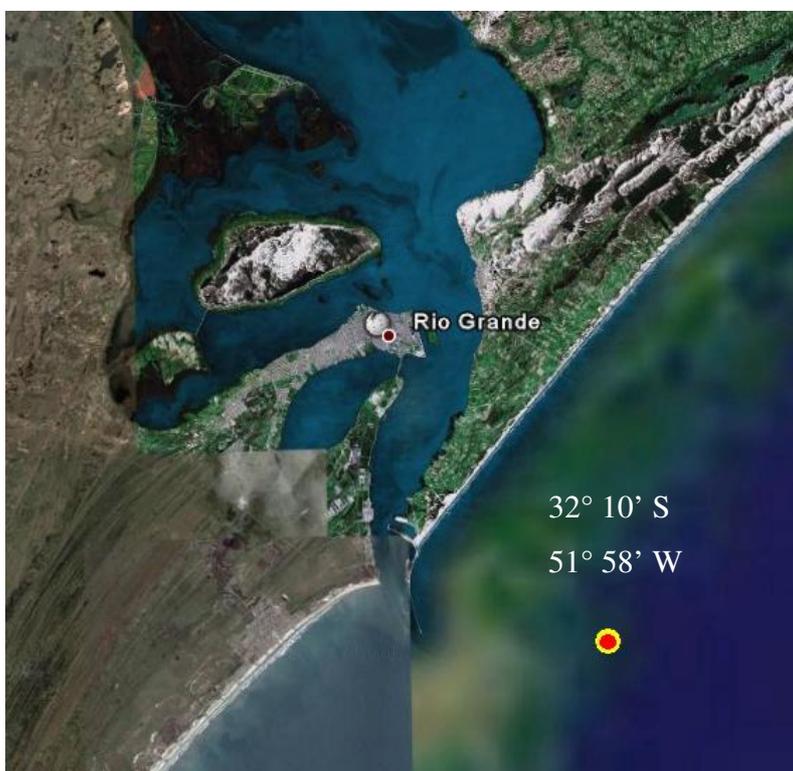


Figura 4.2: Localização do ondógrafo em Rio Grande/RS.

Fonte: <http://earth.google.com>

4.1.2 Especificações do ondógrafo

A seguir são apresentadas as especificações do ondógrafo direcional utilizado no monitoramento das ondas em Rio Grande:

Tabela 4.1: Especificações do Ondógrafo Direcional Waverider.

MEDIÇÃO DA ALTURA	MEDIDA DE DIREÇÃO
Range: -20 a +20 m	Range: 0 a 360°
Resolução: 1 cm	Resolução: 1,5°
Precisão da escala: 3%	Erro de leitura da bóia: 0,5° a 2° (dependendo da latitude)
Período de medição: 1,6s a 30s	Período em condição de flutuação livre: 1,6s a 30s
Off set: < 0,5 m	Período em Condição amarrada: 1,6s a 20s

Fonte: Operation and Service Manual for Direcional Waverider.

O ondógrafo descrito acima foi originalmente instalado para fornecer dados necessários à obra de recuperação e ampliação dos molhes do Porto de Rio Grande. Os dados coletados e tratados geraram informações relativas à direção de propagação, altura significativa, período e energia de pico das ondas, que foram utilizados neste estudo para avaliar o recurso energético das ondas para fins de geração de eletricidade.

4.2 Aquisição e tratamento dos dados de ondas

O equipamento foi programado para adquirir três tipos de arquivos em um período que dependendo da agitação do mar, ou seja, se o valor da altura significativa das ondas for menor de que dois metros, a aquisição ocorre em um intervalo de tempo de três em três horas. No caso de entrada de frentes, a aquisição é praticamente contínua ao longo da tempestade, correspondendo a um intervalo de meia hora entre as aquisições.

O primeiro arquivo adquirido em importância é o que possui a extensão RAW, correspondente aos dados brutos. São apenas quatro informações por linha, correspondendo a uma informação de status do dado, uma informação da elevação da onda e duas informações de direção da onda.

A partir destes dados, com a utilização de um software de simulação foi possível fazer análises da agitação marítima. O segundo arquivo consiste na resposta espectral executada através de um processamento realizado no interior do ondógrafo. Este arquivo tem a extensão SPT, e serve também como garantia no caso de perda de dados por falhas de comunicação, da continuidade do sinal, já que o mesmo é armazenado na bóia por um período de até quatro horas. Finalmente têm-se os arquivos WAV, que fornece uma estatística de registro. Parâmetros como a altura máxima, altura significativa, período médio e outros estão disponíveis. Na falta de

comunicação entre o ondógrafo e o aparelho para transmissão dos arquivos WAV e SPT, um arquivo RAW correspondente a estes arquivos, pode gerá-los a partir destes com o auxílio de um programa fornecido juntamente com o equipamento.

O software que gerencia a recepção do sinal, organiza os arquivos provenientes do ondógrafo de acordo com os dados nele contidos. Arquivos com extensão RAW são armazenados em um diretório denominado RAW. Arquivos com extensão SPT são armazenados no diretório SPEC. Por fim, arquivos WAV são armazenados no diretório STAT.

Como os arquivos obtidos constituem dados sobre períodos de aquisição relativamente pequenos, (visto que a estatística de ondas recomenda um longo período de aquisição), uma análise mais ampla exige processamento dos dados. Foram utilizados dois programas de tratamento, um para os arquivos SPT e outro para os arquivos WAV. Tais programas geram como resultado planilhas com os principais dados de cada arquivo em uma linha.

Para processar os arquivos SPT foi utilizado o programa de animação de espectros de ondas em 3 dimensões, desenvolvido em um projeto paralelo, capaz de gerar planilhas contendo informações tais como: Altura significativa (H_s), Energia de pico (E_p), Período de pico (T_p) e Direção de pico (D_p), entre outros.

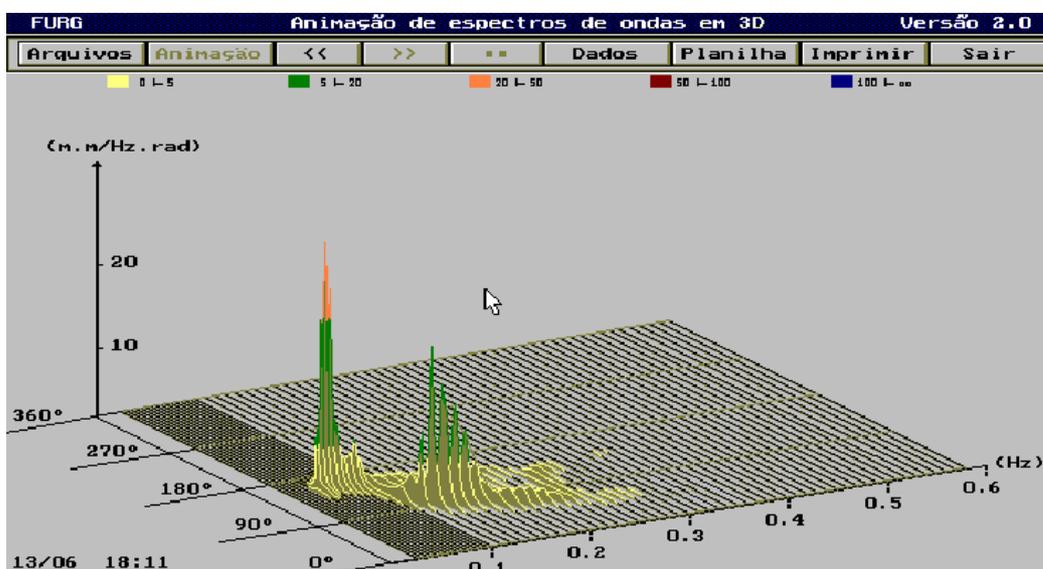


Figura 4.3: Espectro direcional representado em 3 dimensões.

Fonte: Adaptado de STRAUCH, 1999.

Um exemplo das planilhas geradas pelo software de animação pode ser visualizado na tabela 4.2:

Tabela 4.2: Planilha gerada pelo software de animação.

Ordem	Nome do Arquivo	Altura Hs em (cm)	Período médio em (s)	Energia de Pico em (m ² /hz.rad)	Direção de pico em (rad)	Período de Pico em (s)	Spread
0	04010012	62	4,04	4,4	90	5,882	9,81
1	04010312	178	4,26	5,9	192	5,882	0,93
2	04010612	174	4,49	5,2	182	8,333	7,79
3	04010912	174	4,76	10	174	10,00	14,77
4	04011212	187	5,80	68	170	11,11	10,18
5	04011512	171	5,80	50	164	15,38	17,46
6	04011812	151	5,19	12	160	14,29	21,04
7	04012112	142	5,13	13	164	13,33	15,11
8	04020012	139	5,71	15	164	13,33	11,64
9	04020313	129	5,48	11	146	16,67	12,09
10	04020613	148	5,80	26	148	15,38	10,52

Fonte: Adaptado de STRAUCH, 1999.

Com os dados nesta representação foi possível obter as médias das alturas significativas (H_s), dos períodos médios (\bar{T}_0) e das energias de pico (E_p) para avaliar o recurso energético no conjunto de dados.

4.3 Metodologia de avaliação

Para a avaliação do recurso energético considerou-se o período de energia \bar{T}_e , obtido a partir do período médio de cruzamento de zeros \bar{T}_0 . Segundo TWIDELL, 1986, o período médio de energia \bar{T}_e , para muitos mares, pode ser aproximado através da seguinte relação:

$$\bar{T}_e \approx 1,12. \bar{T}_0 \quad (4.1)$$

Utilizando esta relação, o período médio de energia \bar{T}_e foi obtido para cada mês e estação climática para os anos de 1996 a 1999.

Segundo o mesmo autor, o período médio de energia \bar{T}_e é o período onde ocorre maior concentração de energia dada pelo pico no espectro de potência, como exemplificado na figura 4.4:

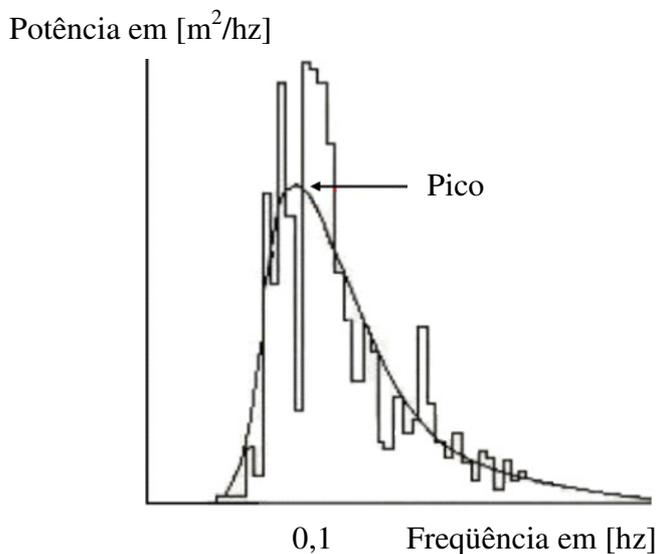


Figura 4.4: Exemplo de distribuição de potência por intervalo de frequência para ondas em águas profundas no Atlântico.

Fonte: TWIDELL, 1986. Com adaptações.

Neste exemplo, a frequência de 0,1 Hz (ou $T = 10s$) é o período de energia \bar{T}_e determinado pelo pico da curva, ou seja, para o cálculo do recurso energético deve-se utilizar este período para efetuar as estimativas.

E por fim, obtiveram-se os valores médios de Recurso Energético introduzindo os parâmetros de alturas significativas e períodos médios de energia na equação 2.36.

A seguir serão apresentados de forma sucinta os resultados de recurso energético mensal, sazonal e anual.

4.3.1 Recurso energético mensal

A avaliação do recurso energético foi efetuada agrupando-se os dados para cada mês no decorrer dos anos de 1996 a 1999.

Tabela 4.3: Valores médios de \bar{H}_s (m), \bar{T}_e (s) e Potência (kW/m) obtidos para os meses de Janeiro, Fevereiro e Março de 1996 a 1999.

Janeiro		Fevereiro		Março	
\bar{H}_s (m)	1,23	\bar{H}_s (m)	1,73	\bar{H}_s (m)	1,72
\bar{T}_e (s)	5,3	\bar{T}_e (s)	5,9	\bar{T}_e (s)	6,2
Potência (kW/m)	4,02	Potência (kW/m)	8,82	Potência (kW/m)	9,17

Tabela 4.4: Valor médios de \bar{H}_s (m), \bar{T}_e (s) e Potência (kW/m) obtidos para os meses de Abril, Maio e Junho de 1996 a 1999.

Abril		Maio		Junho	
\bar{H}_s (m)	1,97	\bar{H}_s (m)	2,06	\bar{H}_s (m)	1,71
\bar{T}_e (s)	6,20	\bar{T}_e (s)	6,7	\bar{T}_e (s)	6,54
Potência (kW/m)	12,00	Potência (kW/m)	14,20	Potência (kW/m)	9,60

Tabela 4.5: Valor de \bar{H}_s (m), \bar{T}_e (s) e Potência (kW/m) obtidos para os meses de Julho, Agosto e Setembro de 1996 a 1999.

Julho		Agosto		Setembro	
\bar{H}_s (m)	1,33	\bar{H}_s (m)	1,73	\bar{H}_s (m)	1,45
\bar{T}_e (s)	6,00	\bar{T}_e (s)	6,33	\bar{T}_e (s)	5,90
Potência (kW/m)	5,30	Potência (kW/m)	9,50	Potência (kW/m)	6,20

Tabela 4.6: Valores médios de \bar{H}_s (m), \bar{T}_e (s) e Potência (kW/m) obtidos para os meses de Outubro, Novembro e Dezembro de 1996 a 1999.

Outubro		Novembro		Dezembro	
\bar{H}_s (m)	1,63	\bar{H}_s (m)	1,70	\bar{H}_s (m)	1,60
\bar{T}_e (s)	5,90	\bar{T}_e (s)	5,60	\bar{T}_e (s)	5,60
Potência (kW/m)	7,90	Potência (kW/m)	8,10	Potência (kW/m)	7,17

4.3.2 Recurso energético na Primavera, Verão, Outono e Inverno

A avaliação do recurso energético foi efetuada agrupando-se os dados para cada uma das estações climáticas no decorrer dos anos de 1996 a 1999.

Tabela 4.7: Valores de \bar{H}_s (m), \bar{T}_e (s) e Potência (kW/m) obtidos durante a Primavera e Verão de 1996 a 1999.

Primavera		Verão	
\bar{H}_s (m)	1,61	\bar{H}_s (m)	1,62
\bar{T}_e (s)	5,71	\bar{T}_e (s)	5,80
Potência (kW/m)	7,40	Potência (kW/m)	7,70

Tabela 4.8: Valores de \bar{H}_s (m), \bar{T}_e (s) e Potência (kW/m) obtidos durante o Outono e Inverno de 1997 a 1999.

Outono		Inverno	
\bar{H}_s (m)	1,88	\bar{H}_s (m)	1,60
\bar{T}_e (s)	6,40	\bar{T}_e (s)	6,30
Potência (kW/m)	11,35	Potência (kW/m)	8,06

4.3.3 Recurso energético sazonal e anual

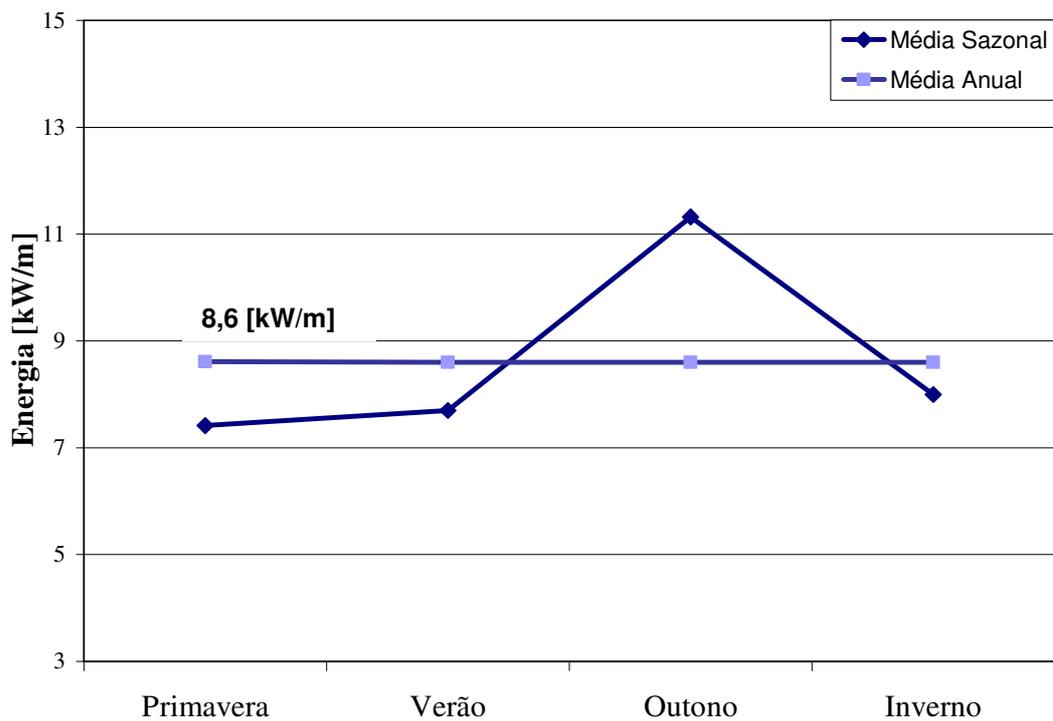


Figura 4.5: Média do recurso energético sazonal e anual referente aos anos de 1996 a 1999 para um conjunto de 10.921 observações.

5 ANÁLISE ECONÔMICA E SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS PARA O APROVEITAMENTO

A análise aqui apresentada, não constitui-se numa análise econômica rigorosa e tem como finalidade principal, realizar uma comparação entre a alternativa de geração eólica e a alternativa de geração a partir de ondas oceânicas, quanto aos aspectos de investimentos iniciais, custos de operação e manutenção, períodos de amortização e indicadores de 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.

Na seqüência, reuniram-se informações para auxiliar no processo de seleção de tecnologias para o aproveitamento. Estas informações incluem aspectos tecnológicos e econômicos tais como: eficiência dos modos de conversão da energia, custos de investimento, de operação, de manutenção, de geração, de sistemas de transmissão e construção civil, que servirão como base para seleção de uma tecnologia.

5.1 Condições de viabilidade econômica

Dadas as incertezas atuais relativamente à viabilidade do aproveitamento da energia das ondas, utilizar-se-á um modelo simples de análise econômica, baseado no *método da anuidade*.

A incerteza é o desconhecimento das condições de variabilidade de um parâmetro, impedindo a adequada previsão de seu comportamento. Em projetos de sistemas energéticos, as incertezas referem-se à rentabilidade do empreendimento, aos custos de operação e de manutenção e às taxas de retorno do investimento, entre outros.

Risco e incerteza, embora ligados, são noções distintas. São ligados no sentido de que o risco de um projeto de investimento é a consequência da incerteza associada ao projeto; são distintos à medida que um projeto de investimento, com resultados incertos, somente é arriscado quando suscetível de apresentar resultados não desejados.

Segundo GALESNE, 1999,

“Cada vez mais autores têm julgado que se deve considerar como *situação de risco* toda situação para a qual uma distribuição de probabilidades, seja qual for sua natureza, possa ser associada aos resultados, e *situação incerta* àquela para a qual nenhum tipo de distribuição de probabilidade possa ser associada aos resultados”.

Aplicando 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 ,

$$a = C \frac{i}{1 - (1+i)^{-n}} \quad (5.1)$$

Para que uma dada central seja rentável, os proveitos anuais G 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, teremos:

$$G = a + xC \quad (5.2)$$

Por outro lado, os proveitos anuais da venda da energia são dados pelo produto da energia anualmente produzida p pela tarifa de venda s ,

$$G = ps \quad (5.3)$$

O custo de capital C pode ser expresso em termos da potência instalada P através do custo unitário de potência instalada b ,

$$C = b.P \quad (5.4)$$

E a produção média anual de energia elétrica (em MWh) pode ser referida à potência nominal do equipamento elétrico (em MW) através de:

$$p = h.P \quad (5.5)$$

em que h é o número de horas equivalentes à potência nominal.

Combinando as equações anteriores, obtém-se o custo unitário de potência instalada b_0 (em USD\$/MW) compatível com as condições de viabilidade econômica, isto é, aquele que permite que os proveitos suportem os encargos financeiros e de manutenção,

$$b_0 = \frac{h \cdot s}{x + \frac{i}{1 - (1 + i)^{-n}}} \quad (5.6)$$

em que s vem expresso em USD\$/MWh.

Para avaliar a veracidade desta expressão iremos aplicá-la a um projeto típico de energia eólica. A tabela seguinte indica os valores de referência das variáveis independentes que aparecem na equação (5.6) e os valores de referência calculados para o investimento por unidade de potência instalada.

Tabela 5.1. Investimento por unidade de potência instalada obtido através do método da anuidade.

ITENS AVALIADOS	EÓLICA
Período de amortização	9 anos
Taxa de Juros	3%
Custo O &M (% investimento)	3%
Nº de horas de funcionamento	2.300
Tarifa de venda [USD\$/kWh]	0,13 *
Investimento [USD\$/kW]	1.887,25

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

Aplicando o mesmo valor para a taxa de juros a projetos de energia das ondas obtêm-se os valores da Tabela 5.2 para duas situações distintas:

- 1) Uma tarifa de 0,317 USD\$/kWh, (CRUZ et al., 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;
- 2) Uma tarifa de aproximadamente 0,125 USD\$/kWh, (ABEEOLICA, 2010) correspondente a uma situação de tecnologia em fase final de

desenvolvimento, caso em que se adotou a tarifa e o período de amortização considerado para a energia eólica.

A tabela a seguir apresenta uma análise comparativa entre os custos por KW instalado para uma Usina de ondas (em fase inicial e final de desenvolvimento) e uma Usina eólica.

Tabela 5.2. Investimento por unidade de potência instalada obtido através do método da anuidade para projetos de energia das ondas para uma tarifa correspondente a tecnologia em fase inicial e em fase final de desenvolvimento.

ITENS AVALIADOS	Energia eólica atual	Tecnologia Ondas em fase inicial	Tecnologia Ondas em fase final
Período de amortização (anos)	9 anos	13,5 anos	9 anos
Taxa de Juros	3%	3%	3%
Custo O &M (% investimento)	3%	8%	6%
Nº de horas de funcionamento	2.300 horas	2.190 horas	2.190 horas
Tarifa de venda [USD\$/kWh]	USD\$ 0,125	USD\$ 0,315	USD\$ 0,125
Investimento [USD\$/kW]	1.814,70	USD\$ 4.030,10	USD\$ 1.452,80

Para a terceira e quarta colunas da tabela 5.2, se admitem 2.190 horas de funcionamento e um custo anual de manutenção e operação de 8%, para a tecnologia em fase inicial de desenvolvimento e 6% do investimento para a tecnologia que estiver em fase final de desenvolvimento. A tecnologia de ondas em fase final pode ter os seus custos de operação e manutenção reduzidos em função da utilização de mão de obra local e ao desenvolvimento de técnicas menos dispendiosas para as atividades de manutenção. Este custo é superior ao valor usado na energia eólica, devido à agressividade do ambiente marinho e ao sobre custo associado às operações no mar (CRUZ et al., 2004).

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

Para os empreendimentos de energia de ondas que alcançaram maturidade tecnológica, o investimento máximo não deverá ultrapassar o valor de USD\$ 1.452,80 para cada kW instalado, tornando-se competitivo com os atuais projetos de parques eólicos a serem

implantados no Brasil. Não será possível assegurar que projetos de energia das ondas de menor rentabilidade que esta não venham a ser atrativos, por não haver alternativas para a produção de energia elétrica através de fontes renováveis (CRUZ et al., 2004).

Segundo FALCÃO, 1989, para localidades com reduzida população, o preço unitário da energia elétrica (quando produzida na sua maior parte por grupos geradores a diesel) é relativamente elevado, tornando as centrais de energia de ondas competitivas.

5.2 ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA O APROVEITAMENTO

O estudo de alternativas tecnológicas (PCH'S) para aproveitamento de recursos hídricos envolvem atividades interdisciplinares e, conseqüentemente, requerem informações de diversas áreas, especialmente referentes à topografia, à geologia e geotecnia, à hidrometeorologia e aos aspectos sócio-ambientais.

No presente estudo, as análises se restringiram aos aspectos técnico-econômicas, tais como: eficiência dos modos de conversão da energia, custos de investimento, operação, manutenção, geração, sistemas de transmissão e construção civil, não englobando assim, os aspectos mencionados anteriormente.

As tecnologias analisadas neste estudo foram classificadas como Pequenas centrais hidrelétricas (PCH'S de 20 MW de potência instalada), segundo os critérios estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, que assim classificam as PCH'S segundo a potência instalada (potências entre 1MW e 30 MW).

Em seguida, foi adotado o esquema sugerido no Estudo de Inventário da Eletrobrás, onde foram realizadas análises comparativas das alternativas tecnológicas para a área selecionada. Na seqüência, procedeu-se a uma análise econômica preliminar com o propósito de selecionar uma alternativa para explorar os recursos disponíveis no local.

5.2.1 Estudos preliminares: Comparação Técnico-Econômica das alternativas

Nesta análise, além do custo total da obra, devem ser considerados os benefícios energéticos (obtidos com base no sistema de referência de longo prazo), quais sejam:

- 1) Energia firme;
- 2) Energia secundária;
- 3) Ponta disponível.

A energia firme corresponde à maior carga que o sistema pode atender sem ocorrência de déficits mesmo nas piores condições hidrológicas registradas no histórico de afluências naturais.

A energia secundária corresponde à energia disponível apenas em períodos de hidrologia favorável, podendo ser utilizada no atendimento a consumidores de carga interruptível ou na substituição da geração de origem térmica, com o objetivo de economizar combustível.

A capacidade de ponta representa a capacidade máxima de produção do sistema durante o intervalo de tempo correspondente à ponta da carga. No caso de PCH's, esta capacidade de ponta está relacionada diretamente à potência instalada das usinas, devendo-se considerar ainda, no seu dimensionamento, a perda devida à redução da queda quando do deplecionamento do reservatório e/ou elevação do nível do canal de fuga e as taxas de saídas programadas e forçadas. Deplecionamento é a redução do nível de água em um reservatório e, conseqüentemente da quantidade de água armazenada, devido ao consumo para geração ou para abastecimento

Os critérios adotados para a seleção prévia das tecnologias para explorar o recurso energético 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 (dispositivo onshore). Considerando a potência e modo de fixação dos aparelhos, as tecnologias pré-selecionadas foram:

1. Dispositivo OWC 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;
4. Dispositivo PELAMIS, potência nominal de 0,75 MW.

O nível de potência de 0,5 MW tem a ver com as amplitudes de pressão de ar que normalmente são possíveis de se criar utilizando estes tipos de centrais, sendo adequadas para gerar potências nominais em torno deste valor. (WAVE ENERGY CENTER, 2004).

A preferência por dispositivos onshore se deu devido à existência dos molhes na zona avaliada em Rio Grande, que poderia ser aproveitado para fixação dos aparelhos. Esta 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, 2004).

Os aparelhos pré-selecionados estão em plena fase de desenvolvimento e apresentam eficiência em torno de 35%, no item modo de conversão da energia e disponibilidade superior a 95%. (THORPE, 1999).

Após a pré-seleção, a escolha entre as alternativas foi feita tomando-se a de menor custo médio de geração (CMG)¹. O manual de Estudo de Inventário da Eletrobrás recomenda que no estudo de implantação de PCH'S, as alternativas sejam homogeneizadas em relação à capacidade disponível de ponta e à energia firme de uma delas, tomada como referência (a que apresenta a maior energia firme), acrescentando-se ao custo das demais, os custos de referência de ponta e de energia firme necessários. Com estes dados, pode-se utilizar a seguinte expressão para o cálculo do custo médio de geração:

$$CMG_i = \frac{CAI_i + CO \& M_i + (P^* - P_i).CRP + ((EF^* - EF_i).CRE + (ES^* - ES_i).CRES).8760}{EF^* \times 8760}$$

Onde:

CMG_i - custo médio de geração da alternativa i (US\$/MWh);

CAI_i - custo anual de investimento da alternativa i (US\$/ano);

$CO \& M_i$ - custo anual de operação e manutenção da alternativa i (US\$/ano);

P^* - ponta disponível da alternativa de referência (kW), com capacidade instalada igual a motorização final;

CRP - custo de referência de ponta (US\$/kW/ano);

EF^* - energia firme da alternativa de referência (MWmédio);

EF_i - energia firme da alternativa i (MWmédio);

CRE - custo de referência de energia (US\$/MWh);

1 – Orientação extraída do Manual de Estudo de Inventário da Eletrobrás.

P_i - ponta disponível da alternativa i (kW), com capacidade instalada igual a motorização final;
 ES^* - energia secundária da alternativa de referência (MW_{médio});
 ES_i - energia secundária da alternativa i (MW_{médio});
 $CRES$ - custo de referência da energia secundária (US\$/ MWh) ;
8760 - número de horas no ano.

A seguir serão apresentadas algumas considerações técnicas e econômicas, que servirão de suporte para a seleção de uma alternativa tecnológica para o aproveitamento do recurso energético disponível.

5.2.2 Dispositivo de Coluna de água oscilante (OWC OSPREY)

5.2.2.1 Considerações técnicas

A empresa Wavegen, fabricante desta tecnologia, tem usado a experiência adquirida no primeiro protótipo OSPREY (Ocean Swell Powered Renewable energy), para melhorar muitos aspectos funcionais deste protótipo. Contudo, existem diversos aspectos do esquema que originam algumas incertezas sobre a performance técnica do aparelho.

Os estudos realizados pelo fabricante pretendem solucionar os inconvenientes e limitações do design convencional das OWC's, a saber: altos custos estruturais (no caso de grandes extensões) e eficiência moderada de captura da energia. Desta forma, nem todos os aspectos técnicos estão finalizados (THORPE, 1999).

O protótipo OSPREY consiste em uma estrutura de concreto ou aço com vida útil maior que 60 anos, no caso da estrutura de concreto, e 25 anos, para a estrutura em aço, sendo projetada para ser instalada em profundidades de aproximadamente 15 metros.

Segundo THORPE, 1999, há uma grande tendência em escolher o design de concreto, pois este oferece extensa possibilidade de redução de custos, através do uso de técnicas alternativas de construção. Ambos podem vir equipados com uma torre e turbina de 1.5 MW de potência. A condição de operação da turbina é semelhante às usadas nas unidades offshore.

5.2.2.2 Considerações econômicas da OWC OSPREY

Esta avaliação foi desenvolvida em uma planta de pequena escala composta por 10 aparelhos equipados com turbinas eólicas. Ela é útil para mais que 10 aparelhos usados em uma única localidade, recebendo aprovação ambiental (algumas plantas para fazendas eólicas offshore incorporam muito mais turbinas com aprovação pública). Se um maior número de aparelhos for incorporado em uma única planta, os custos de geração poderão ser reduzidos devido à queda nos custos de transmissão elétrica e conexão que podem ser custeados a partir de uma grande saída de energia (THORPE, 1999).

Segundo LEGERTON, 1997, o custo de aquisição de uma única turbina pode ser reduzido em seus principais componentes, como apresentado na figura 5.1:

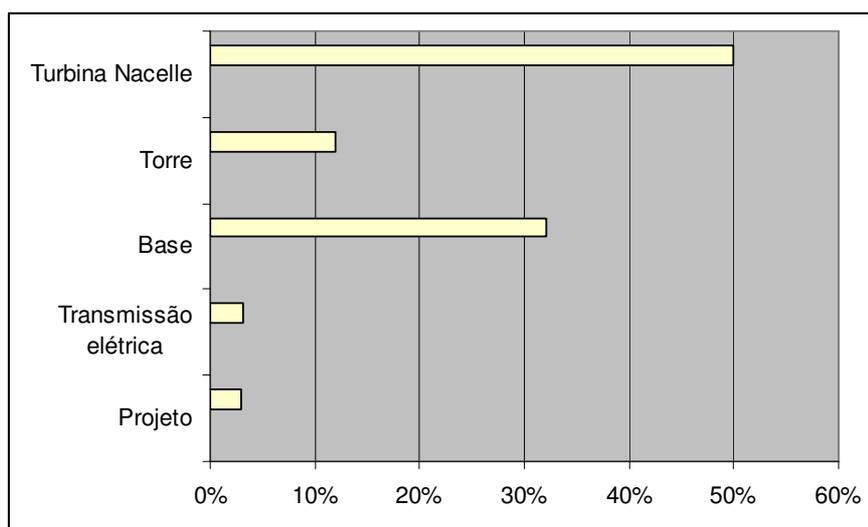


Figura 5.1: Queda dos custos de capital para uma turbina eólica offshore.

Fonte: Adaptado de Thorpe, 1999.

Esta figura mostra que, ao usar o dispositivo OSPREY aproximadamente 31% dos custos capitais podem se evitados. Adicionalmente, aproximadamente 50% dos custos elétricos podem ser recuperados usando as linhas de transmissão elétrica do dispositivo OSPREY.

LEGERTON, em 1997, ao estudar um sistema configurado para apresentar simultaneamente, a máxima saída para as turbinas acionadas pelas ondas e pelo vento, obteve um custo resultante para este esquema de \$USD 60.703.808,00. Neste custo estão incluídas 10 turbinas eólicas. Desta forma, o custo por MW instalado será aproximadamente \$USD 3.035.190,40.

A queda dos custos, nos vários centros de custos, está apresentada na figura 5.2.

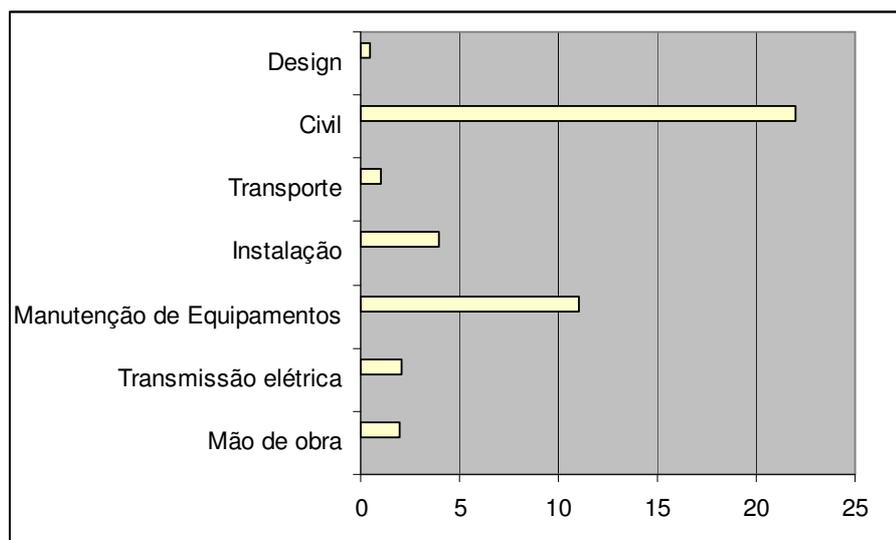


Figura 5.2: Queda dos custos de capital para 10 aparelhos OSPREY em M\$USD.

Fonte: Adaptado de Thorpe, 1999.

A disponibilidade do OSPREY é estimada em 95%. Estudos têm sido realizados com turbinas Wells' e equipamentos de conversão de potência alcançando progressos, de modo que a mais recente estimativa de disponibilidade usando a mesma credibilidade do modelo é de 97%. (THORPE, 1995).

O custo anual de operação e manutenção oriundo de todas as fontes descritas é superior a \$USD 1.831.011,60 ou aproximadamente \$ USD 183.451,60 por aparelho, o que equivale a aproximadamente 3% do investimento total.

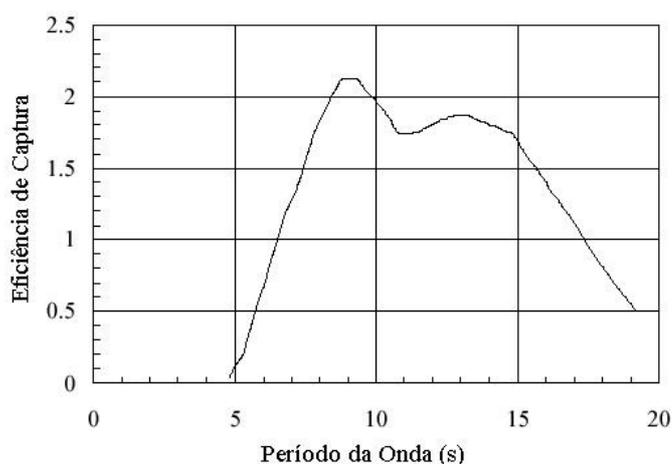


Figura 5.3: Eficiência de captura de um dispositivo OSPREY em ondas monocromáticas.

Fonte: Thorpe, 1999. Com adaptações.

Tabela 5.3. Parâmetros do dispositivo OSPREY.

PARÂMETROS	VALORES
Largura do dispositivo OSPREY	24m
Eficiência média de captura	126%
Eficiência da turbina	70%
Eficiência do gerador	95%
Eficiência do controle de potência	90%
Disponibilidade	97%

Fonte: THORPE, 1999. Com adaptações.

Tabela 5.4. Saída anual de energia da turbina eólica.

Velocidade média do vento (m/s)	Potência gerada (MWh)
7.5	4,103
8.3	4,955

Fonte: LEGERTON, 1997, com adaptações.

O custo previsto da eletricidade foi calculado para um range de taxa de desconto que varia entre 0% e 15%. Os resultados são apresentados na figura 5.4:

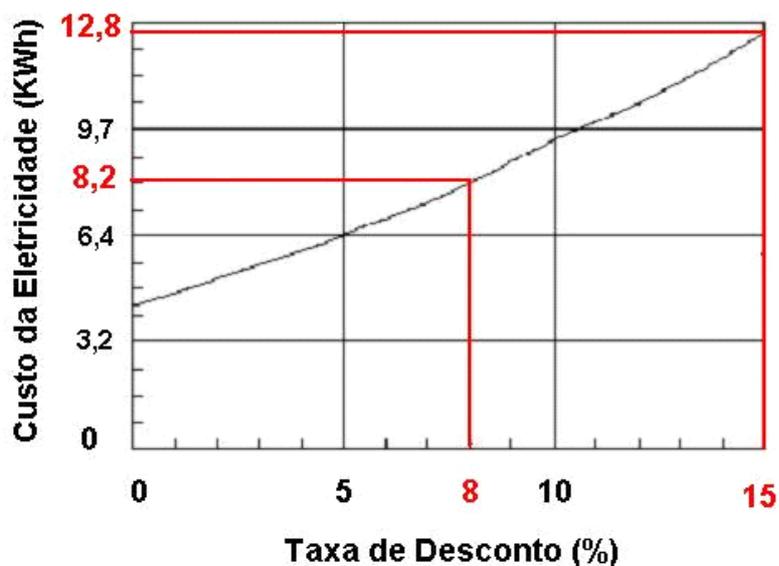


Figura 5.4: Influência da taxa de desconto no custo de geração do dispositivo OSPREY.

Fonte: Adaptado de Thorpe, 1999.

Para taxas de desconto de 8% e 15%, o esquema está previsto para produzir eletricidade a um custo de \$ USD 8,248 /kWh e \$ USD 12,867/kWh respectivamente.

Estes valores foram usados para calcular a taxa interna de retorno para um esquema OSPREY. Os resultados são apresentados na figura 5.5 para um range de preços em que o gerador pode ser pago pela eletricidade gerada. O esquema apresentará uma taxa de retorno positiva para preços de eletricidade maiores que \$ USD 4,95/kWh.

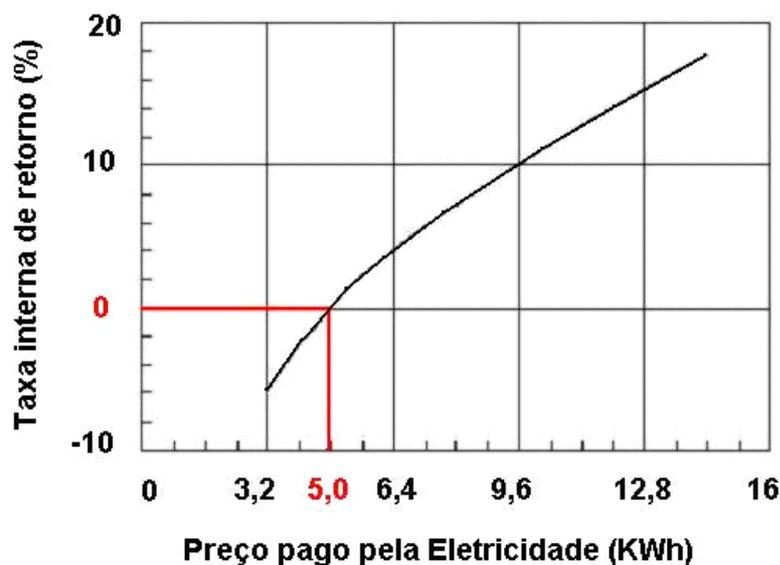


Figura 5.5: Taxa interna de retorno para o dispositivo OSPREY.

Fonte: Adaptado de Thorpe, 1999.

5.2.3 Dispositivo LIMPET

5.2.3.1 Considerações técnicas

Muitos aspectos do sistema tem sido desenvolvidos no decorrer de mais de uma década de trabalho, como também, a cooperação com outros pesquisadores e indústria. Contudo, existe somente um número limitado de áreas de incerteza; a maioria delas só pode ser respondida através de testes do aparelho:

- 1) A remoção de muitas rochas soltas é essencial para prevenir a entrada de cascalhos na câmara do aparelho quando em serviço;
- 2) A eficiência de captura do sistema tem sido provada em testes de modelo, mas ela é preferivelmente válida para um lugar específico;
- 3) A área selecionada tem um perfil costeiro com paredões que aumentam a eficiência de captura (HUNTER, 1991);

- 4) As turbinas estão situadas na saída de ar da câmara (saída de aproximadamente duas vezes o diâmetro da turbina) que poderia resultar numa corrente não linear de fluxo de ar e conseqüente, perda de eficiência (CURRAN, RAGHUNATHAN and WHITTAKER, 1995). A empresa Wavegen, que fabrica o dispositivo, tem estudado simultaneamente os aspectos teóricos e práticos visando à redução deste efeito.

O aparelho foi projetado para ter uma vida útil de mais de 30 anos para a estrutura, mas a planta mecânica e elétrica terá uma vida útil menor. O método tem sido usar componentes robustos e confiáveis, obtendo a qualidade adequada quando usada em outras situações similares.

5.2.3.2 Considerações econômicas do Dispositivo LIMPET

Este é um campo específico e subjetivo ainda em desenvolvimento. Há grandes incertezas na estimativa dos custos, oriunda da falta de informações detalhadas, conduzindo a previsões entre \$USD 1.402.126,00 a 2.639.296,00 para um aparelho com capacidade nominal de 0,5MW.

Os custos anuais de operação e manutenção foram estimados em aproximadamente \$USD 37.934,88, o que equivale de 1,5% a 2,7% do investimento. O sistema está sendo desenvolvido com possibilidade de receber manutenção em localidades remotas, utilizando-se de mão de obra nativa.

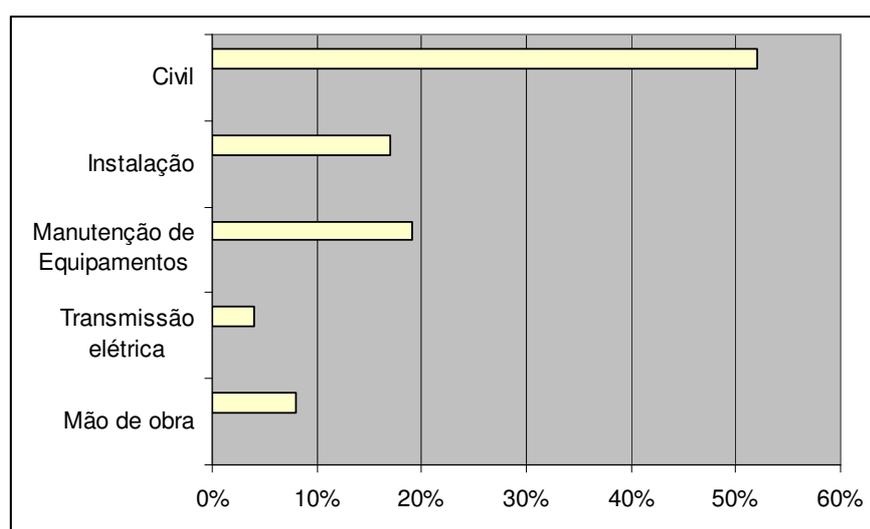


Figura 5.6: Composição dos custos de investimento total para o dispositivo LIMPET.

Fonte: Adaptado de Thorpe, 1999.

Usando as informações acima, os custos de geração foram avaliados para uma vida útil de 30 anos, usando diferentes taxas de desconto. Os resultados estão apresentados na figura

5.7. Isto é válido para o design atual do aparelho e feito sem considerar a possibilidade de aperfeiçoamento da tecnologia. O custo de geração de energia para uma taxa de desconto de 15% é aproximadamente \$USD 16,826/kWh, conforme ilustrado na figura 5.7.

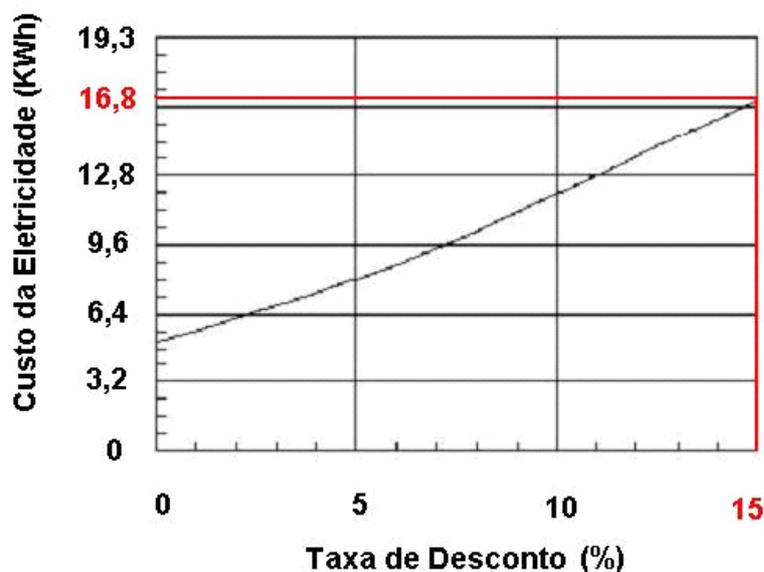


Figura 5.7: Efeito da taxa de desconto nos custos da eletricidade para o dispositivo LIMPET.

Fonte: Adaptado de Thorpe, 1999.

A taxa interna de retorno foi calculada para um range de preços de eletricidade comprada do gerador. Os resultados estão apresentados na figura 5.8 e indica um retorno positivo do investimento para preços de eletricidade acima de \$USD 4,95/kWh.

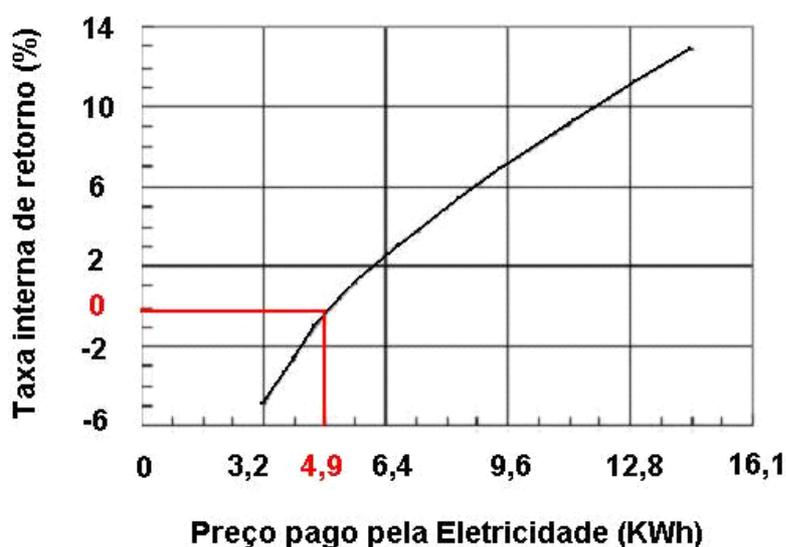


Figura 5.8: Efeitos dos preços da eletricidade na taxa interna de retorno para o dispositivo LIMPET.

Fonte: Adaptado de Thorpe, 1999.

5.2.4 Protótipo da COPPE/UFRJ

5.2.4.1 Considerações técnicas

Este projeto piloto de energia de ondas se insere no contexto de diversificação da matriz energética Brasileira, dando seqüência às pesquisas desenvolvidas pela COPPE/UFRJ, com apoio da Eletrobrás e CNPq.

A usina proposta envolve os principais elementos: Flutuadores, braço para acionamento da bomba hidráulica, câmara hiperbárica, turbina e gerador elétrico. Os testes realizados em Laboratório, utilizando-se diferentes configurações entre dois flutuadores iguais, trabalhando simultaneamente nos mesmos parâmetros de onda, não apresentaram diferenças significativas nos seus desempenhos, para ondas com incidência frontal. Para as ondas com ângulo de incidência de 45°, observou-se uma sensível redução nos desempenhos dos flutuadores, nas três configurações testadas (COSTA, 2004).

Os testes foram realizados utilizando um modelo reduzido do sistema de geração, na escala 1:6,5. Nos ensaios feitos com ondas monocromáticas, o modelo demonstrou capacidade de conversão de 35% do potencial energético da onda, percentual equivalente aos melhores desempenhos alcançados até o momento por tecnologias de aproveitamento da mesma fonte. Uma vantagem do sistema é sua característica modular, que possibilita alternativas de formas geométricas para o flutuador. Além do formato retangular, também foi testado um flutuador de desenho circular, que permite igual absorção de energia para diferentes direções de propagação das ondas.

Os resultados obtidos nos testes indicaram que a concepção proposta é promissora, podendo se constituir num dispositivo eficiente para o aproveitamento da energia das ondas.

A próxima fase do projeto prevê a sua instalação na costa do Ceará (Porto de Pecém), onde serão realizados os testes e aprimoramentos da tecnologia, contribuindo para uma possível comercialização da tecnologia para conversão da energia das ondas.

5.2.4.2 Considerações econômicas do Protótipo

Um dos aspectos que se busca com o projeto é a redução dos custos de geração de eletricidade, semelhante ao que aconteceu com a energia eólica. O custo por MW instalado é de \$USD 2.820.000,00.

Segundo ESTEFEN, 2004, os custos de implantação são altos, com grande possibilidade de serem reduzidos conforme o desenvolvimento da tecnologia.

O custo de investimento por MWh é de \$USD 93,51 e o custo de geração foi estimado em \$USD 103,51/MWh para uma taxa de retorno de 15% ao ano e prazo de amortização de 20 anos. Os custos de operação e manutenção estão em torno de \$USD 10,0/MWh, o que equivale a 9,7% do custo de geração. A previsão do fator de capacidade do protótipo é de 55%.

5.2.5 Dispositivo PELAMIS

5.2.5.1 Considerações Técnicas

O Pelamis foi concebido tendo em mente a sua implementação em parques offshore de energia de ondas. Cada dispositivo conta com três módulos de conversão de energia totalmente independentes (250 kW cada) totalizando 750kW de potência. Este dispositivo foi projetado para ser ancorado em águas de 50 a 60 m de profundidade (o que equivale a uma distância de aproximadamente 100 km da costa de Rio Grande/RS).

Outra variável importante na concepção do Pelamis foi a tentativa de utilização de componentes já existentes na indústria *offshore*, no sentido de tornar o dispositivo economicamente viável, com um custo de produção de seus componentes mais reduzido.

O dispositivo apresenta uma limitação hidrodinâmica de potência para um período de onda de 8 s, representativo de um estado de mar típico. Para elevadas alturas de ondas a potência é limitada, dadas as características do Pelamis, sendo um requisito fundamental para a sobrevivência de qualquer máquina em condições hostis.

5.2.5.2 Considerações econômicas do Dispositivo PELAMIS

O custo de investimento de um protótipo de 750kW é de aproximadamente 15 M€. Mas com o desenvolvimento da tecnologia é comum obter-se reduções de custos em torno de 20% com a duplicação da potência, como se verifica atualmente com a energia fotovoltaica (CRUZ e SARMENTO, 2004).

Em 2005, a Ocean Power Delivery (OPD) assinou um acordo para fornecimento de três dispositivos Pelamis, com capacidade instalada de 2,25 MW a um custo de 8 M€ (OPD, 2005). Isto indica a real tendência de redução de custos, com o aumento da potência instalada

(redução em torno de 53% nos custos de investimento, quando comparada com a instalação de um único módulo de conversão Pelamis).

5.2.6 Alternativa selecionada para o aproveitamento

Nos estudos preliminares, a comparação das alternativas teve por objetivo a eliminação das que não são competitivas, sob o ponto de vista econômico-energética. A seleção foi feita seguindo-se as recomendações presentes no Estudo de Inventário da Eletrobrás para pequenas centrais hidrelétricas, tendo como base, a eliminação das alternativas que apresentaram baixo desempenho sob o ponto-de-vista técnico-econômico.

Entre as tecnologias em desenvolvimento, o protótipo construído pela COPPE/UFRJ, foi avaliado com vistas a identificar a sua competitividade com as tecnologias que estão num estágio de desenvolvimento mais avançado.

Para todas as alternativas, os custos de geração foram expressos em [kWh], enquanto que os de operação e de manutenção foram expressos em percentagem do investimento total. Também foram listados os custos por [MW] instalados e de investimento para implantação das usinas. O custo total de investimento foi segmentado dando a opção de instalação por aparelho ou de uma planta respectivamente.

No caso da tecnologia COPPE, foram agregados 10 módulos para alcançar 0,5MW de potência (cada módulo possui potência nominal de 50kW).

Estas estimativas foram feitas para uma taxa de retorno de 15% e prazo de amortização de 20 anos para todas as tecnologias. Os valores apresentados devem ser vistos com certa cautela por se tratar de um estudo preliminar de viabilidade para implantação das usinas.

O quadro a seguir apresenta uma estimativa de custos de investimentos possibilitando uma análise comparativa das alternativas.

Tabela 5.5. Custos de geração, de investimento, de operação e manutenção e por [MW] instalado para uma taxa de retorno de 15% e período de amortização de 20 anos.

Item	TECNOLOGIAS			
	OSPREY	LIMPET	PELAMIS	COPPE
Capacidade Nominal [MW]	2MW (0,5 ondas +1,5 eólica)	0,5 MW	0,75 MW	0,5 MW 10 módulos
Capacidade da Planta [MW]	20 MW 10 aparelhos	20 MW 40 aparelhos	20,25 MW 27 aparelhos (9 módulos)	20 MW 40 aparelhos
Custo de Geração [kWh]	12,857 \$USD/kWh	16,826 \$USD/kWh	0,18 \$USD/kWh	0,103 \$USD/kWh
Custo anual de Operação & Manutenção	3% do investimento	1,5 a 2,7% do investimento	8% do invest.	9,7% do invest.
Custo por [MW] instalado	3.035.190,40 \$USD/MW	2.804.252,00 a 5.278.592,00 \$USD/MW	5.278.648,00 \$USD/MW	2.820.000,00 \$USD/MW
Custo total do Investimento	<u>Aparelho:</u> \$USD 6.070.380,80	<u>Aparelho:</u> \$USD 1.402.126,00	<u>Aparelho:</u> \$USD 22.269.300,00 1módulo(3aparelhos \$USD 10.466.571,00	<u>Aparelho:</u> \$USD 1.410.000,00
	<u>Planta:</u> \$USD 60.703.808,00	<u>Planta:</u> \$USD 56.085.040,00	<u>Planta:</u> 53% desc. \$USD 94.199.139,00	<u>Planta:</u> \$USD 56.400.000,00

Nota: O fator de conversão utilizado está sujeito às variações do câmbio. (Data 22/11/2009).

A coluna de água oscilante - OWC OSPREY - foi projetada para aplicações em profundidades de 15 m aproximadamente, sendo adequada para ser instalada na zona avaliada neste estudo. Esta tecnologia apresenta uma elevada eficiência de captura para um mar com período de 8 segundos, coincidindo com o clima ondulatório da região que apresenta um período médio anual em torno deste valor. Contudo, esta alternativa apresenta a desvantagem de possui um elevado custo de geração (12,857 \$USD/kWh) o que a torna inviável.

O dispositivo da COPPE pode ser montado nos molhes existentes no canal de entrada do Porto de Rio Grande, para gerar eletricidade com o menor custo de geração (\$USD 0,103/kWh) e um dos menores custos por [MW] instalado (2.820.000,00/MW), sendo competitivo quando comparado com as alternativas. Além disso, os teste de modelo revelaram que o protótipo converte o recurso energético com eficiência em torno de 35% equiparando-se aos equipamentos mais eficientes.

O dispositivo LIMPET possui o maior custo de geração (16,826 \$USD/kWh) e o maior custo por [MW] instalado. A tecnologia está numa fase avançada de desenvolvimento, de modo a oferecer algumas vantagens, principalmente no que se refere ao desempenho do protótipo em situações reais de operação. Com a utilização de materiais alternativos para a construção da usina podem-se conseguir reduções significativas no custo total do investimento. Contudo, estas reduções no custo de investimento não serão suficientes para compensar os altos custos de geração de energia.

Entre as alternativas, o dispositivo PELAMIS apresenta um dos maiores custos O&M e por [MW] instalado (8% O&M e \$USD 5.278.648,00/MW), tornando-se menos competitivo, quando comparado com as demais alternativas. Esta tecnologia foi projetada para aplicações offshore, onde a sua instalação deve ser feita a uma distância de aproximadamente 100 km da costa (que equivale a 50 metros de profundidade na região). Neste caso, o custo para transmissão (por cabos submarinos) da eletricidade gerada é bastante elevado. Esta alternativa pode tornar-se inviável devido ao sistema de transmissão que estaria sujeito a danos, causados pelo fluxo de navios que se dirigem para o Porto de Rio Grande. A tecnologia Pelamis possui o segundo menor custo de geração (\$USD 0,180/kWh), podendo ser aproveitada em outras localidades da costa do Rio Grande do Sul, não sofrendo danos devido à navegação local.

Como foi abordado anteriormente, o dispositivo da COPPE apresenta o menor custo de geração e de instalação, sendo a alternativa mais competitiva nos aspectos avaliados. Vale ressaltar que a Eletrobrás recomenda que a alternativa selecionada apresente o menor custo médio de geração (CMG), o que aponta para a escolha desta tecnologia de aproveitamento da energia das ondas.

Nesta perspectiva, as análises fundamentam a pré-seleção da tecnologia da COPPE para o aproveitamento do recurso energético da região. Do ponto de vista econômico, este protótipo atende as expectativas, contudo existem 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 contribuir no aperfeiçoamento da referida tecnologia e validar os índices econômicos aqui apresentados.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 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 (média de 14,2 kW por metro de frente de onda). Os meses de Julho a Janeiro apresentaram resultados mais moderados (valores 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 os anos de monitoramento.

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

A média anual de recurso energético encontrado foi de 8,6 kW/m, superando os resultados obtidos em algumas localidades na costa do Brasil, 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 uma fase inicial de desenvolvimento, só serão rentáveis se o custo de investimento não for superior a USD\$ 4.030,10 para cada kW instalado. Por outro lado, para os projetos que alcançaram maturidade tecnológica, o investimento máximo não deverá ultrapassar o valor de USD\$ 1.452,80 para cada kW instalado, para tornarem-se competitivos com os atuais projetos de centrais eólicas no Brasil.

O dispositivo da COPPE foi selecionado em virtude de possuir o menor custo 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 a 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. Esta alternativa foi considerada inviável, pois necessita ser instalada a 100 km da costa, (o que implica em um elevado custo de transmissão da eletricidade gerada, por cabos submarinos), com grande possibilidade de sofrer avarias no sistema de transmissão, devido ao fluxo de navios que se dirigem para o Porto de Rio Grande.

6.2 Recomendações e considerações Finais

A energia de ondas oceânicas em Rio Grande pode ser utilizada para apoiar o Plano Estratégico de Desenvolvimento Local e sustentável do município, que prevê um elevado crescimento econômico para a região. Em termos econômicos, o plano estratégico prevê que a cidade será conhecida por seu Porto, como pólo turístico e naval e como pólo produtor de mamona, produtos florestais e pesca.

Para viabilizar este crescimento a médio e longo prazo é inevitável que haja um incremento na oferta de eletricidade local para atender a crescente demanda por energia. Neste sentido, a energia gerada pelas ondas do mar constitui-se numa alternativa para suprir parte desta crescente demanda, diversificando a matriz energética e auxiliando no cumprimento do plano estratégico da região, promovendo um desenvolvimento sustentável com reduzido impacto ambiental.

Para estudo futuros recomenda-se considerar os impactos ambientais no critério de seleção de alternativas para aproveitamento do recurso energético.

Estudar o regime dos ventos da região visando a incorporação de turbinas eólicas à tecnologia selecionada.

Avaliar experimentalmente alternativas tecnológicas possíveis de serem empregadas no aproveitamento do recurso energético, apontando os investimentos requeridos para a implantação, bem como os seus rendimentos energéticos.

6.3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSIS, Leandro Eduardo de; HACKBART, Frederico Salomão. **Dossiê de Conversão de Equipamentos Residenciais a Gás**. Núcleo de Tecnologias do Gás. Porto Alegre, 2006.

ALFREDINI, Paolo. **Ondas de oscilação**. ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. 3ª ed., São Paulo, 2000.

ABEEOLICA, 2010. Associação Brasileira de Energia Eólica. Site disponível em: <http://www.abeeolica.org.br>

BARBER, N. F. **Water Waves**. An easily read but elementary introduction to water waves. Worth reading before tackling the full theory, Wykeham, London, 1969.

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

COSTA, Paulo Roberto da. **Energia das Ondas do Mar para Geração de Eletricidade**. Dissertação de Mestrado. COPPE. Rio de Janeiro, 2004.

COULSON, C. A. And JEFFREY, A. **Waves**. An excellent theoretical text, partly considering water waves. Longman, London, 1977.

CRUZ, João M. B. P. ; SARMENTO, Antônio J. N. A.. **Energia das Ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Econômicos e Ambientais**. Instituto Superior Técnico WEC - Wave Energy Centre. Instituto do Ambiente, 2004.

CURRAN, R., RAGHUNATHAN, S., and WHITTAKER, T. J. T.. “**The Influence of Flow Profile on the Islay Wells Turbine Performance**”, Proceedings of the Second European Wave Power Conference, Lisbon, Portugal, 8-10 November, 1995.

DAHL, C., KURALBAYEVA, K.. 2001.” **Energy and environment in Kazakhstan.**” Energy Policy 29: 429-440.

DEAN, Robert G.; DALRYMPLE, Robert A . **Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists.** Cornell University. USA, 1984.

DILLENBURG, Sérgio R.; MARTINHO, Caroline T.; TOMAZELLI, Luiz J.; DORNELES, Luciana O.; SILVA, Daniel B. da. **Gradientes de Altura de Ondas ao longo da Costa do Rio Grande do Sul.** Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica – CECO/UFRGS, 2004.

ESTEFEN, Segen. **Geração de Energia Elétrica pelas Ondas do Mar.** Reportagem do Seminário Internacional de Energia de Ondas. COPPE-UFRJ. 2004.

FALCÃO, Antônio F. O. **Aproveitamento da Energia das Ondas:** Panorama e Perspectivas. Anais da ENER 04, Figueira da Foz, 6-7 de Maio de 2004.

FALCÃO, Antônio F. O., PONTES, M. Teresa., SARMENTO, A. J. N. A., SANCHO, F.E.P. **Aproveitamento da Energia das Ondas nos Açores.** 4º Simpósio Luso-Brasileiro de Hidráulica e Recursos Hídricos. Lisboa, 1989.

GALESNE, Alain, FENSTERSEIFER, Jaime E, LAMB, Roberto. **Decisões de Investimento da Empresa.** São Paulo: Atlas, 1999.

GARCIA, Felipe Hernádes. **Análise Experimental e Simulação de Sistemas Híbridos Eólico-fotovoltaico.** Tese de doutorado. UFRGS, 2004.

GELLER, Horward S. **Revolução Energética:** Políticas para um futuro sustentável. Rio de Janeiro: Relume Dumará: USAid, 2003.

GONÇALVES, Ana Margarida. **Utilização de Dados de Altímetro na Avaliação do Recurso Energético das ondas do Mar.** Relatório de Estágio Profissionalizante. Lisboa, 2003.

GONÇALVES, Ana Margarida.; MOREIRA, Nuno; POTES, M. Teresa. **Utilização de Dados de Satélite na Avaliação do Recurso Energético das ondas do mar**. XI congresso Ibérico e VI Ibero-Americano de energia solar, Portugal, 2002.

HOLDREN, J. P.; SMITH, K. R.. “Energy, the Environment, and Health.” In **World Energy Assessment: Energy and the Challenge of Sustainability**. New York, NY: United Nations Development Programme, 2000.

HUNTER, R. (1991). “**Future Possibilities for the NEL Oscillating Water Column Wave Energy Converter**”, Proceedings of a Colloquium on Wave Energy, Institution of Mechanical Engineers, London, UK, 28 November, 1991.

LEGERTON, M. (1997). “**A Review of the Prospects for Offshore Wind Energy in the UK**”, paper presented to the UK Wind Energy Advisory Committee.

LIGHTHILL, M. J. **Waves in Fluids**. Advanced level text with clear physical description. Cambridge University Press, 1978.

MANUAL DE ESTUDO DE INVENTÁRIO DA ELETROBRÁS.

MASSEL, Stanislaw R. **Ocean Surface Waves: Their Physics and Prediction**. Australian Institute of Marine Science, 1998.

MATTUELLA, Jussara Maria Leite. **Fontes Energéticas Sustentáveis: Um estudo sobre a viabilidade do Aproveitamento da Energia Eólica em três localidades no Rio Grande do Sul**. PPGEC/UFRGS, 2005.

MCCORMICK, Michael E.; KIM, Young C. **Utilization of Ocean Waves – Wave to Energy Conversion**. American Society of Civil Engineers & Institute of Oceanography, 1986.

NAKICENOVIC, N. “Energy Scenarios.” In **World Energy Assessment: Energy and the Challenge of Sustainability**. New York, NY: United Nations Development Programme, 2000.

NEUMANN, F., SARMENTO A.J.N.A. (2000), “**An Assessment of Technical and Economical Viability of OWC Integration in Breakwaters**”; Proc. 4th European Wave Power Conf., University of Aalborg, Denmark, paper B3.

OCEAN POWER DELIVERY (OPD). Report: **Order Signed to Build World’s First Wave Farm in Portugal**. 19 th May 2005.

Operation and Service manual for Direcional Waverider. Serial n° 30009/30002.

OSAWA, Hiroyuki; TSURITANI, Yasushi. **The Offshore Floating Type Wave Power Device “Mighty Whale” Model ~ Testing**. Japan Marine Science and Technology Center (JAMSTEC).

PIERSON, W.J., NEUMANN, G., JAMES, R.H., 1958: **Practical Methods for Observing and Forecasting Ocean Waves by Mean Spectra and Statistics**. Hydrogr. Off. Publ., No. 603; U.S. Navy Hydrographic, Washington, D.C.

PLANO ESTRATÉGICO MUNICIPAL DE RIO GRANDE. 2005 A 2010.

RESOLUÇÃO ANEEL N° 394, de 04/12/98.

RHINEFRANK, K.; AGAMLOH, E. B.; VON JOUANNE, A.; WALLACE, A. K.; PRUDELL, J.; KIMBLE, K.; AILLS, J.; SCHMIDT, E.; CHAN, P.; SWEENEY, B.; SCHACHER, A.. **Novel Ocean Energy Permanent Magnet Linear Generator Buoy**. Oregon State University, Corvallis, OR 97331-3211, USA, September 2005.

ROGNER, H. H., POPESCU; A. “ An Introduction to Energy.” In **World Energy Assessment: Energy and the Challenge of Sustainability**. New York, NY: United Nations Development Programme, 2000.

SANTOS, Alan Lanke dos; WEBER, Leonardo Marcon; MOREIRA, Thaís Zílio Testi. **A Matriz Energética Brasileira e o Aproveitamento das Fontes Renováveis**. Análise Conjuntural, v. 28, n.1-2, p. 18, jan./fev. 2006.

SILVEIRA, Fernando Lang da., VARRIALE, Maria Cristina. **Propagação das Ondas Marítimas e dos Tsunami**. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, 2004.

SPALDING-FECHER, R., WILLIAMS, A., VAN HOREN, C.. 2000." **Energy and Environment in Soth Africa**: Charting a Course to Sustainability. " Energy for Sustainable Development IV (4):8-17.

STRAUCH, João Calos da Silva. **Estudo do Clima Ondulatório em Rio Grande**. Fundação Universidade de Rio Grande, 1999.

STRAUCH, João Calos da Silva. **Monitoramento de Ondas em Rio Grande**. in: **XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 1997, VITORIA, ES, v. 4, 1997. p. 385-391.

THORPE, T. W. **An Assessment of the ART OSPREY Wave Energy Device**, ETSU Report Number R-90, October 1995.

THORPE, T. W. **A Brief Review of Wave Energy**. Harwell Didcort Oxfordshire UK, 1999.

THORPE, T. W. **Economics of Wave Energy**. Wavenet Report, 2003.

TOLDO JUNIOR, Elírio E.; ALMEIDA, Luiz Emílio S. B.; CORRÊA, Iran C.S. **Distribuição Direcional do Fluxo de Energia de Ondas ao longo da Praia da Lagoa dos Patos, RS**. Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica. IPH/UFRGS, 1994.

TWIDELL, John.; WEIR, Tony. **Renewable Energy Resource**. Great Britain. E. & F. N. Spon, 1986.

UNPD [United Nations Development Programme]. **World Energy Assessment: Energy and the Challenge of Sustainability**. New York, NY: United Nations Development Programme, 2000.

WALSH, E.J. **Extraction of Ocean Wave Height and Dominant Wavelength from GEOS - 3 altimeter data**. *J. Geophys. Res.*, 84, nº B8,4003-4010, July 30, 1979.

WAVE ENERGY CENTER. **“Potencial e Estratégia de Desenvolvimento da Energia das Ondas em Portugal”**. Relatório elaborado pelo Wave Energy Center – Centro de Energia das Ondas. Portugal, 2004.

WAVENET (2003), **“Results from the Work of the European Thematic Network on Wave Energy”**, ERK-CT-1999-2001 2000-2003, European Community, March 2003.

ZIJLEMA, M. **Swan Implementation Manual**. Swan Cycle III Version 40.41. Delft University of Technology, 2005.

SITES CONSULTADOS:

Fonte: <http://www.wavegen.com.uk>. Acesso em Maio de 2009.

Fonte: <http://www.lts.coppe.ufrj.br>. Acesso em Maio de 2009.

Fonte: <http://www.waveswing.com>. Acesso em Maio de 2009.

Fonte: <http://www.oceanpd.com>. Acesso em Maio de 2009.

Fonte: <http://www.wavegen.co.uk>. Acesso em Maio de 2009.

Fonte: <http://www.wavedragon.net>. Acesso em Maio de 2009.

Fonte: <http://earth.google.com>. Acesso em Maio de 2009.

Fonte: <http://www.abeeolica.org.br>. Acesso em fevereiro de 2010.

Fonte: <http://www.aquaret.com>. Acesso em Abril de 2010.

Fonte: <http://www.pelamiswave.com> . Acesso em Abril de 2010.