



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO

LUCAS SANSON DE ANGELI

**AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DAS ONDAS MARINHAS NA REGIÃO DO ESPÍRITO
SANTO E O ESTUDO DE SEU APROVEITAMENTO PARA CONVERSÃO
ELÉTRICA POR UM DISPOSITIVO DE COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE**

VITÓRIA-ES
JULHO/2019

LUCAS SANSON DE ANGELI

**AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DAS ONDAS MARINHAS NA REGIÃO DO ESPÍRITO
SANTO E O ESTUDO DE SEU APROVEITAMENTO PARA CONVERSÃO
ELÉTRICA POR UM DISPOSITIVO DE COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Lucas Sanson De Angeli**, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Walbermark M. dos Santos

**VITÓRIA-ES
JULHO/2019**

LUCAS SANSON DE ANGELI

**AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DAS ONDAS MARINHAS NA REGIÃO DO ESPÍRITO
SANTO E O ESTUDO DE SEU APROVEITAMENTO PARA CONVERSÃO
ELÉTRICA POR UM DISPOSITIVO DE COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Lucas Sanson De Angeli**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 18, de julho de 2019.

COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. Walbermark Marques dos Santos
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador



Profa. Dra. Jussara Farias Fardin
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador



Eng. Augusto Pedro Firme Dias
Examinador

RESUMO

Com base no potencial energético presente nos oceanos em suas diversas formas, alinhado com a crescente busca por fontes alternativas de energia para geração de eletricidade limpa e economicamente viável, o projeto teve como foco a análise da utilização dessa energia oceânica na região do Espírito Santo para a geração de energia elétrica por um dispositivo de coluna de água oscilante. Inicialmente, foi feito o levantamento teórico das características dos fenômenos naturais envolvidos, do ponto de vista oceanográfico, na região oceânica adjacente ao estado do Espírito Santo, bem como das tecnologias existentes para conversão energética, seja através de ondas, correntes ou marés. Posteriormente, foi calculado o potencial energético total anual disponível a partir das ondas marinhas na região de interesse, através de levantamento dos dados de ocorrência de ondas do local nos últimos 45 anos. Após avaliar e caracterizar o recurso marítimo, seguido da apresentação dos diferentes métodos de extração da energia das ondas, foi dada ênfase para o sistema de coluna de água oscilante, apresentando seu princípio funcionamento e seus componentes. Por fim, foi feita a análise do aproveitamento do recurso energético anual oferecido pelas ondas no Espírito Santo através em um dispositivo de água oscilante no local, sendo calculado sua produção energética anual na forma de eletricidade.

Palavras-chave: Energia das ondas. Conversores de energia. Coluna de água oscilante. Energia elétrica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Capacidade instalada em projetos de geração oceânica.....	10
Figura 2 – Distribuição mundial do nível de energia das ondas (valores médios anuais em kW/m e em águas profundas)	12
Figura 3 – Potencial teórico brasileiro estimado de ondas e marés.....	16
Figura 4 – Distribuição aproximada de energia nos oceanos de acordo com o período da onda.....	18
Figura 5 – Representação de uma onda senoidal com comprimento de onda λ e altura H	19
Figura 6 – Elemento de fluido de altura dz , comprimento dx e de largura unitária....	20
Figura 7 – Processo de formação da agitação marítima	23
Figura 8 – Classificação dos equipamentos de extração de energia das ondas segundo o princípio de funcionamento	27
Figura 9 – Princípio de funcionamento de dispositivo de coluna de água oscilante para aproveitamento da energia das ondas	28
Figura 10 – Protótipo do sistema CAO flutuante "Mighty Whale"	28
Figura 11 – Dispositivo AWS. Esquema de funcionamento do sistema	30
Figura 12 – Ilustração do dispositivo WaveRoller	30
Figura 13 – Princípio de funcionamento do equipamento de conversão por atenuação para aproveitamento da energia das ondas do tipo Pelamis	31
Figura 14 – Esquema de funcionamento do Wave Dragon	32
Figura 15 – Esquema de funcionamento de uma usina maremotriz	32
Figura 16 – Exemplo de equipamento fixo ao fundo de geração de eletricidade a partir das correntes marinhas	33
Figura 17 – Exemplo de equipamento com regulação vertical de geração de eletricidade a partir das correntes marinhas.....	34
Figura 18 – Diagrama de funcionamento do OTEC	35
Figura 19 – Componentes de um sistema CAO costeiro.....	36
Figura 20 – Princípio de funcionamento do dispositivo de coluna de água oscilante em plataforma marítima	37
Figura 21 – Turbina tipo Wells e as forças que atuam na turbina	40
Figura 22 – Turbina de Wells da central do Pico	41

Figura 23 – Curvas de performance da turbina do tipo Wells instalada na planta de geração de energia de Pico. (a) Parâmetro adimensional de pressão (Ψ) versus parâmetro adimensional de vazão mássica (Φ) e (b) parâmetro adimensional de pressão (Ψ) versus parâmetro adimensional de potência (Π).....	43
Figura 24 – Geradores do tipo VVFC	45
Figura 25 – Turbina e gerador, com parte do duto removido	46
Figura 26 – Mapa representando o estado do Espírito Santo e a região oceânica adjacente.....	50
Figura 27 – Área de estudo do clima de ondas no ES, batimetria, localização dos 14 pontos nos quais são avaliados os dados de onda do ECMWF e localização do ponto de medição pelo ondógrafo	53

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Histograma de direção média da onda entre os anos de 1957 – 2002 para os dados do ECMWF.....	54
Gráfico 2 – Histograma de período médio da onda entre os anos de 1957 – 2002 para os dados do ECMWF.....	55
Gráfico 3 – Histograma de altura significativa da onda entre os anos de 1957 – 2002 para os dados do ECMWF	56
Gráfico 4 – Distribuição conjunta da Hs como função do Tm na forma geral e normalizada, respectivamente, entre os anos de 1957 – 2002 para os dados do ECMWF.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diagrama de ocorrências em % da região oceânica do ES	58
Tabela 2 – Potencial energético das ondas do ES para cada estado de mar	60
Tabela 3 – Potência elétrica disponibilizada pela central CAO para cada estado de mar	65
Tabela 4 – Valores de Ψ e Π para os estados de mar que se faz necessário recalcular a velocidade de rotação da turbina para a velocidade mínima.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AWS	<i>Archimedes Wave Swing</i>
CAO	Coluna de Água Oscilante
COPPE/UFRJ	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro
ECMWF	<i>European Centre For Medium-range Weather Forecast</i>
EDP	Empresa de Distribuição de Energia Elétrica – Portugal
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ERS	<i>European Remote-sensing Satellite</i>
GIDA	Gerador de Indução de Dupla Alimentação
IEA	<i>International Energy Agency</i>
INPH	Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias
IPPC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
MIDA	Máquina de Indução de Dupla Alimentação
NCAR	<i>National Center For Atmospheric Research</i>
NCEP	<i>National Center For Environmental Prediction</i>
OEE	<i>Ocean Energy Europe</i>
OTEC	<i>Ocean Thermal Energy Conversion</i>
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S.A.
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
UE	União Europeia
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
VVFC	Velocidade Variável, Frequência Constante
WEC	<i>Wave Energy Converter</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	OBJETIVOS.....	13
1.1.1	Objetivo geral.....	13
1.1.2	Objetivos específicos	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	OCEANOGRAFIA.....	14
2.1.1	Correntes marinhas	14
2.1.2	Ondas	15
2.1.3	Marés.....	15
2.1.4	Recurso oceânico nacional	15
2.2	APROVEITAMENTO DO RECURSO ENERGÉTICO DAS ONDAS.....	16
2.2.1	Origem das ondas	16
2.2.2	Teoria linear das ondas	18
2.2.3	Teoria Espectral das ondas	23
2.2.4	Extração da potência das ondas	25
2.3	CONVERSORES DA ENERGIA OCEÂNICA	26
2.3.1	Energia elétrica a partir das ondas	26
2.3.1.1	Coluna de Água Oscilante	27
2.3.1.2	Corpos oscilantes.....	29
2.3.1.3	Galgamento	31
2.3.2	Energia elétrica a partir das marés	32
2.3.3	Energia elétrica a partir das correntes marinhas.....	33
2.3.4	Energia elétrica a partir do gradiente de temperatura	34
3	COMPONENTES DO DISPOSITIVO DE COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE	36
3.1	CÂMARA PNEUMÁTICA	37

3.2	TURBINA	38
3.2.1	Turbina Wells	39
3.2.1.1	Curvas de Performance da Turbina Wells.....	41
3.3	GERADOR.....	44
3.4	DINÂMICA ROTACIONAL	45
4	LEVANTAMENTO DO CLIMA DE ONDAS	47
4.1	MODELAGEM NUMÉRICA DAS ONDAS.....	48
4.2	ÁREA DE ESTUDO.....	49
4.3	REANÁLISE ECMWF.....	51
4.4	CLIMA DE ONDAS PARA A REGIÃO OCEÂNICA DO ESPÍRITO SANTO .	54
4.4.1	Direção (D).....	54
4.4.2	Período Médio (Tm).....	55
4.4.3	Altura Significativa (Hs).....	55
4.4.4	Distribuição Conjunta do período (Tm) e altura (Hs)	56
5	METODOLOGIA	57
5.1	AVALIAÇÃO DO RECURSO ENERGÉTICO	58
5.2	DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA GERADA POR UMA CENTRAL CAO NO ESPÍRITO SANTO	61
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	69
	REFERÊNCIAS	71
	ANEXO A - VALOR MÉDIO DE UMA SENOIDE	78

1 INTRODUÇÃO

Segundo o Dicionário Online de Português, a energia é, por significado:

[Física] Faculdade que possui um sistema de corpos para fornecer trabalho mecânico ou seu equivalente; força, potência: energia elétrica. / [Figurado] Firmeza, rigor, determinação: agir com energia. / Vigor, força física ou moral. // Energia cinética, a que possui um corpo em virtude de sua velocidade. // Energia potencial, a que possui um corpo em função de sua posição. // Fontes de energia, o carvão e a lenha, a eletricidade, o petróleo e o gás natural, e as que são fornecidas pelas marés e pelo átomo. Além da energia mecânica, que pode apresentar duas formas, a energia potencial (peso erguido, mola distendida, gás comprimido) e a energia cinética (massa em movimento), podem-se mencionar a energia calorífica, a energia elétrica, a energia radiante, a energia química, a energia nuclear. A energia total de um sistema isolado permanece constante, quaisquer que sejam as transformações que ele sofra (conservação da energia). Mas o calor é uma forma degradada de energia.

Fonte: Dicio (2017).

Tão importante quanto à definição do que seja energia, é o fato de se ter consciência de que a energia existe em grande quantidade no universo e que ela não aumenta nem diminui, mas passa por inúmeras transformações, sendo uma hora energia de um tipo e outra hora de outro, e o ser humano, que com a sua inteligência, consegue transformá-la de acordo com as necessidades e interesses, tem a responsabilidade de cuidar para que ela não seja desperdiçada e mal utilizada (EDP, 2017).

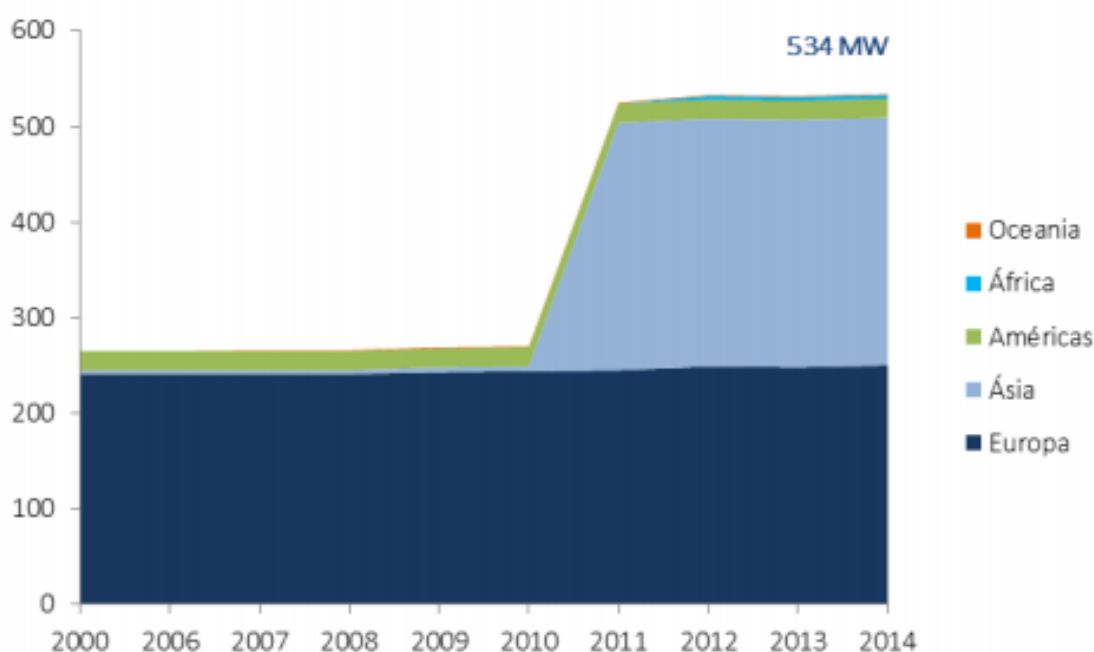
O oceano pode ser considerado um enorme reservatório de energia térmica e mecânica. Entretanto, devido à baixa qualidade do calor contido no ambiente marinho, elevada entropia, com o nível atual de desenvolvimento tecnológico apenas a energia mecânica pode ser eficientemente aproveitada. Assim, o aproveitamento da energia advinda dos oceanos para geração elétrica é atualmente uma opção estudada em diversos países (EPE, 2016).

No Brasil, a questão tecnológica ainda se constitui em principal barreira para se extrair energia a partir dos oceanos (ondas, marés, gradientes de salinidade e temperatura), já que as tecnologias de conversão em energia elétrica ainda estão em fase de maturação e a maioria dos equipamentos atualmente utilizados é de protótipos não consolidados. Isso significa que ainda não surgiu uma tecnologia “vencedora”, que sirva como referência para a indústria e que concentre os esforços de P&D. O

potencial brasileiro onde existe uma possibilidade de exploração economicamente viável está situado em regiões de costa pouco estudada e com grande relevância ambiental ou turística, sendo este um importante limitador ao desenvolvimento da fonte. Na verdade, atualmente é limitado o conhecimento dos impactos dessa fonte, pois as iniciativas brasileiras são pontuais e de pouca expressividade (EPE, 2017).

Apesar do elevado potencial mundial, chegando a 2.050.000 TWh/ano (IPCC, 2012), que representa cerca de 20 vezes o consumo total de energia mundial em 2013 (IEA, 2015), a representatividade da fonte oceânica na matriz energética mundial ainda é tímida, isso se deve à baixa competitividade econômica da tecnologia (EPE, 2017). Porém, existem algumas iniciativas mundo afora para promover seu desenvolvimento. Ao final de 2014, a capacidade instalada em projetos de geração oceânica era de 534MW (IRENA, 2015), a maioria categorizada como “energia de marés” (Figura 1). Essa potência está concentrada em dois grandes projetos, um deles localizado na França (240 MW), que entrou em operação em 1966, e outro na Coreia do Sul (254MW), completado em 2011. Também compõe o total apresentado na Figura 1 um projeto canadense (20 MW), de 1984, e outro chinês (3,9 MW), de 1980, além de outros pequenos projetos ao redor do mundo (REN21, 2015).

Figura 1– Capacidade instalada em projetos de geração oceânica



Fonte: REN21 (2015).

Na União Européia (UE), segundo a Associação Europeia de Energias Oceânicas (*Ocean Energy Europe* - OEE), a indústria de energia oceânica pode implantar 100GW de dispositivos de energia oceânica até 2050, produzindo até 10% de sua eletricidade. Isso é tanto quanto as necessidades diárias de eletricidade de todas as famílias na França, Irlanda, Portugal, Espanha e Reino Unido. Também é tanto quanto produzido por represas hidrelétricas ou por todo o setor de energia eólica hoje (OEE, 2017).

O desenvolvimento da geração oceânica no Brasil é bastante restrito até o momento, estando relacionado a poucos projetos pilotos, concluídos ou em desenvolvimento. O projeto mais conhecido é o de um conversor de ondas *onshore*, instalado no porto de Pecém, com capacidade instalada de 100 kW. O projeto foi financiado pela Tractebel Energia no âmbito do programa de P&D da ANEEL, e concluído em 2012 (EPE, 2017).

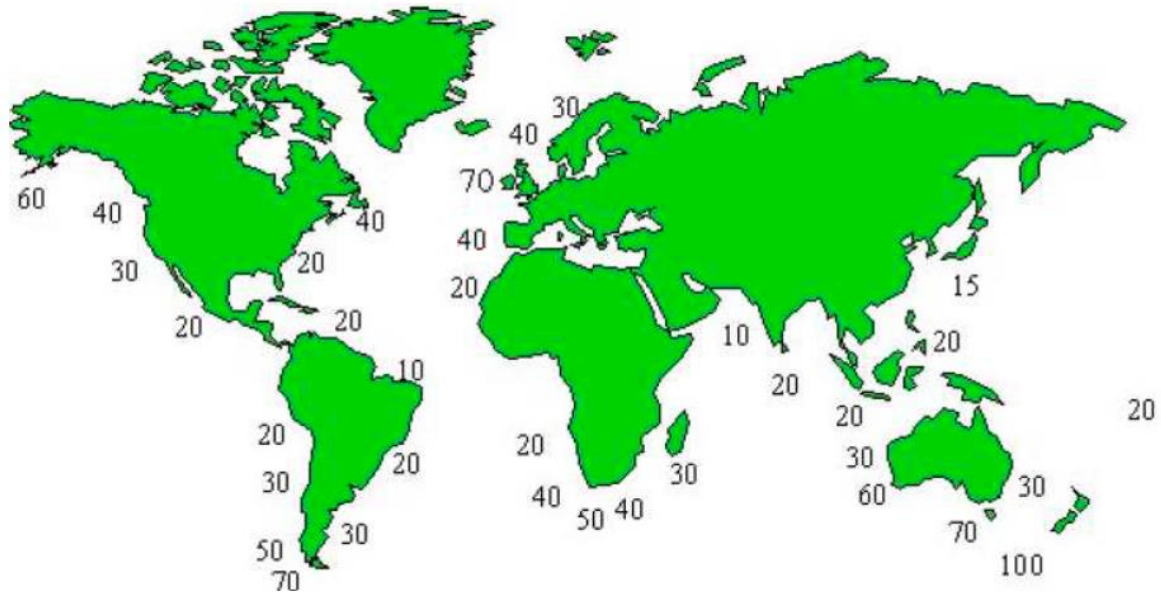
Atualmente, existe um projeto em desenvolvimento, de um conversor de ondas *offshore*, que prevê a instalação de um protótipo em profundidade de até 30 metros, no litoral do Rio de Janeiro. O projeto é financiado por Furnas no âmbito do Programa P&D da ANEEL, e tem como executora a COPPE/UFRJ e a empresa *Seahorse Wave Energy* (EPE, 2017).

Dentre os recursos energéticos disponíveis nos oceanos, a energia transportada pelas ondas geradas pelo vento é a que apresenta maiores densidades energéticas. O potencial energético global das ondas está entorno de 32 TW/ano (MARK et al., 2010) e, junto a linha de costa, negligenciando as ilhas e os polos, chega a valores superiores a 2 TW/ano (GUNN; STOCK-WILLIAMS, 2012). O grande recurso energético disponível, aliado ao aumento pela demanda por energias renováveis, tem atraído o interesse de pesquisadores e engenheiros em desenvolver tecnologias capazes de extrair parte da energia proveniente desse tipo de ondas (LISBOA, 2016).

Uma vez criadas, as ondas podem viajar milhares de quilômetros em alto mar sem perdas relevantes de energia (MUETZE; VINING, 2006), diminuindo apenas de intensidade ao se aproximarem da costa devido à interação com o fundo do mar. Além disso, as ondas são uma fonte de energia regular cuja intensidade pode ser prevista com vários dias de antecedência antes da sua chegada, sendo inclusive mais previsível do que a energia eólica e a solar. Assim como a maior parte das renováveis,

a energia das ondas está desigualmente distribuída pelo planeta. Conforme a Figura 2, a maior densidade de energia encontra-se entre as latitudes $\sim 30^\circ$ e $\sim 60^\circ$ em ambos os hemisférios, induzida pelos ventos predominantes de Oeste que sopram nessas regiões (CRES, 2002).

Figura 2 – Distribuição mundial do nível de energia das ondas (valores médios anuais em kW/m e em águas profundas)



Fonte: Adaptado de Falcão (2005).

Diante deste cenário, tendo em vista todo o potencial energético oceânico e sua pouca representatividade na matriz energética mundial, é claramente necessário o investimento em pesquisa e desenvolvimento relacionado ao tema para se obter, principalmente, uma maior competitividade econômica, visto que o grande problema tem sido o alto preço de venda da energia alinhado com a sua crescente demanda.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Estimar o potencial de geração de energia elétrica a partir do recurso energético das ondas na região oceânica adjacente ao estado do Espírito Santo.

1.1.2 Objetivos específicos

1. Realizar estudo técnico do clima de ondas e agitação marítima na região oceânica adjacente ao Espírito Santo;
2. Dispor de uma metodologia para avaliação do potencial energético provenientes das ondas na região citada;
3. Analisar o potencial de geração de energia elétrica por um dispositivo de coluna de água oscilante no local;
4. Gerar arcabouço de conhecimentos na área que sirva de base para futuros trabalhos e pesquisas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo descreverá sobre os principais tipos de tecnologias existentes para se obter energia elétrica através dos oceanos e, ainda, um breve esclarecimento sobre as características dos oceanos, com ênfase nas ondas marinhas.

2.1 OCEANOGRAFIA

A oceanografia pode ser definida, em termos gerais, como o estudo das características físicas e biológicas dos oceanos e dos mares.

Oceanografia é o nome geral dado ao estudo científico dos oceanos com ênfase no seu caráter como ambiente. O principal objetivo do estudo oceanográfico é obter uma descrição sistemática dos oceanos, suficientemente quantitativa para permitir a previsão de seu comportamento com alguma certeza (PICKARD; EMERY,1990).

2.1.1 Correntes marinhas

As águas dos oceanos estão em constante movimento – e o que conduz esse movimento, em poucas palavras, é a energia recebida do Sol e o movimento da Terra (FURTADO et al., 2013).

A forma mais visível pela qual a energia do Sol movimenta as águas oceânicas é a circulação atmosférica, ou seja, através da atuação dos ventos. A energia do Sol também provoca variações na temperatura e salinidade das águas, o que se traduz em variações de densidade que provocam o movimento da água através da convecção (FURTADO et al., 2013).

A rotação da Terra, por sua vez, atua no movimento das águas oceânicas através da força centrífuga e das forças fictícias de Coriolis, que é a tendência que qualquer corpo em movimento sobre a superfície terrestre tem de mudar seu curso devido à direção rotacional e da velocidade da Terra (FURTADO et al., 2013).

2.1.2 Ondas

As ondas são o resultado da ação do vento sobre a superfície, através da transferência de energia do ar para a água. O tipo de onda gerada, tamanho e forma, dependem da velocidade, duração e da área em que o vento sopra (área de geração ou pista de vento) (FURTADO et al., 2013).

2.1.3 Marés

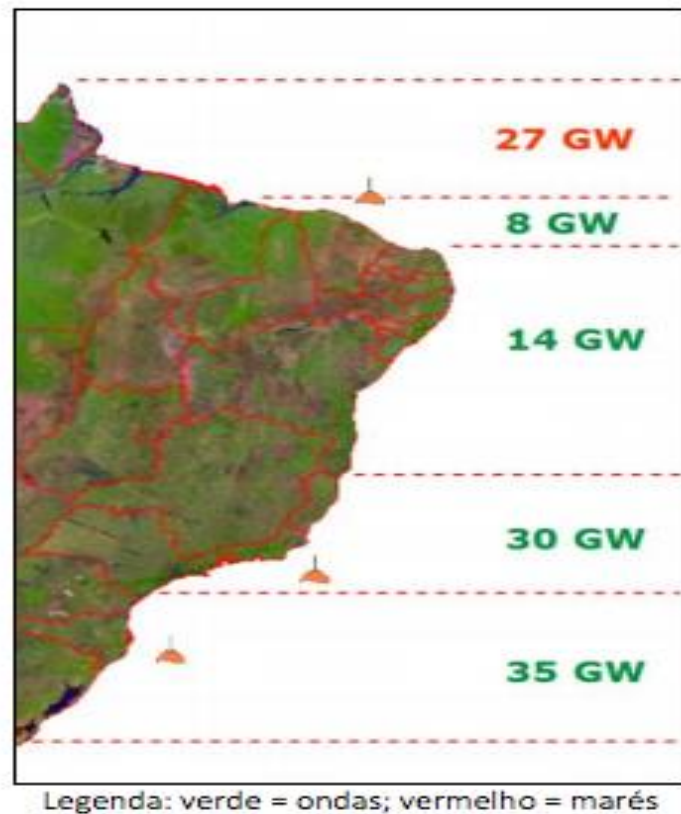
A maré pode ser definida como o movimento periódico de elevação e abaixamento do nível da água do mar, considerando uma referência fixa na Terra. Esse movimento é produzido pela ação conjunta do Sol e da Lua e também pela interferência dos planetas, sendo esta bem menos significativa (FURTADO et al., 2013).

2.1.4 Recurso oceânico nacional

A extensa costa brasileira e as vastas áreas de mar territorial são condições naturais para o aproveitamento energético dos recursos do mar. As regiões Sul e Sudeste estão sujeitas a ondulações mais energéticas, associadas às frentes frias em algumas épocas do ano, enquanto o litoral nordeste é caracterizado por ondulações menores, porém constantes no ano todo, causadas pelos ventos alísios (EPE, 2017).

Estima-se que o potencial energético brasileiro, levando em consideração apenas ondas e marés, é de 114 GW, que poderia contribuir para a ampliação da demanda de energia e para a diversificação da matriz energética. O potencial está dividido entre o uso da energia das marés na região Norte e a energia das ondas nas regiões Nordeste, Sul e Sudeste conforme a Figura 3 (ENERGIAS RENOVÁVEIS E SUSTENTABILIDADE, 2012).

Figura 3 – Potencial teórico brasileiro estimado de ondas e marés



Fonte: (COPPE/UFRJ; SEAHORSE WAVE ENERGY, 2013).

2.2 APROVEITAMENTO DO RECURSO ENERGÉTICO DAS ONDAS

2.2.1 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

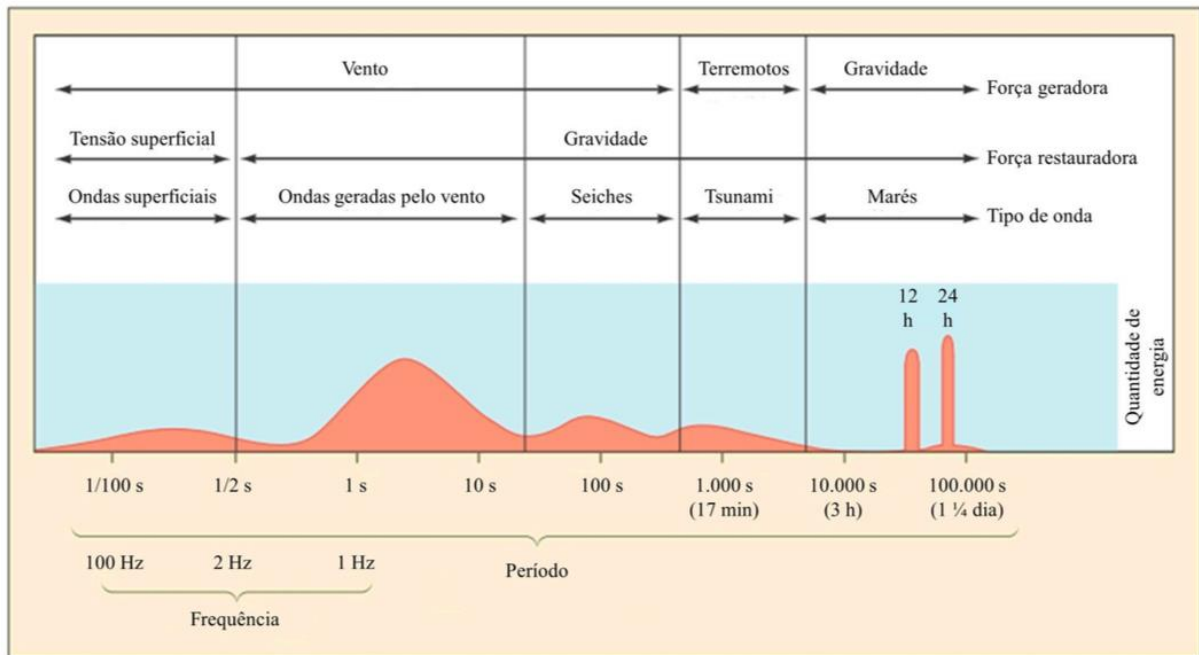
as zonas de baixas pressões, ao nível do solo, ocorrendo o movimento contrário nas camadas mais altas da atmosfera. Esse movimento é o vento (GARCIA, 2004). Conforme os ventos atuam sobre a água dos oceanos, transferem sua energia e provocam a formação de ondas (ASSIS, 2010).

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 podem ser classificadas através da sua força geradora, força restauradora e frequência/período (GUARRISON, 2009). Na Figura 4 é mostrada a distribuição de energia nos oceanos de acordo com o período da onda. As ondas geradas pelo vento, que se encontram entre os períodos de 0,5s a 30s, possuem como força restauradora a gravidade. Neste trabalho, consideram-se as ondas que possuem o vento como força geradora, visto serem as que apresentam maior conteúdo energético.

Figura 4 – Distribuição aproximada de energia nos oceanos de acordo com o período da onda



Fonte: Guarrison (2009).

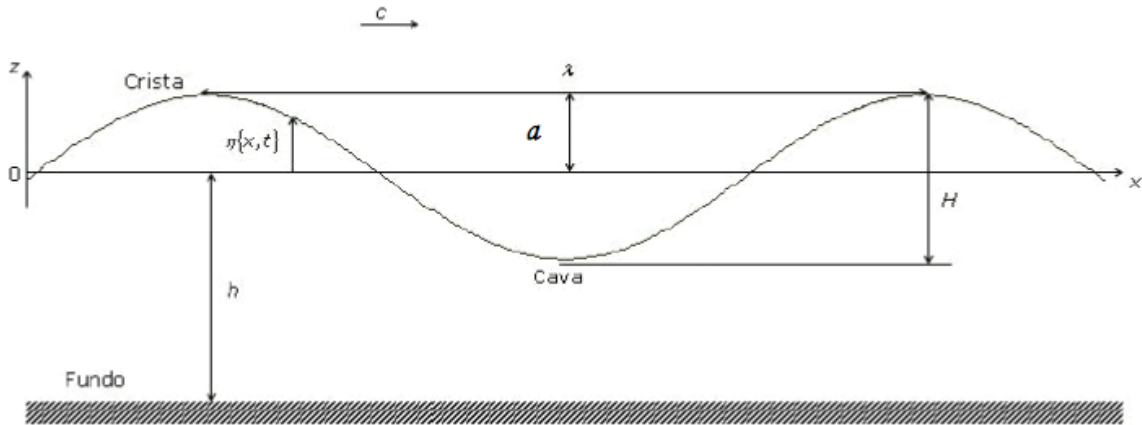
A altura, período e direção das ondas dependem basicamente da intensidade, duração e pista de atuação do vento. Na zona de geração, as ondas possuem uma grande variação de alturas, períodos e direções. Ondas com essas características são denominadas vagas (*sea*). Uma vez geradas, as ondas são capazes de propagar-se por grandes distâncias, com pouca atenuação, mesmo depois de cessada a influência do vento (MELO, 1993). Pelo processo dispersivo, à medida que as ondas se propagam, há uma organização das mesmas em períodos e direções semelhantes. Estas ondas com aspecto mais organizado são denominadas ondulações (*swell*) (LISBOA, 2016). No mar é usual coexistir os dois tipos de agitação. Os estados de mar com predominância de ondulações (*swell*) apresentam, em geral, um maior conteúdo energético, pelo que serão mais favoráveis para o aproveitamento da energia (GONÇALVES, 2003).

2.2.2 Teoria linear das ondas

A teoria linear das ondas, desenvolvida por Airy (1845), descreve a propagação das ondas sobre um plano horizontal, desta forma, segundo demonstração de Assis (2010), 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 5).

Figura 5 – Representação de uma onda senoidal com comprimento de onda λ e altura H



Fonte: Assis (2010).

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 :

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

A frequência angular ω define-se por:

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

E o número de onda k é dado por:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3)$$

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

$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k} \quad (4)$$

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

$$a = \frac{H}{2} \quad (5)$$

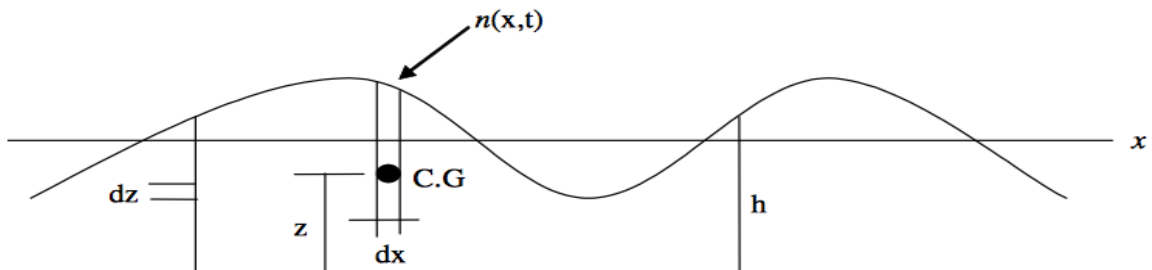
A elevação da superfície livre $\eta\{x, t\}$, portanto, pode ser representado por:

$$\eta = a \cos(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t) \quad (6)$$

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

Ainda segundo Assis (2010), 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 6 – Elemento de fluido de altura dz , comprimento dx e de largura unitária



Fonte: Assis (2010).

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

$$E_c = \frac{1}{\lambda} \int_0^\lambda dx \int_{-h}^\eta \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2) dz \quad (7)$$

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

$$u = a\omega \exp kz \cos(kx - \omega t) \quad (8)$$

e

$$v = a\omega \exp kz \sin(kx - \omega t) \quad (9)$$

Obtém-se a densidade média de energia cinética por unidade de área (E_c):

$$E_c = \frac{1}{4} \rho g a^2 \quad (10)$$

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

$$E_p = \frac{1}{\lambda} \int_0^\lambda dx \int_0^\eta \rho g z dz = \frac{1}{2} \rho g \frac{1}{\lambda} \int_0^\eta \eta^2 dx \quad (11)$$

$$E_p = \frac{1}{4} \rho g a^2 \quad (12)$$

Através das Equações 10 e 12, a densidade média de energia total para ondas de gravidade por unidade de área é:

$$E_T = E_c + E_p = \frac{1}{2} \rho g a^2 \quad (13)$$

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:

$$P = E_T \cdot c_g \quad (14)$$

A velocidade de grupo (c_g), é definida como a velocidade de um grupo de ondas movimentando-se em conjunto. A velocidade de grupo é usada para representar o movimento de energia nas ondas e tende a ser mais lenta do que a velocidade da onda (MAGAGNA, 2011). O valor de c_g é dado por:

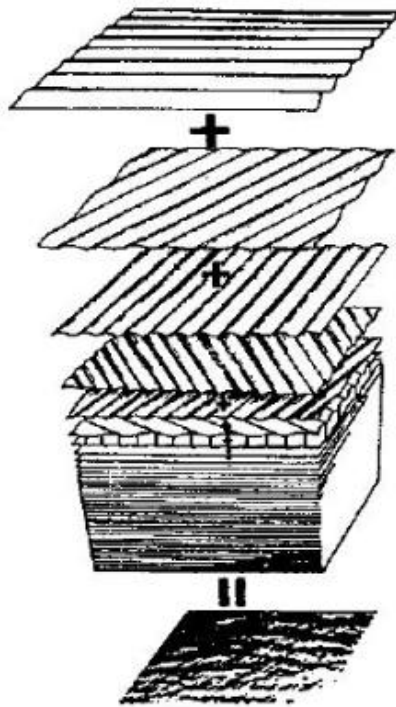
$$c_g = \frac{gT}{4\pi} \quad (15)$$

Portanto, para ondas regulares, pode-se calcular a potência P (W) por unidade de comprimento (m) de frente de onda em águas profundas através de (MAGAGNA, 2011):

$$P = E_T \cdot c_g = \frac{1}{8\pi} \rho g a^2 T = \frac{1}{32\pi} \rho g^2 H^2 T \quad (16)$$

Entretanto, a teoria linear de Airy é válida apenas para ondas monocromáticas, caracterizada por uma altura, um período e uma direção, propagando-se em um canal. Isso só é possível de ser observado em laboratórios. Nas superfícies dos mares, as ondas variam em altura, direção e período, principalmente perto da zona de geração (LISBOA, 2016). As ondas do mar são assim ondas pancromáticas, que representam estados de mar que resultam da sobreposição de múltiplas componentes senoidais, cada uma com diferentes períodos, direções e altura (Figura 7) (GODA, 2010). A distribuição destas componentes é representada pela forma espectral, que pode ser obtida a partir da transformada de Fourier que converte séries temporais para o domínio da frequência (YOUNG, 1999).

Figura 7 – Processo de formação da agitação marítima



Fonte: Pierson et al. (1958).

2.2.3 Teoria espectral das ondas

O objetivo de descrever as ondas oceânicas com espectros não é reproduzir em detalhes uma observação da superfície do mar, mas sim apresentar a superfície do mar através de um processo estocástico, ou seja, através da representação do mar como um processo aleatório que pode ser representado por uma série de Fourier (LISBOA, 2016).

Segundo Assis (2010), em um 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:

$$\sigma^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} S(f, \theta) df d\theta \quad (17)$$

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:

$$S(f) = \int_0^{2\pi} S(f, \theta) d\theta \quad (18)$$

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

Segundo Veloso (2014), a totalidade da energia do espectro (m_0) resulta assim da área total formada pelo espectro que é frequentemente caracterizado por apresentar um valor de pico para uma determinada frequência. A frequência para o qual ocorre esse valor é designada por frequência de pico (f_p). O período a que corresponde essa frequência é considerado o período de pico da onda (T_p) dentro das condições de mar que contêm maior quantidade energia e pode ser definido através da expressão:

$$T_p = \frac{1}{f_p} \quad (19)$$

Estes parâmetros são determinados utilizando os momentos espectrais, sendo eles m_n de ordem n , como demonstrado:

$$m_0 = \int S(f) df \quad (20)$$

$$m_{-1} = \int f^{-1} S(f) df \quad (21)$$

$$m_2 = \int f^2 S(f) df \quad (22)$$

Onde m_0 é denominado de momento-zero do espectro. Este parâmetro espectral é utilizado para achar a altura significativa H_s . O período médio T_m por sua vez é dado pela relação entre os momentos espectrais m_0 e m_2 e o período de energia T_e pela

relação entre os momentos espectrais m_1 e m_0 :

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (23)$$

$$T_m = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (24)$$

$$T_e = \sqrt{\frac{m_{-1}}{m_0}} \quad (25)$$

Ainda segundo o mesmo autor, os parâmetros mais utilizados para determinar as características dos dispositivos de aproveitamento da energia das ondas, são altura significativa (H_s) — que deriva da análise estatística e representa a média de um terço das ondas mais altas, analisadas durante um intervalo de tempo (MAGAGNA, 2011) — e o período de energia. Os períodos de pico, de energia e o período médio, podem ainda relacionar-se através das expressões:

$$T_p = 1,4 T_m \quad (26)$$

$$T_e = 1,2 T_m \quad (27)$$

$$T_e = 0,86 T_p \quad (28)$$

2.2.4 Extração da potência das ondas

Segundo Assis (2010), o potencial energético, que depende do espectro de variância, isto é, da forma do espectro que é característica de cada estado de mar, é

caracterizado pelo fluxo de energia por unidade de comprimento de frente de onda, que para águas profundas é:

$$P = \frac{\rho g^2}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty S(f, \theta) f^{-1} df d\theta \quad (29)$$

Dividindo e multiplicando a Equação 29 por m_0 , tem-se a Potência (W) por unidade de comprimento (m) para ondas irregulares e em águas profundas (CORNETT, 2006):

$$P_w = \frac{\rho g^2}{64\pi} T_e H_s^2 \quad (30)$$

Onde, ρ é a densidade da água, g é a gravidade, T_e é o período de energia e H_s é a altura significativa.

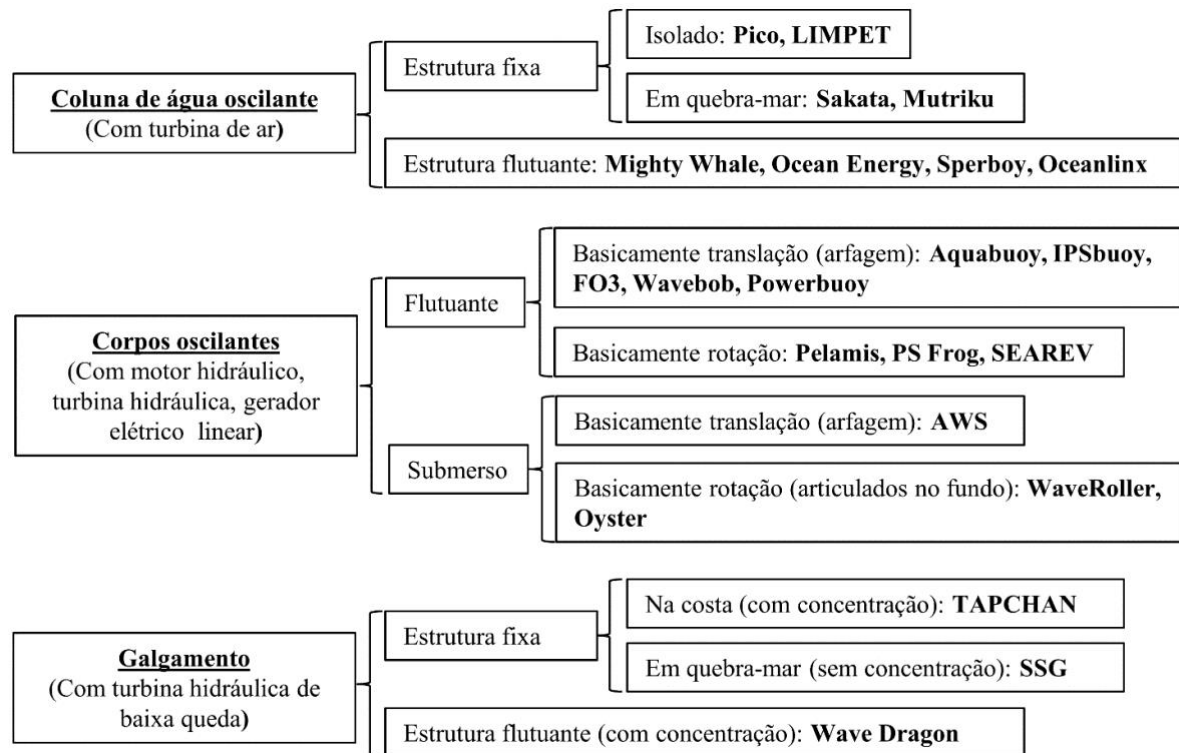
2.3 CONVERSORES DA ENERGIA OCEÂNICA

2.3.1 Energia elétrica a partir das ondas

A possibilidade de extração de energia das ondas do mar tem inspirado inúmeros pesquisadores e engenheiros em desenvolver e aprimorar equipamentos capazes de transformar a energia das ondas em energia elétrica. Como não há uma tecnologia ainda estabilizada, existe uma grande variedade de equipamentos com diferentes concepções de funcionamento para a extração da energia das ondas (LISBOA, 2016).

Segundo Falcão, 2010, os equipamentos conversores de energia das ondas podem ser classificados de acordo com a sua localização (junto à costa, perto da costa e ao largo), princípio de funcionamento (coluna de água oscilante, corpos oscilantes e galgamento) e tamanho (absorvedores pontuais ou grandes absorvedores). Na Figura 8 é mostrada a classificação, em três classes, de alguns equipamentos conversores segundo o princípio de funcionamento.

Figura 8 – Classificação dos equipamentos de extração de energia das ondas segundo o princípio de funcionamento



Fonte: Lisboa (2016).

2.3.1.1 Coluna de Água Oscilante

A coluna de água oscilante (CAO), objeto desse estudo, é formada por uma câmara parcialmente submersa com uma abertura abaixo da linha da água. Devido à ação das ondas, o nível da água dentro da câmara sobe e desce, comprimindo e expandindo o ar dentro da câmara que aciona uma turbina acoplada a um gerador. Nesse tipo de equipamento, geralmente, é utilizado uma turbina do tipo Wells que possui sentido de rotação único independente do sentido do escoamento do ar (LISBOA, 2016).

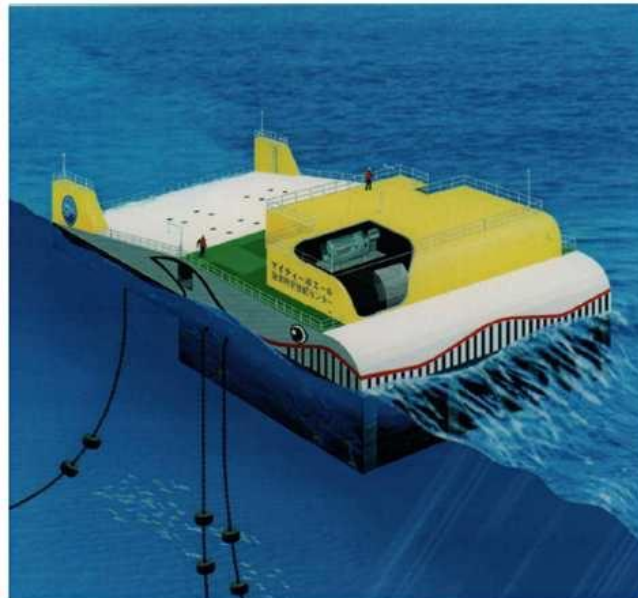
As estruturas do dispositivo CAO estão comumente localizadas na linha de costa (Figura 9), porém, mais recentemente se tem observado o desenvolvimento de estruturas flutuantes (Figura 10) que utilizam o mesmo princípio de funcionamento (EPE, 2017).

Figura 9 – Princípio de funcionamento de dispositivo de coluna de água oscilante para aproveitamento da energia das ondas



Fonte: E

Figura 10 – Protótipo do sistema CAO flutuante "Mighty Whale"



Fonte: Magagna (2011).

Protótipos em escala real foram construídos em Toftestallen (Noruega), Sakata (Japão), Vizhinjam (Índia), Pico (Portugal) e LIMPET (Escócia) com áreas transversais entre 80 m² a 250 m² e capacidade de potência instalada entorno de 60 kW a 500 kW (FALCÃO, 2010). Entretanto, até chegar à etapa de construção de um protótipo em

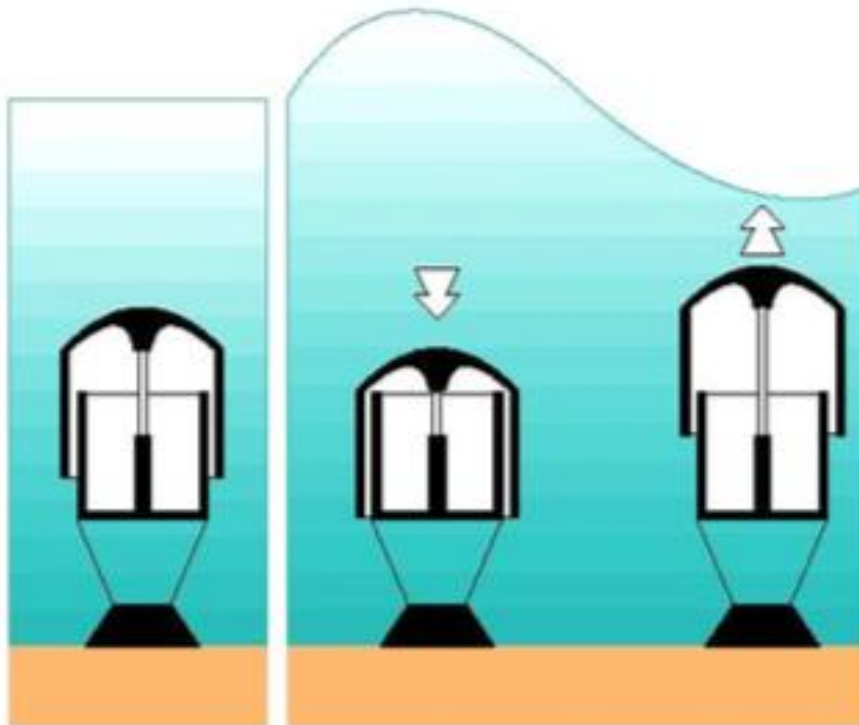
escala real, simulações numéricas e testes em escala reduzida são necessários para o projeto e a otimização das CAO's.

2.3.1.2 Corpos oscilantes

O princípio de funcionamento deste tipo de dispositivo é baseado na oscilação devido à incidência de ondas em corpos flutuantes ou submersos em relação a uma referência fixa ou a partes do próprio equipamento. Tais equipamentos podem ser classificados de acordo com o movimento utilizado para a absorção de energia das ondas (translação ou rotação) e a posição em relação ao fundeio do equipamento (flutuante ou submerso). O movimento relativo dos corpos oscilantes pode ser utilizado para comprimir o fluido de trabalho, girar uma turbina ou, no caso de alguns dispositivos de translação vertical, acionar gerador elétrico linear (LISBOA, 2016).

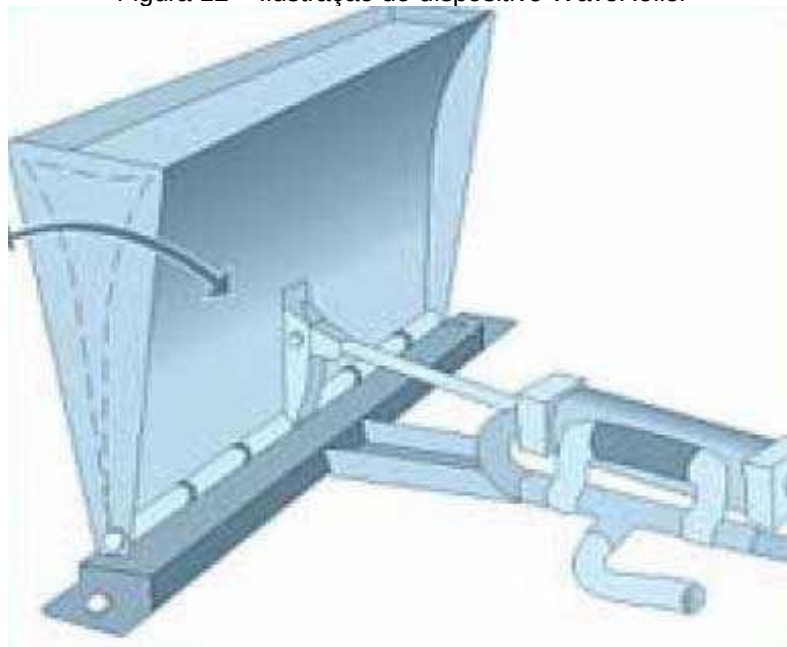
Nas Figuras 11, 12 e 13 estão alguns exemplos de dispositivos de corpos oscilantes. São eles: Pelamis, que são estruturas compostas de vários cilindros horizontais unidos por juntas articuladas que bombeiam óleo em alta pressão para motores hidráulicos quando submetida à ação das ondas, os motores hidráulicos acionam geradores elétricos (ASSIS, 2010); AWS (*Archimedes Wave Swing*), que é um dispositivo composto por duas partes, onde a inferior é fixada no fundo marinho e a superior (flutuante) se movimenta com o passar as ondas na superfície d'água acionando um gerador elétrico linear; WaveRoller, que são compostos de painéis móveis que se movimentam com o passar da onda acionando bombas e pistões hidráulicos (LISBOA, 2016).

Figura 11 – Dispositivo AWS. Esquema de funcionamento do sistema



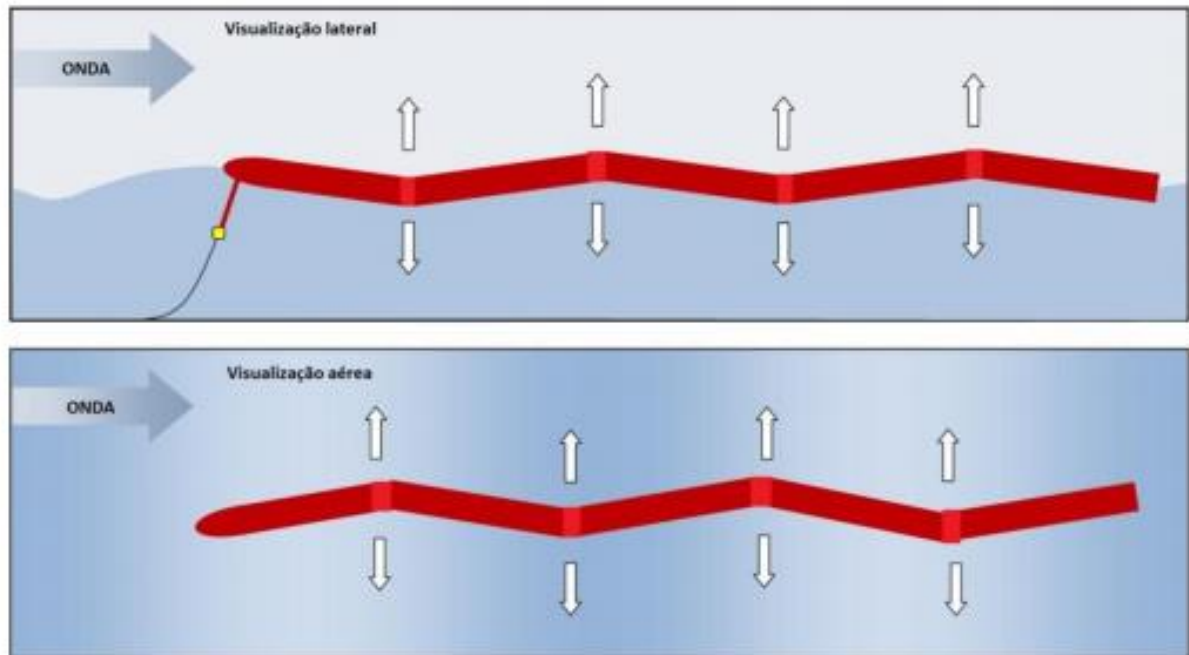
Fonte: Assis (2010).

Figura 12 – Ilustração do dispositivo WaveRoller



Fonte: Hyysalo (2007).

Figura 13 – Princípio de funcionamento do equipamento de conversão por atenuação para aproveitamento da energia das ondas do tipo Pelamis

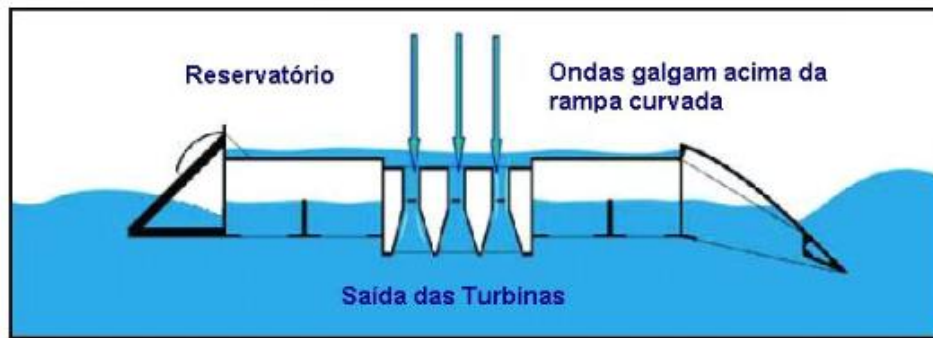


Fonte: Fleming (2012)

2.3.1.3 Galgamento

Outra maneira de transformar a energia das ondas em energia elétrica é através do armazenamento da água em reservatórios acima do nível médio do mar devido ao galgamento das ondas em WECs. Para conversão de energia, são instaladas turbinas hidráulicas de baixa queda na base do reservatório. Os dispositivos que utilizam o galgamento como princípio de funcionamento podem ser instalados junto à costa (em paredões rochosos), em quebra-mares ou em mar aberto (flutuantes fixos por cabos de ancoragem). Alguns desses dispositivos dispõem de estruturas laterais, denominadas concentradores, para a convergência das direções de incidência das ondas à direção normal da rampa de acesso ao reservatório. Na Figura 14 é mostrada uma ilustração do dispositivo *Wave Dragon* assim como o seu princípio de funcionamento.

Figura 14 – Esquema de funcionamento do Wave Dragon



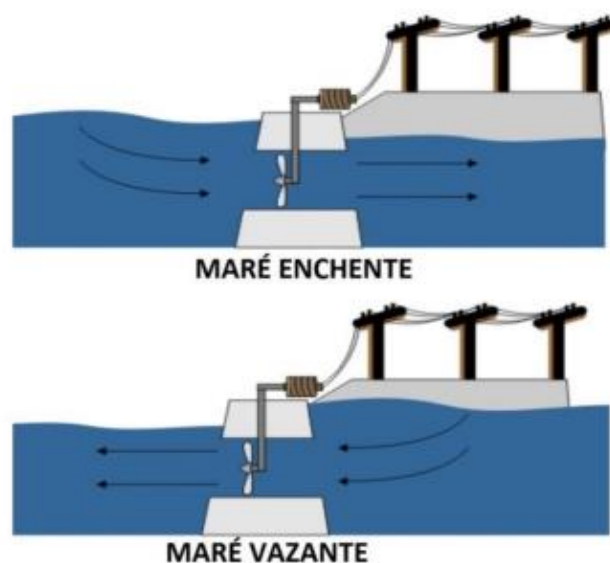
Fonte: Wave Energy Center (2004).

2.3.2 Energia elétrica a partir das marés

As usinas maremotrizes são comumente construídas em locais da zona costeira onde existe uma amplitude de maré elevada, e em regiões geomorfologicamente propícias para instalação de uma barragem (EPE, 2017).

Para simples esclarecimento do princípio de funcionamento, a energia potencial oriunda da variação de nível da água é convertida em energia quando ocorre a passagem da água por uma turbina, assim como numa hidrelétrica convencional. No entanto, as usinas de marés podem gerar energia elétrica tanto na maré vazante quanto na maré enchente (Figura 15) (EPE, 2017).

Figura 15 – Esquema de funcionamento de uma usina maremotriz



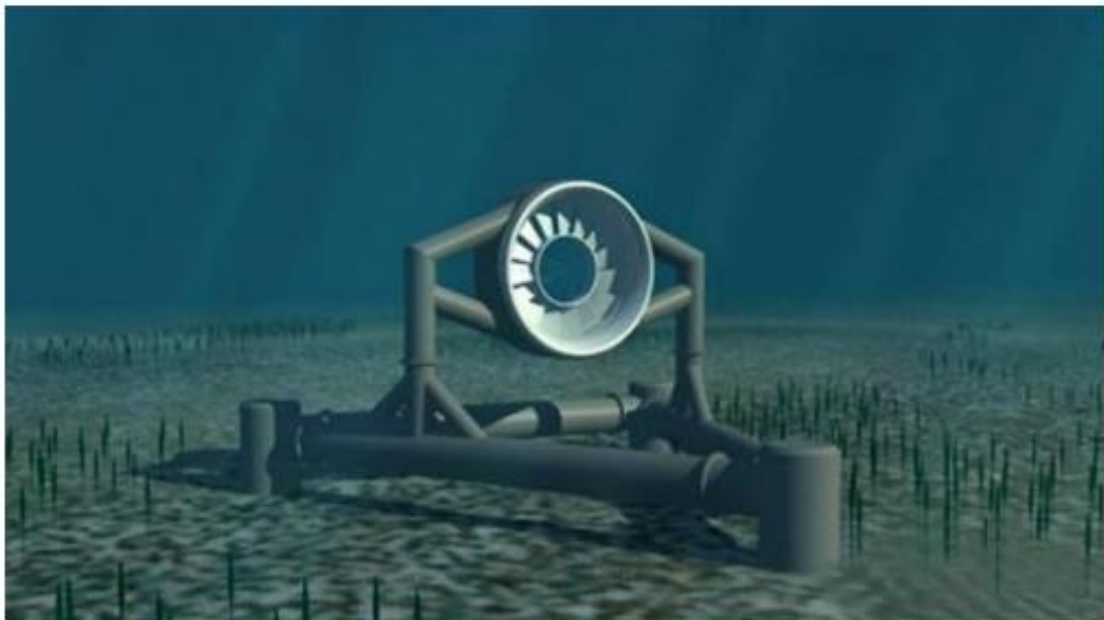
Fonte: EPE (2017).

2.3.3 Energia elétrica a partir das correntes marinhas

As correntes marinhas de maior velocidade, comumente associadas à maré, podem ser utilizadas para geração de energia, e a tecnologia para transformação da energia cinética em energia elétrica é muito similar à da geração eólica. Diversas tecnologias existem para captação desta energia e transformação em eletricidade, com a utilização de rotores com eixo horizontal ou vertical, que se movimentam com a passagem da água (EPE, 2017).

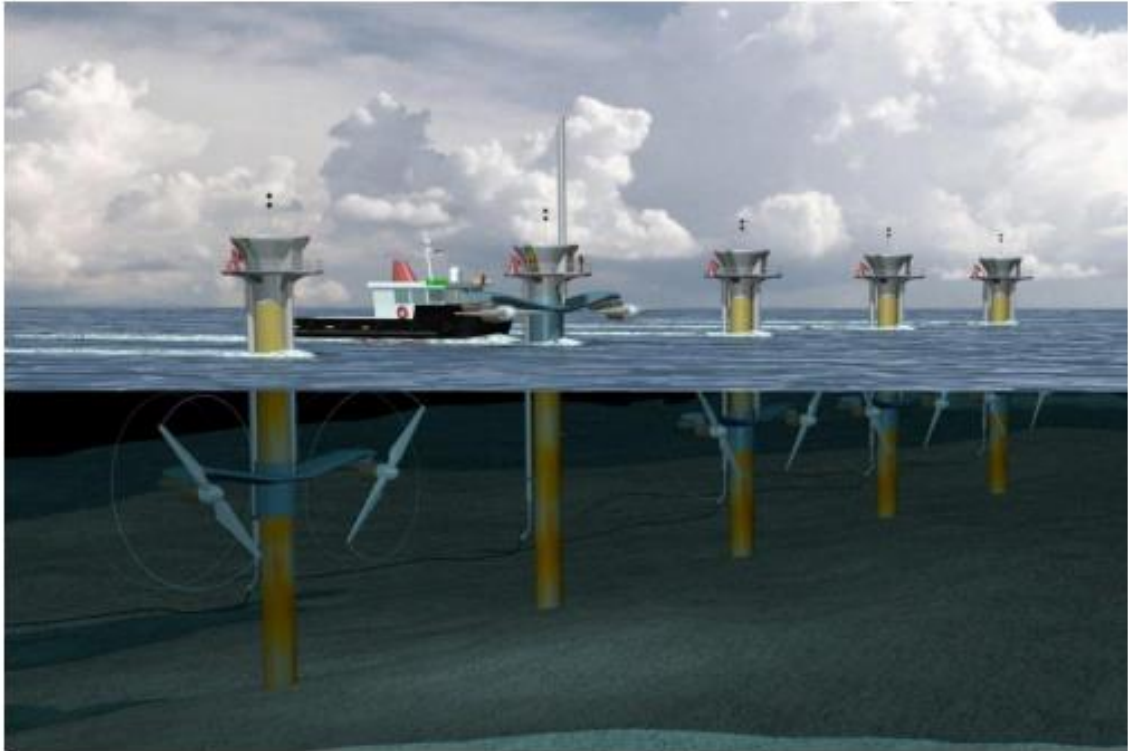
Como a tecnologia está em desenvolvimento, e as configurações dos rotores são adaptadas a cada estado de mar, existem diferentes arranjos para estes equipamentos. Os equipamentos podem ser fixos e funcionar em uma única profundidade (Figura 16), ou móveis, onde existe a possibilidade de regulação vertical para que seja captada a corrente de maior velocidade na coluna d'água (Figura 17) (EPE, 2017).

Figura 16 – Exemplo de equipamento fixo ao fundo de geração de eletricidade a partir das correntes marinhas



Fonte: EPE (2017).

Figura 17 – Exemplo de equipamento com regulagem vertical de geração de eletricidade a partir das correntes marinhas

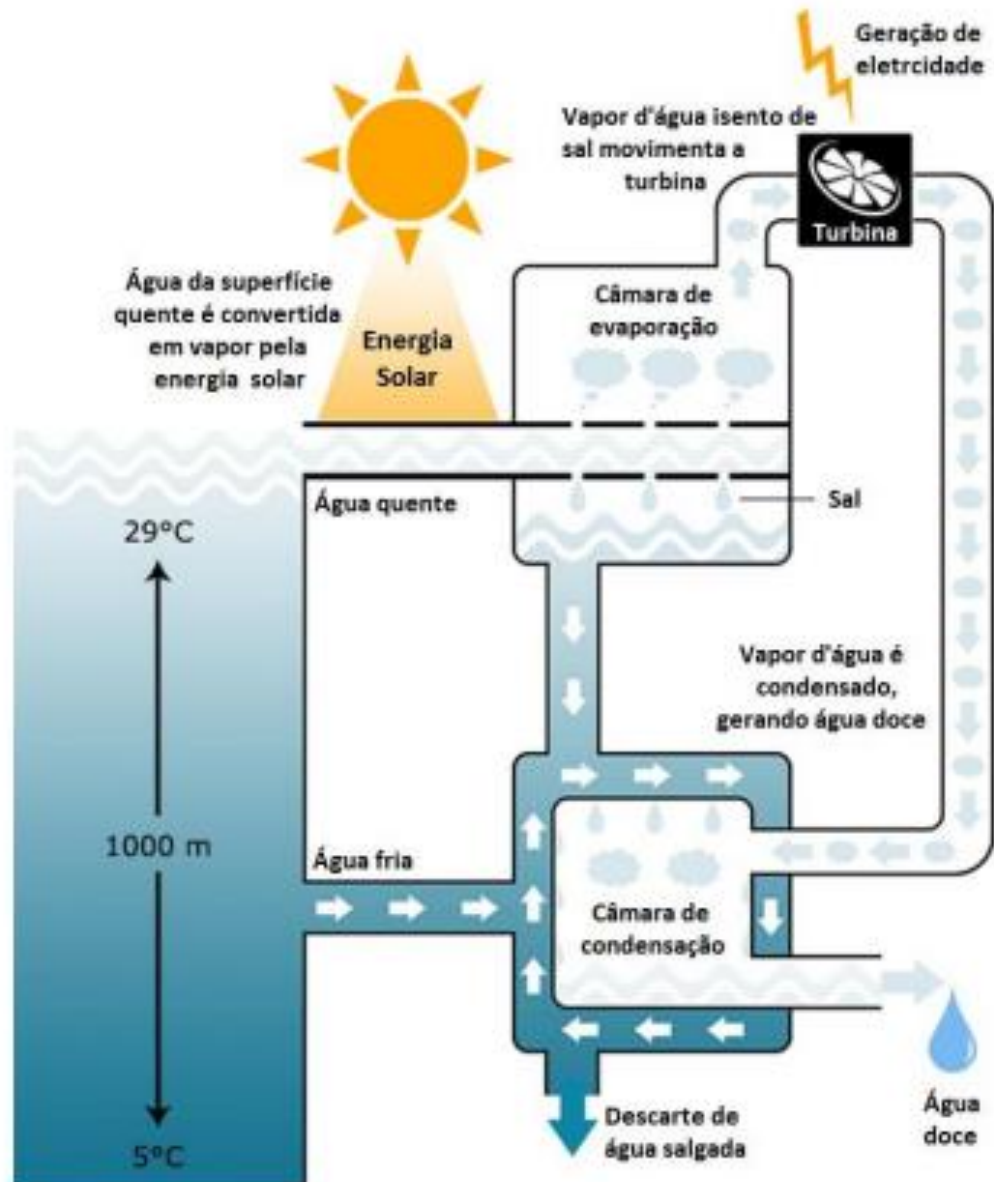


Fonte: EPE (2017).

2.3.4 Energia elétrica a partir do gradiente de temperatura

A diferença de energia térmica entre as camadas superficiais dos oceanos e as camadas mais profundas é convertida em energia elétrica por meio de uma turbina de baixa pressão, de alta eficiência, devido à baixa variação de temperatura. A Figura 18 a seguir apresenta de forma simplificada o processo de geração de energia pelo Ocean Thermal Energy Conversion – OTEC (EPE, 2017).

Figura 18 – Diagrama de funcionamento do OTEC



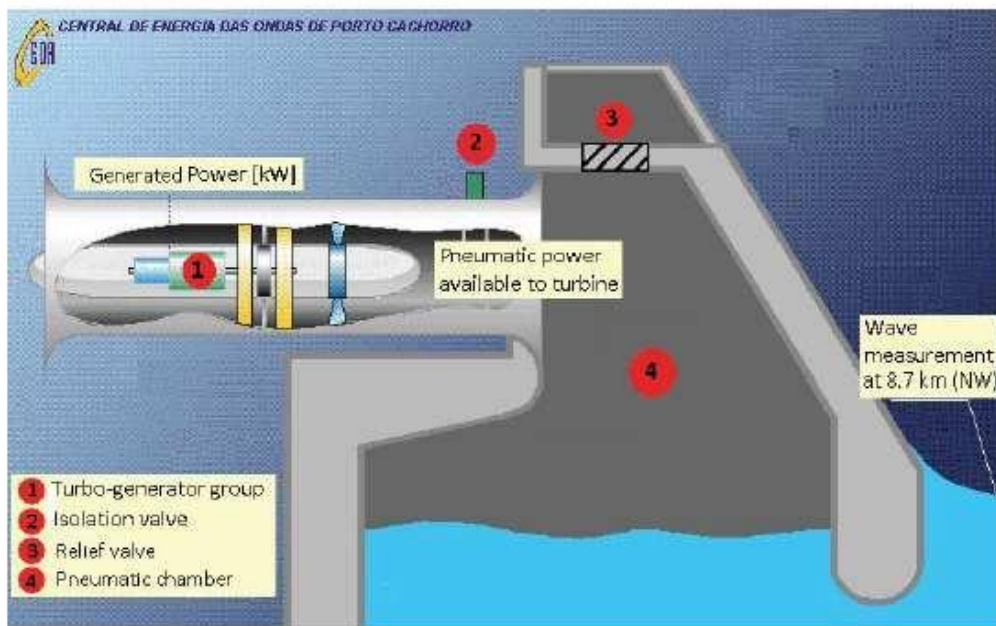
Fonte: EPE (2017).

3 COMPONENTES DO DISPOSITIVO DE COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE

De forma a perceber melhor o funcionamento de um sistema de Coluna de Água Oscilante (CAO), neste capítulo, será abordado de forma mais detalhada o funcionamento e as características de cada um dos componentes que a constituem. Uma central CAO é constituída essencialmente por uma câmara pneumática, uma turbina e um gerador elétrico.

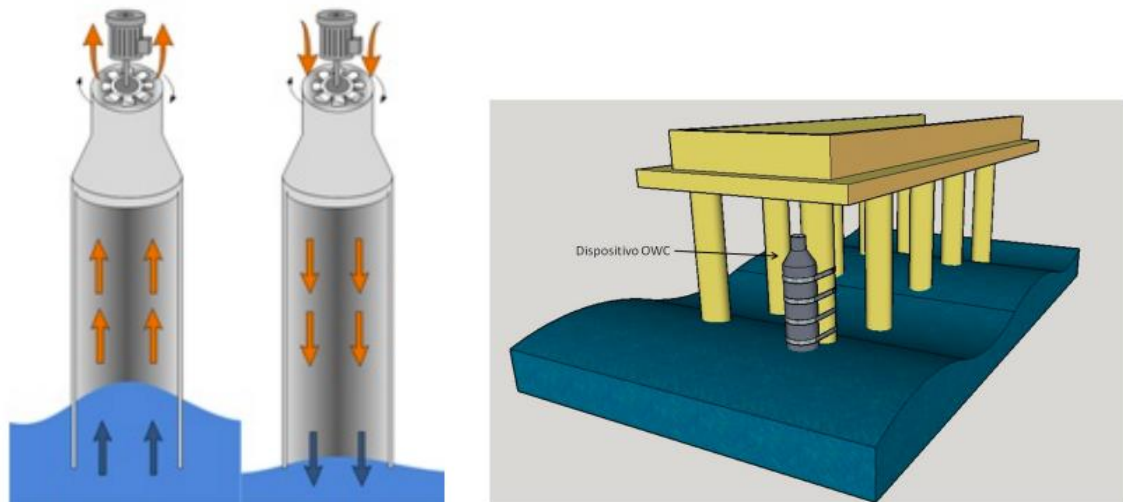
Como mostrado esquematicamente nas Figuras 19 e 20, o CAO é um dispositivo que converte a energia hidráulica das ondas em uma energia de fluxo oscilante de ar. A parte superior da câmara é composto pela turbina e pelo gerador, conectado através de uma caixa de engrenagens, além da válvula de controle de fluxo de ar para a turbina e outra válvula de alívio de pressão da câmara.

Figura 19 – Componentes de um sistema CAO costeiro



Fonte: Adaptado de International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE), 2011.

Figura 20 – Princípio de funcionamento do dispositivo de coluna de água oscilante em plataforma marítima



Fonte: Vecchia et al. (2016).

3.1 CÂMARA PNEUMÁTICA

A câmara pneumática é um elemento fundamental de um sistema CAO, pois é onde se estabelece a relação entre o domínio hidrodinâmico e o domínio aerodinâmico por via da superfície de água livre que através do seu movimento oscilatório vertical provoca a variação da pressão. A câmara atua assim como uma espécie de "caixa de velocidades pneumática", que converte o movimento lento da superfície da água, num fluxo de ar de alta velocidade (VELOSO, 2014).

A maioria das centrais CAO usa uma câmara pneumática constituída por uma parede vertical, havendo, contudo, alguns sistemas que usam uma parede inclinada, com vantagens relacionadas com o aumento da eficiência de captura (ISOPE, 2002). Este aumento de eficiência, é conseguido através da redução da turbulência, da agitação da água e também a partir do aumento da área plana de água para uma determinada área transversal da câmara, o que permite a ressonância da coluna de água determinada pela massa de água que entra na câmara. Seja com uma parede vertical ou inclinada, a parte mais baixa da parede da câmara, deve ser projetada de forma a estar sempre submersa.

Para modelar o comportamento das ondas dentro da câmara pneumática, é necessário ter em conta o espectro da agitação marítima de cada local, o que indica

a quantidade de energia disponível a diferentes frequências da onda. Assim, baseado em Bakar et al. (2011), assume-se que a variação da pressão do ar dentro da câmara pneumática de uma central CAO, pode ser modelada pela Equação 31, que dá o valor máximo de amplitude de pressão (Pa) para um determinado estado do mar.

$$\Delta P_t = \frac{8\pi^3 \rho_{agua} v_{onda}^2 H_s^2 r_{canal}}{\lambda^2 A} \quad (31)$$

Onde,

- ρ_{agua} : Densidade da água do mar (kg/m³)
- v_{onda} : Velocidade de propagação da onda (m/s)
- H_s : Altura significativa da onda (m)
- r_{canal} : Raio do canal (m)
- λ : Comprimento de onda (m)
- A : Área da secção transversal do canal (m²)

A Equação 31 foi obtida a partir de alguns pressupostos relacionados com a lei da conservação de energia. Desta forma foi assumido que o ar dentro da câmara pneumática é incompressível e foram desprezadas as perdas de energia, o que equivale a dizer que a energia gerada pela subida do nível da superfície da água dentro da câmara é igual à energia gerada a partir da deslocação do ar, segundo Bakar et al. (2011).

De forma a dotar a pressão de uma característica pulsante foi definido que a sua amplitude se comporta como uma senoide e que devido ao sentido unidirecional de rotação da turbina se torna possível usar o seu valor absoluto (VELOSO, 2014).

3.2 TURBINA

A turbina de ar é o elemento mais crítico na conversão de energia e é onde ocorre a maioria das perdas de energia, razão pela qual se tem dado tanta importância à aerodinâmica da turbina.

Nas centrais CAO, o fluxo de ar que atravessa a turbina é aleatório e altamente variável sobre diversas escalas de tempo, variando constantemente dependendo das variações sazonais. Não surpreende assim, que a eficiência de uma turbina de ar de uma central CAO seja substancialmente mais baixa do que uma turbina de água, vapor, gás ou vento, que trabalham em circunstâncias quase constantes (VELOSO, 2014).

Duas turbinas diferentes estão atualmente em uso em todo o mundo para a geração de energia por energia das ondas, são elas, a turbina Wells e a turbina de impulso (AMUNDARAIN et al., 2011). Ambas as turbinas estão atualmente em operação em diferentes usinas na Europa, Índia, Japão, Coreia e assim por diante (THAKKER et al., 2007).

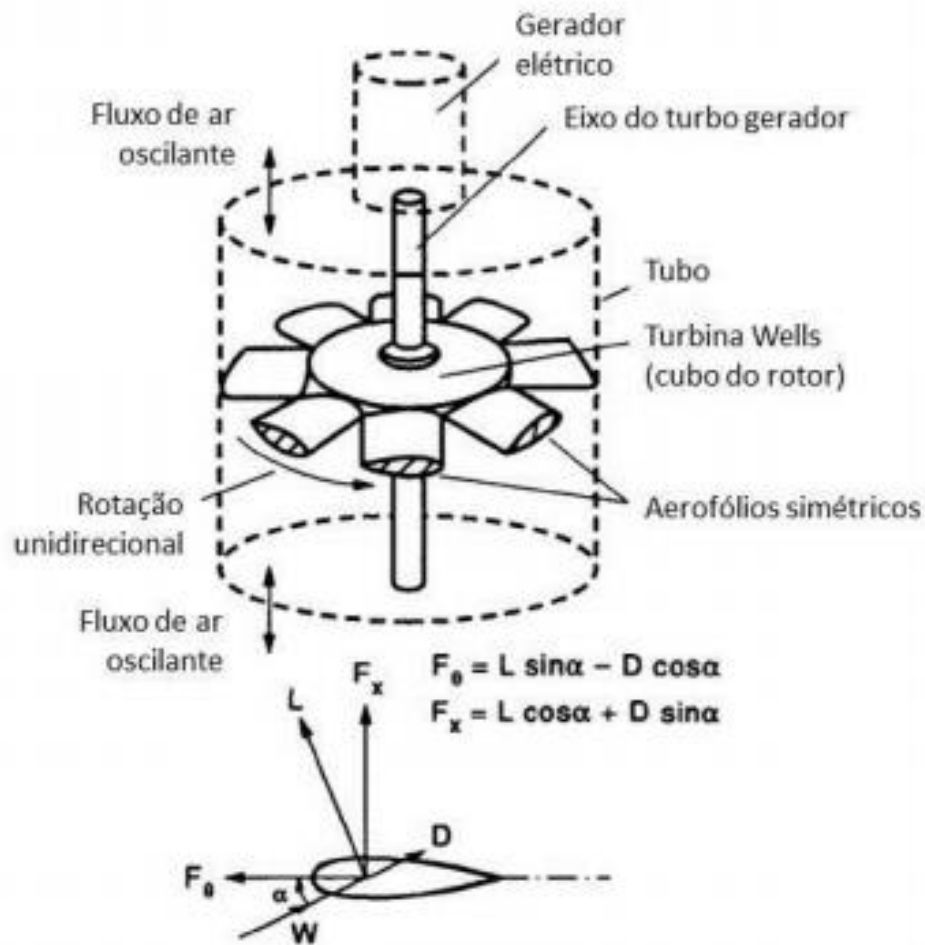
3.2.1 Turbina Wells

A turbina Wells é uma turbo-máquina motriz auto-retificadora especialmente desenvolvida para aproveitar o escoamento alternado de ar que ocorre nos dispositivos de conversão da energia das ondas do tipo CAO (TORRES, 2015). Esse modelo de turbina foi inventado por volta de 1977, em Belfast, pelo Dr. A. A. Wells e tem sido profundamente estudada e reconhecida internacionalmente como a mais indicada para equipar sistemas CAO (VELOSO, 2014).

É uma turbina do tipo que converte o fluxo de ar bidirecional em energia mecânica na forma de potência no eixo unidirecional, esta é usada por sua vez para mover o gerador acoplado (AMUNDARAIN et al., 2011).

As turbinas Wells são turbinas axiais que possuem um conjunto de pás radialmente fixado com secções constantes construídas por um tipo de perfil hidrodinâmico simétrico tipo NACA 00xx posicionado a 90° ao eixo do rotor, no plano de rotação normal ao fluxo incidente (RAGHUNATHAN, 1995). A força tangencial do rotor funciona apenas em uma direção, embora o fluxo de ar seja oscilante, conseqüentemente, a turbina gira no mesmo sentido, sem retificar válvulas para corrigir o fluxo oscilante e produz energia, independentemente do modo como o ar está fluindo (DHANASEKARAN; GOVARDHAN, 2005).

Figura 21 – Turbina tipo Wells e as forças que atuam na turbina



Fonte: Raghunathan (1995).

Embora não atinja um rendimento máximo tão elevado como o de uma turbina convencional, tem a vantagem importante de alcançar velocidades de rotação elevadas com velocidades de escoamento de ar relativamente baixas (VELOSO, 2014).

Para evitar valores de pressão excessivos na câmara que ponham em risco o equipamento e também para atenuar o efeito de *stall* da turbina Wells, — efeito no qual a potência da turbina decresce rapidamente com o aumento do módulo da queda de pressão a que a ela está sujeita — algumas centrais possuem uma válvula de alívio no topo da câmara pneumática que permite dissipar o fluxo de ar excessivo e ajustar a velocidade da turbina ao estado do mar incidente. Apesar de não ter sido concebida para o efeito (operação constante), esta válvula pode ser usada como uma forma de

controle (lento) da central, se for conhecida antecipadamente a altura das ondas incidentes (SARMENTO, 2010).

Figura 22 – Turbina de Wells da central do Pico



Fonte: Falcão (2000).

3.2.1.1 Curvas de Performance da Turbina Wells

No estudo das turbinas é comum a utilização de coeficientes adimensionais para a caracterização destas. A vantagem destes coeficientes resulta do fato de, através da combinação adequada de variáveis físicas importantes no funcionamento da turbina, ser possível comparar máquinas geometricamente semelhantes, independentemente das suas dimensões e velocidade de rotação (VELOSO, 2014).

A relação entre a pressão dentro da câmara e a vazão mássica afeta diretamente o acoplamento entre as partes aerodinâmicas e hidrodinâmicas em uma CAO (LISBOA,

2016). Para uma turbina do tipo Wells, essa relação é linear (FALCÃO; JUSTINO, 1999). Para esta turbina e qualquer outra turbo máquina, a potência, a vazão mássica e as diferenças de pressão são relacionadas com o tamanho do rotor e a velocidade de rotação deste (LISBOA, 2016). Segundo Falcão e Justino (1999), essas relações podem ser expressas na forma adimensional para representar o comportamento de turbinas similares que possuem a mesma forma, mas tamanhos diferentes. Os parâmetros adimensionais são mostrados nas Equações 32, 33 e 34:

$$\Phi = \frac{Q_t}{\rho_{ar} w_m D^3} \quad (32)$$

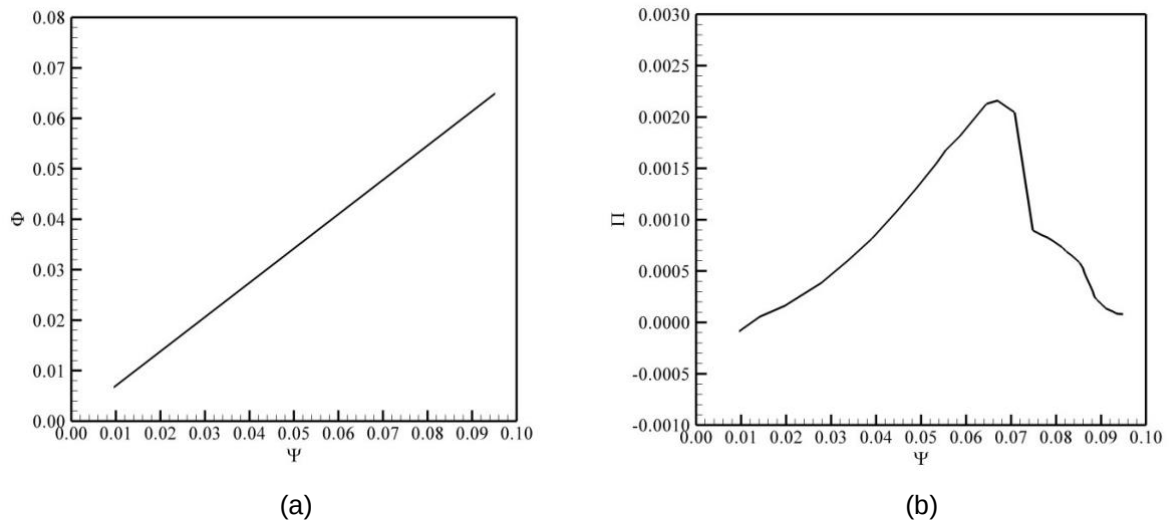
$$\Psi = \frac{\Delta P_t}{\rho_{ar} w_m^2 D^2} \quad (33)$$

$$\Pi = \frac{P'}{\rho_{ar} w_m^3 D^5} \quad (34)$$

Os termos Φ , Ψ e Π são respetivamente, os coeficientes adimensionais de vazão mássica, pressão e potência para uma determinada configuração geométrica, onde D é o diâmetro exterior do rotor da turbina, w_m é a velocidade de rotação expressa em radianos por segundo, ρ_{ar} a massa específica de referência do ar (kg/m^3), Q_t e ΔP_t são, respetivamente, a vazão mássica e a diferença de pressão a que a turbina está sujeita. P' é a potência mecânica desenvolvida pela turbina.

Curvas que relacionam os parâmetros adimensionais de vazão mássica com os de pressão e de potência mostram o comportamento de cada tipo de turbina a uma velocidade constante. Na Figura 23 são mostradas as curvas para a turbina do tipo Wells instalada na planta de geração de energia de Pico (FALCÃO; JUSTINO, 1999).

Figura 23 – Curvas de performance da turbina do tipo Wells instalada na planta de geração de energia de Pico. (a) Parâmetro adimensional de pressão (Ψ) versus parâmetro adimensional de vazão mássica (Φ) e (b) parâmetro adimensional de pressão (Ψ) versus parâmetro adimensional de potência (Π)



Fonte: Falcão; Justino (1999).

Como se pode verificar, observando a Figura 23, o coeficiente adimensional de potência (Π), tem um máximo para um determinado valor de Ψ , a qual se chama Ψ_{crit} . Assim, quando $|\Psi| = \Psi_{crit}$, a potência mecânica (P'), tem um valor máximo para uma dada velocidade de rotação. Convém limitar o valor da queda de pressão a que a turbina está sujeita, impedindo-se que $|\Delta P_t|$ exceda um valor crítico (P_{crit}), a partir do qual o funcionamento do sistema pode colocar em risco os equipamentos.

Se $\Psi > \Psi_{crit}$, a turbina entra em perda aerodinâmica, isto é, para uma determinada velocidade de rotação, a potência decresce rapidamente com o aumento do módulo da queda de pressão a que a turbina está sujeita. Este conhecido comportamento da turbina de Wells é conhecido como o efeito de *stall* e segundo a curva de performance que relaciona o coeficiente de pressão com o coeficiente de potência (Figura 23(b)), o Ψ_{crit} é aproximadamente 0,065. Devido a esta característica da turbina, deverão ser tomadas medidas para que o funcionamento desta seja feito para que $\Psi \approx \Psi_{crit}$. Uma dessas medidas é controle da velocidade de rotação da turbina, que permite ajustar a velocidade do sistema de forma a que acelere suficientemente rápido em resposta ao aumento do fluxo e da pressão a que a turbina está sujeita, evitando assim perdas aerodinâmicas.

A utilização de uma válvula em série ou em paralelo com a turbina é uma outra solução que permite evitar que $|\Delta P_t|$ exceda o seu valor crítico e consequentemente, que a turbina entre em perda, diminuindo a pressão e o fluxo de ar para valores mais adequados à velocidade da turbina e evitando também que esta possa ser danificada por condições adversas.

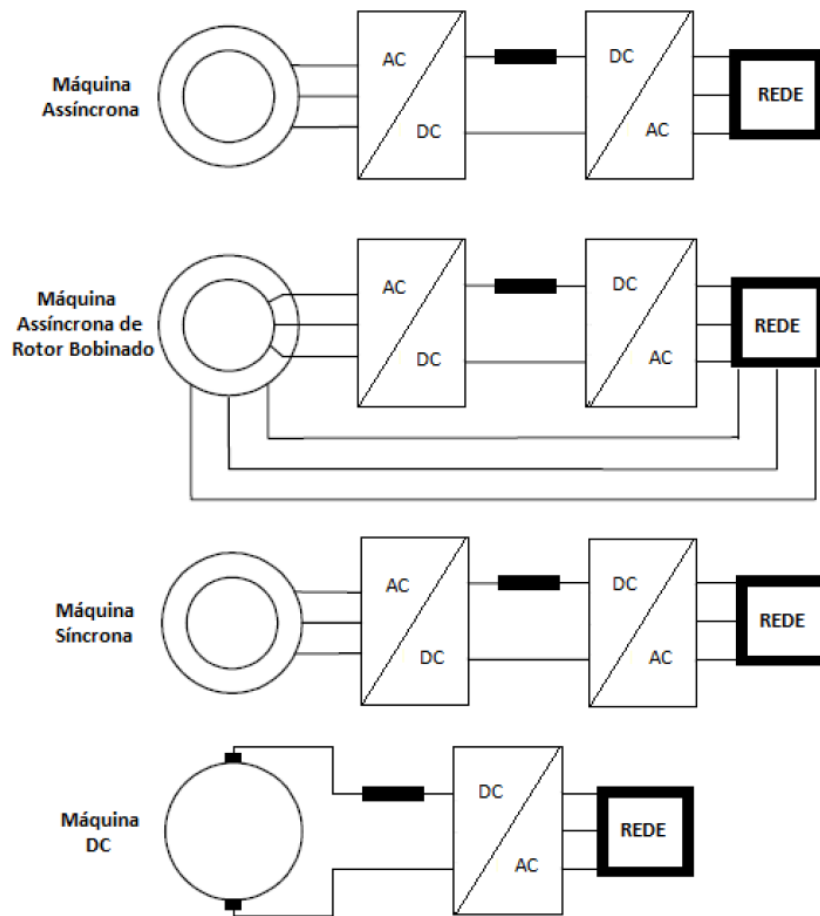
3.3 GERADOR

Tradicionalmente o aproveitamento da energia mecânica em energia elétrica é feito maioritariamente através ou de geradores síncronos ou de máquinas assíncronas. A potência à entrada da turbina é um parâmetro que varia tanto a curto prazo, resultado das oscilações das ondas, como a longo prazo, fruto das condições do mar não serem constantes, o que provoca flutuações na potência entregue pelo gerador à carga (VELOSO, 2014). Para se tirar o máximo partido da energia disponível em cada momento, a turbina deve ajustar-se às condições de fluxo do ar. Isto é conseguido através do ajustamento das pás da turbina e/ou através da variação de velocidade de rotação da turbina (AMUNDARAIN et al., 2011).

No caso de turbina Wells com geometria fixa, a adaptação às condições do mar tem que ser feita exclusivamente a partir da variação da velocidade de rotação. O efeito de *stall* pode ser evitado se a turbina acelerar suficientemente rápido em resposta ao fluxo de ar que a atravessa, o que pode ser alcançado modificando a característica torque/escorregamento do gerador, permitindo que o sistema atinja maiores velocidades (VELOSO, 2014).

A velocidade média do conjunto turbina-gerador determina a potência entregue à rede e depende da potência disponível nas ondas marítimas. Se a potência disponível for baixa, então o sistema funcionará a uma velocidade baixa, funcionando com uma velocidade alta para potências mais elevadas. Isto implica que o gerador a ser utilizado, para ligação à rede, seja do tipo VVFC (velocidade variável, frequência constante). Este tipo de geradores faz uso da eletrônica de potência para conseguir o controle da frequência e tensão de saída. Entre as soluções disponíveis para geradores do tipo VVFC, são encontradas as alternativas da Figura 24 (VELOSO, 2014).

Figura 24 – Geradores do tipo VVFC



Fonte: Ramos (1997).

Das alternativas apresentadas, o gerador tipicamente usado em sistemas CAO é o Gerador de Indução de Dupla Alimentação (GIDA) (VELOSO, 2014), que é um tipo de gerador que permite a operação em velocidade variável através da inserção de um conversor de potência no seu rotor. Assim, o GIDA é uma Máquina de Indução de Dupla Alimentação (MIDA) que, como o nome diz, recebe uma alimentação no estator e outra no rotor por meio de um inversor de frequência, através de anéis e escovas. O inversor garante o controle de velocidade da máquina (JARDIM, 2014).

3.4 DINÂMICA ROTACIONAL

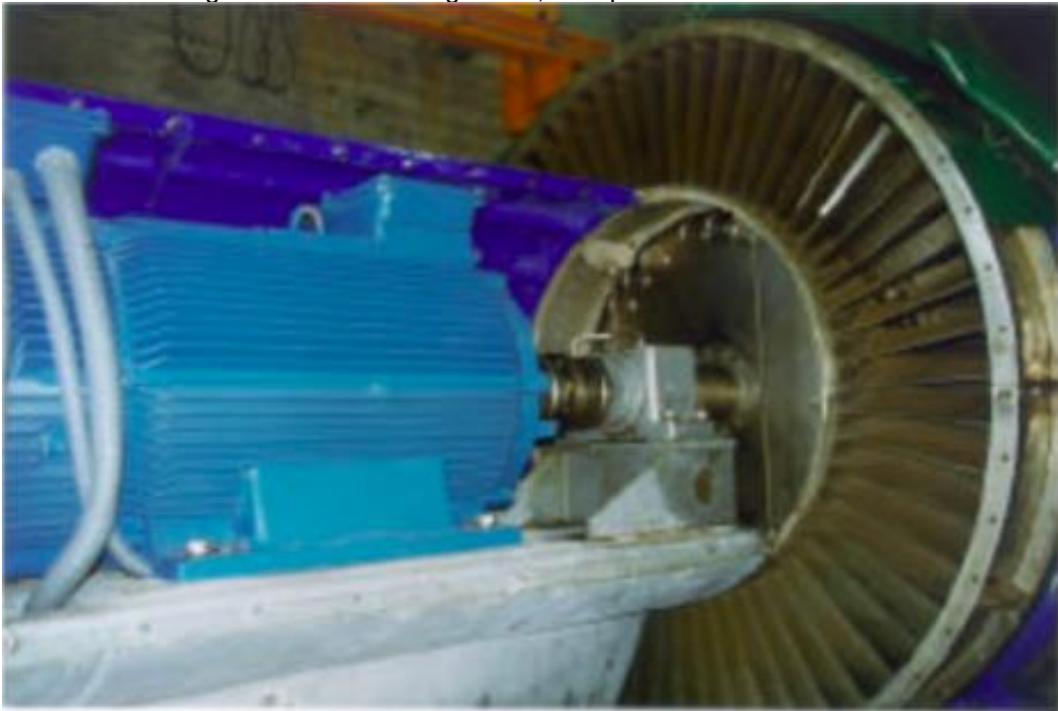
A equação para dinâmica rotacional desenvolvida pelo sistema entre a turbina Wells e a máquina de indução pode ser expressa pela equação do movimento também conhecida como primeira lei de Newton (AMUNDARAIN et al., 2010):

$$J \left(\frac{dw_m}{dt} \right) = T_t - T_g \quad (35)$$

Onde:

- J : Momento de inércia do Sistema ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
- w_m : Velocidade angular do rotor (rad/s)
- T_t : Torque produzido pela turbina ($\text{N} \cdot \text{m}$)
- T_g : Torque produzido pelo gerador ($\text{N} \cdot \text{m}$)

Figura 25 – Turbina e gerador, com parte do duto removido



Fonte: Falcão (2000).

4 LEVANTAMENTO DO CLIMA DE 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 (ASSIS, 2010).

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). Essas dificuldades podem ser compensadas pela utilização de medições remotas obtidas por satélites ou pelo uso de modelos espectrais de onda, que obtêm as características das ondas a partir de dados meteorológicos e batimétricos (HOULTHUIJSEN, 2007).

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).

Geralmente, o clima de ondas para uma localização específica é obtido pela análise estatística de longo período de um conjunto de dados de onda, com período de abrangência suficientemente longo (acima de 10 anos). Frequentemente, as análises são limitadas à quantificação da altura significativa da onda, sua distribuição de longo período, e seu período de retorno. A estatística de longo período pode ser estimada em uma localização geográfica através (a) de toda observação de onda disponível (aproximação de distribuição inicial), (b) do valor máximo dos parâmetros de onda em tempestades (aproximação *peak-over-threshold*) ou (c) do valor máximo por ano (aproximação máxima anual) (HOULTHUIJSEN, 2007).

A aproximação de distribuição inicial, geralmente, é o primeiro passo na análise de séries temporais de longo período. Nesta aproximação, a altura significativa da onda (H_s), período médio da onda (T_m) e direção média da onda (D), são parâmetros utilizados para estimar a distribuição de probabilidade conjunta (H_s , T_m , D). Frequentemente, os resultados são apresentados em histogramas bi-dimensionais relacionando estes três parâmetros. Estes histogramas podem ser avaliados por sazonalidade ou por mês em relação ao número total de anos (HOULTHUIJSEN, 2007).

Atualmente, a climatologia de ondas tem sido obtida a partir da utilização de medições remotas feitas por satélites, *hindcast* de ondas por modelos computacionais e através de dados de *downscaling* produzidos a partir de reanálises de vento e ondas disponibilizadas pelo NCEP (KALNAY et al., 1996; KISTLER et al., 2001) e pelo ECMWF (SIMMONS; GIBSON, 2000) (WMO, 1998).

Diversos estudos têm sido realizados utilizando a modelagem computacional de ondas como principal ferramenta na avaliação tanto do clima de ondas quanto do estado de agitação marítima em diversas regiões marinhas (WANG; SWAIL, 2001; GORMAN et al., 2003; GUEDES SOARES et al., 2002; ABADIE et al., 2006; HSU et al., 2004; BROWNE et al., 2007; ROGERS et al., 2007) (PIUMBINI, 2009).

4.1 MODELAGEM NUMÉRICA DAS ONDAS

A descrição matemática das ondas superficiais tem um grande elemento aleatório, o que requer uma descrição estatística. Os parâmetros estatísticos representantes do campo de ondas caracterizam as condições sobre um certo período de tempo e extensão espacial (NOGUEIRA, 2014). Uma das mais importantes considerações na concepção de um modelo numérico de ondas é o tempo de processamento, muito afetado pelo sistema numérico de propagação de ondas no espaço geográfico utilizado, normalmente explícito em forma de diferenças finitas (HOULTHUIJSEN, 2007).

Em geral, esses modelos podem ser divididos em duas classes: modelos que resolvem a fase (*phase resolving models*), os quais estimam tanto a amplitude como

a fase de ondas individuais, e modelos de fase média (*phase averaging models*) ou espectrais, os quais estimam quantidades médias, tais como espectro da onda, ou suas propriedades integrais, como altura significativa, período médio, dentre outros. (NOGUEIRA, 2014).

De acordo com Young (1999), os modelos que resolvem a fase da onda requerem um esforço computacional muito grande e, conseqüentemente, devem ser usados somente onde são estritamente necessários. Logo, o domínio de aplicação dos modelos que resolvem a fase é geralmente restrito à regiões onde ocorrem interações da onda com estruturas marinhas (portos, quebra-mares, etc.) ou regiões costeiras com rápida mudança de profundidade.

Por sua vez, os modelos espectrais (*phase averaging models*) não necessitam de uma resolução espacial tão grande, sendo aplicados em situações onde as propriedades das ondas variam lentamente, na escala de muitos comprimentos de onda. Por esse motivo, tais modelos possuem uma gama de atuação relativamente mais extensa, posto que contam com os processos de geração, de dissipação e interações onda-onda em águas profundas e rasas e representam de forma eficaz os processos de refração e, mais recentemente, difração (HOULTHUIJSEN et al., 2003).

O estado da arte dos modelos espectrais encontra-se nos modelos de Terceira Geração, como o WAM (WAMDI GROUP, 1988), WAVEWATCH III (TOLMAN, 2009), TOMAWAC (BENOIT et al., 1996) e SWAN (BOOIJ et al., 1999).

4.2 ÁREA DE ESTUDO

O estado do Espírito Santo está localizado na região sudeste do Brasil e tem como limites o Oceano Atlântico a leste, o estado da Bahia ao norte, Minas Gerais a oeste e noroeste e o estado do Rio de Janeiro ao sul. Possui um litoral pouco recortado com orientação preferencial nordeste-sudoeste e extensão de pouco mais de 400km. A plataforma continental é mais extensa na porção norte do estado e mais estreita na porção centro-sul. A 1140km da costa, aproximadamente, a leste da Baía do Espírito Santo, em pleno Oceano Atlântico, encontram-se a Ilha da Trindade (12,5 km²) e as Ilhas de Martim Vaz, situadas a 30km de Trindade (Figura 26) (PIUMBINI, 2009).

Figura 26 – Mapa representando o estado do Espírito Santo e a região oceânica adjacente



Fonte: Piumbini (2009).

O ambiente marinho costeiro e oceânico da Bacia do Espírito Santo, além de possuir uma área explorável com grande potencial para desenvolvimento no que diz respeito à produção de petróleo e gás natural (NOGUEIRA, 2014), é utilizado de forma direta e indireta por atividades portuárias, de navegação, e também do turismo e lazer (PIUMBINI, 2009).

Similar a várias localidades no mundo, na região sudeste do Brasil, existe poucos dados observacionais e de campo para descrever, de forma detalhada, a climatologia de ondas. De maneira geral, dados de ondas para o litoral brasileiro são escassos e limitados aos levantados nas proximidades de portos por ocasião de suas construções. Embora existam medições instrumentais de ondas desde 1962, poucas campanhas tiveram longa duração, a maioria é em águas rasas e, praticamente, não há superposição de períodos de coleta de dados (PIUMBINI, 2009).

Cita-se, por exemplo, as coletas realizadas pelo INPH (Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias) durante o ano de 1979, na década de 80 e parte da década de 90 (1990 a 1994), nas proximidades do Porto de Praia Mole, localizado em Vitória. Tais

medições foram realizadas utilizando um ondógrafo convencional e a direção da onda foi estimada a partir de observação visual. No relatado estudo, foi encontrado uma altura significativa de onda média de 1m, um período de 7 a 9s e direções predominantes de 45° a 75° (ACCETA et al., 2003).

Atualmente, boa parte dos estudos na região tem sido feita com base em resultados de modelos numéricos ou através de dados produzidos a partir de reanálises de vento e ondas disponibilizadas pelo NCEP e pelo ECMWF (NOGUEIRA, 2014).

Um dos principais trabalhos realizados na região é o de Piumbini (2009), que usou dados de reanálise do *European Centre for Medium-range Weather Forecast* - ECMWF para um período de 45 anos. Os dados de onda do ECMWF são baseados em resultados do modelo espectral de ondas WAM e em dados de satélite. Este estudo teve como foco a estatística direcional das ondas, bem como a análise dos parâmetros de altura significativa e período médio da onda associados a padrões de onda mais frequentes e àqueles associados a eventos extremos (PIUMBINI, 2009). O autor avaliou o clima de ondas considerando uma amostragem de 14 pontos ao longo da região marítima defronte ao Espírito Santo, contemplando desde a plataforma continental até profundidades em torno de 4500m.

4.3 REANÁLISE ECMWF

Na tentativa de suprir a carência de dados oceanográficos e meteorológicos em diversas localidades do mundo, alguns centros de previsão meteorológica e oceânica têm disponibilizado dados de análises globais de longo período e de alta qualidade de condições atmosféricas, de terra e onda-oceano, que são utilizadas em várias áreas da oceanografia e nas engenharias. O *National Center for Atmospheric Research* – NCAR / *National Centers for Environmental Prediction* – NCEP e o *European Centre for Medium-range Weather Forecast* - ECMWF são os mais conhecidos destes centros que disponibilizam reanálises de dados de ondas (PIUMBINI, 2009).

Os dados de reanálise do ECMWF inicialmente foram avaliados a partir do Projeto ERA-15 contemplando o clima de ondas para um período de 15 anos a partir de dezembro de 1978 a fevereiro de 1994. Este conjunto de dados foi substituído, em

2003, pelo ERA-40 que disponibiliza dados de reanálise de ondas abrangendo 45 anos a partir de setembro de 1957 a agosto de 2002 (KÅLLBERG et al., 2007).

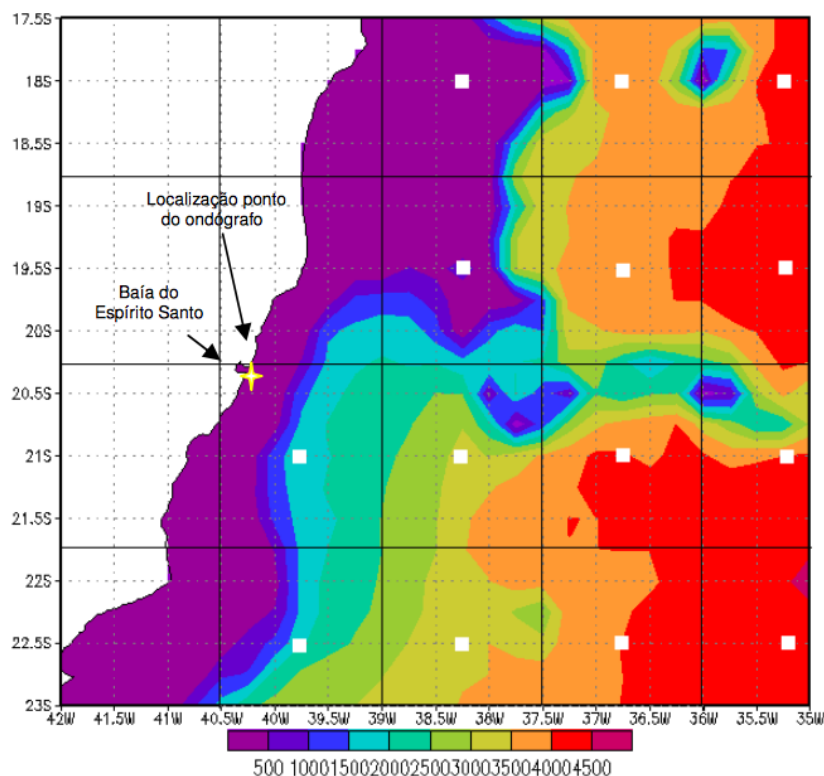
A reanálise de ondas é baseada nos dados obtidos pelo modelo espectral de terceira geração WAM e em dados de satélite. O WAM é, dos modelos espectrais, considerado o estado-da-arte em simulações de ondas geradas pelo vento em águas profundas. Entre os processos físicos, estão às iterações não-lineares quádruplas, necessárias para descrever apropriadamente a evolução do espectro em águas com profundidade maiores que 100 m. Uma descrição completa sobre o modelo pode ser obtida em Grupo WAMDI (1988).

Os dados de ondas do modelo WAM são validados a partir de dados de bóia e de medidas de altimetria e *Synthetic Aperture Radar* - SAR a partir do satélite *European Remote-sensing Satellite* - ERS 1 e 2 (JANSSEN et al., 2003).

No trabalho de Piumbini (2009), os dados de reanálise de onda do ECMWF utilizados para caracterização do clima de ondas no Oceano Atlântico adjacente ao ES é verificado qualitativamente através da comparação de sua tendência com dados de medição *in situ* obtidos em um ponto próximo à costa do ES, como demarcado na Figura 27.

Em Piumbini (2009), a climatologia de ondas para o Espírito Santo é obtida através da amostragem secundária e do tratamento estatístico dos dados de reanálise do ECMWF para um período de 45 anos, entre setembro de 1957 a agosto de 2002. O clima é avaliado na área marítima adjacente à costa do estado do ES que abrange desde sua plataforma continental até profundidades em torno de 4500m, cuja localização está entre 23° a 17,5° S e 40,5° a 35° W (Figura 26). Nesta região existem 14 pontos de grade onde são avaliadas as ocorrências das ondas (Figura 27).

Figura 27 – Área de estudo do clima de ondas no ES, batimetria, localização dos 14 pontos nos quais são avaliados os dados de onda do ECMWF e localização do ponto de medição pelo ondógrafo



Fonte: Piumbini (2009).

Os dados de onda usados na comparação referem-se às medições *in situ* obtidas por um ondógrafo direcional pelo INPH (Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias) ao largo do Porto de Praia Mole, próximo a Baía do Espírito Santo, no ponto de coordenadas geográficas $20^{\circ}17'18''\text{S}$ e $40^{\circ}12'54''\text{W}$, numa lâmina d'água aproximadamente de 21m DHN. Foram disponibilizados somente dados de altura significativa e direção da onda para o período de medições entre 28/05/2001 e 11/12/2001 (ACCETA et al., 2003).

Na verificação, somente o parâmetro direção foi avaliado por Piumbini (2009), uma vez que, segundo o autor, independente de se tratar de um ponto próximo à costa ou afastado dessa, a semelhança no padrão geral direcional das ondas deve ser observado.

Dessa forma, em Piumbini (2009), os dados de direção de onda do INPH entre 28/05/2001 e 11/12/2001 são comparados com os dados de direção de onda do ECMWF para um período de abrangência temporal entre 01/06/2001 a 30/11/2001 e, em meses próximos e para todos os anos de abrangência dos dados do ECMWF

(01/06/1957 à 30/11/2002). Nota-se, então, que o padrão direcional das ondas obtidas a partir da base de dados de reanálise do ECMWF apresenta uma configuração qualitativa similar àquela obtida pelo INPH a partir de medições com ondógrafo, validando assim o método de análise proposto por Piumbini (2009).

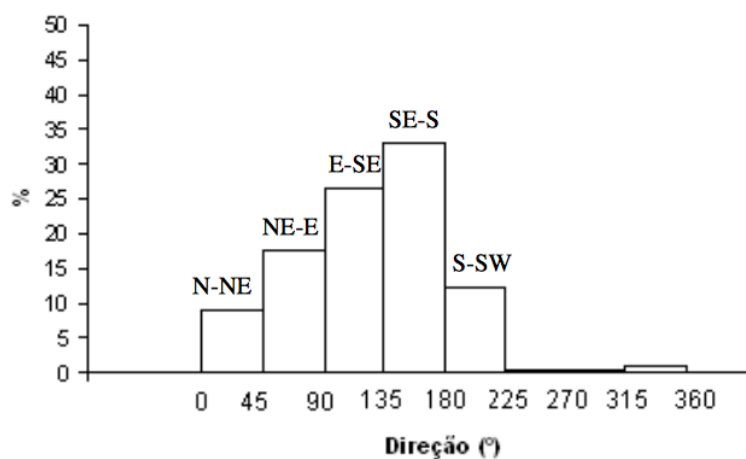
4.4 CLIMA DE ONDAS PARA A REGIÃO OCEÂNICA DO ESPÍRITO SANTO

Através do estudo de Piumbini (2009), uma classificação geral do clima de ondas no Oceano Atlântico adjacente ao ES é realizada tomando como referência dados de onda da reanálise do ECMWF com periodicidade de 6h em 6h, entre setembro de 1957 a agosto de 2002, contabilizando um total de 964260 ocorrências. Todos os valores percentuais associados às classes de direção (D), período médio (Tm) e altura significativa (Hs) são referenciados a este total.

4.4.1 Direção (D)

O resultado da análise estatística de ocorrência de ondas na região de estudo mostrou que 98,5% das ondas estão entre as direções 0° e 225°. A predominância de ondas nesta faixa de direção é notada no Gráfico 1. A distribuição das ondas neste intervalo de direção denota uma ampla variabilidade direcional dos eventos de ondas que caracterizam o clima de ondas na região oceânica adjacente ao ES.

Gráfico 1 – Histograma de direção média da onda entre os anos de 1957 – 2002 para os dados do ECMWF

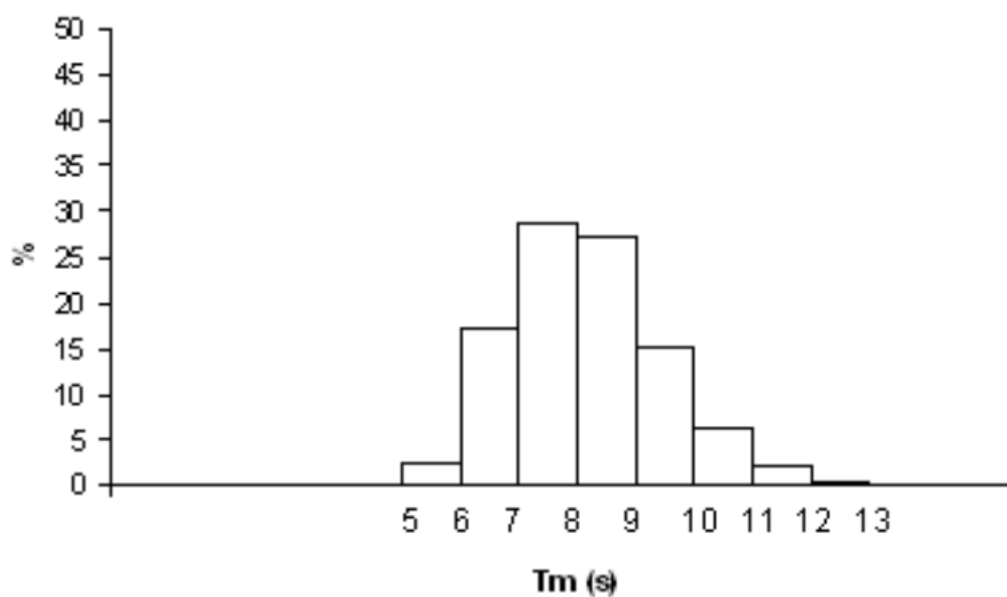


Fonte: Piumbini (2009).

4.4.2 Período Médio (T_m)

A análise estatística do período da onda para a caracterização do clima de ondas na região do ES em padrões típico e extremo de T_m é apresentada no Gráfico 2. Observa-se que de 56% das ondas têm T_m entre 7,0s e 9,0s, sendo que desses, 28,9% estão entre 7,0s e 8,0s.

Gráfico 2 – Histograma de período médio da onda entre os anos de 1957 – 2002 para os dados do ECMWF

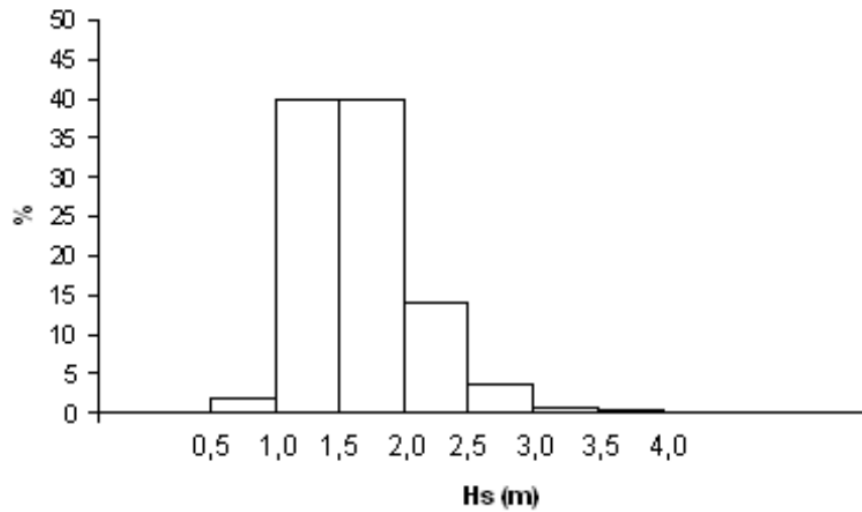


Fonte: Piumbini (2009).

4.4.3 Altura Significativa (H_s)

Os resultados da avaliação do parâmetro H_s para a caracterização do clima de ondas na região do ES em padrões típico e extremo são apresentados no Gráfico 3. Percebe-se que cerca de 80% das ondas estão em um intervalo entre 1,0m e 2,0m de altura.

Gráfico 3 – Histograma de altura significativa da onda entre os anos de 1957 – 2002 para os dados do ECMWF

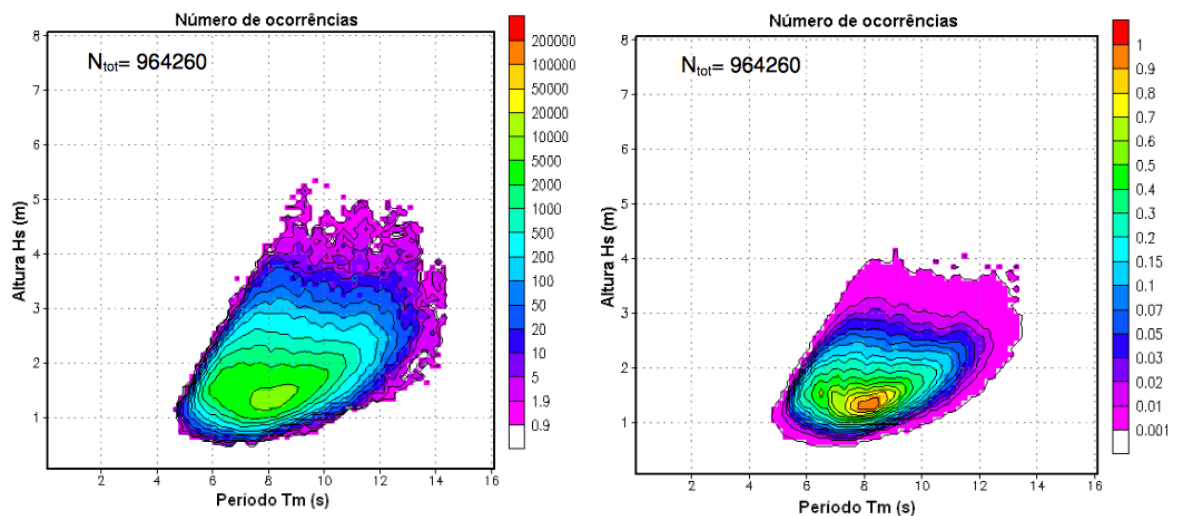


Fonte: Piumbini (2009).

4.4.4 Distribuição Conjunta do período (T_m) e altura (H_s)

No Gráfico 4 é apresentado a distribuição conjunta de ocorrências entre a altura significativa (H_s) em função do período médio (T_m) na forma geral e normalizada, de acordo com o estudo de Piumbini (2009). Com os dados nesta representação, foi possível obter a correlação das alturas significativas (H_s) e dos períodos médios (T_m) com o intuito de avaliar o recurso energético na região oceânica do ES, que será analisado posteriormente.

Gráfico 4 – Distribuição conjunta da H_s como função do T_m na forma geral e normalizada, respectivamente, entre os anos de 1957 – 2002 para os dados do ECMWF



Fonte: Piumbini (2009).

5 METODOLOGIA

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver uma forma simples que permita estimar a quantidade de energia produzida, durante um ano, por um sistema de aproveitamento da energia das ondas na região oceânica do Espírito Santo. Após escolhido o sistema de coluna de água oscilante (CAO) para análise da capacidade de produção energética, por ser um dos sistemas mais estudados em todo o mundo, é necessário determinar e ter em conta alguns parâmetros relacionados com a implementação deste tipo de centrais.

A geometria e os parâmetros da CAO e da turbina utilizados para cálculo neste trabalho são semelhantes aos instalados na central do Pico, na ilha dos Açores em Portugal, que tem uma plataforma quadrada com $12 \times 12 \text{ m}^2$. A pressão atmosférica é $P_{\text{atm}} = 1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$, a densidade do ar é $\rho_{\text{ar}} = 1,225 \text{ kg/m}^3$ e a densidade da água é de $\rho_{\text{agua}} = 1025 \text{ kg/m}^3$. As curvas características da turbina, apresentadas nas Figuras 23(a) e 23(b), foram obtidas a partir de testes de laboratório tal como descrito por Falcão (1999). A turbina modelada por Falcão é semelhante à turbina da ilha do Pico, possuindo seis pás e um diâmetro exterior de 2,3 metros. As pás do rotor têm uma largura de 125 mm e o perfil é NACA0015. Segundo a análise feita por Falcão (1999), a queda de pressão é proporcional à vazão mássica com uma constante de proporcionalidade de 99 Pa.s/kg e o valor de pressão crítico corresponde aproximadamente a $P_{\text{crit}} = 10,5 \text{ kPa}$.

É fundamental, também, ter a caracterização do local onde será instalado a central. Para isso, usam-se os dados característicos do clima de onda da região do Espírito Santo demonstrados no capítulo 4 e, com isso, é possível construir o diagrama de ocorrências do local (Tabela 1), e então pressupor a potência média disponível das ondas, normalmente expressa em kW por metro de frente de onda. O diagrama de ocorrências é uma tabela com a probabilidade de ocorrência dos estados do mar definidos por intervalos de altura significativa e período (WEC, 2004).

Para a avaliação do recurso energético considerou-se o período de energia T_e que, conforme apresentado no capítulo 3, é mostrado na Equação 36:

$$T_e = 1,2 T_m \quad (36)$$

Tabela 1 – Diagrama de ocorrências em % da região oceânica do ES

Hs(m)	Te(s)									
	<4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	>20
4,5-5,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
4,0-4,5	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00
3,5-4,0	0,00	0,00	0,01	0,04	0,02	0,12	0,02	0,01	0,00	0,00
3,0-3,5	0,00	0,00	0,18	0,25	0,13	0,20	0,05	0,01	0,00	0,00
2,5-3,0	0,00	0,00	0,70	0,75	0,77	0,54	0,21	0,02	0,00	0,00
2,0-2,5	0,00	0,23	2,43	2,87	2,98	2,27	0,81	0,07	0,00	0,00
1,5-2,0	0,00	2,60	9,28	10,35	6,64	4,38	1,52	0,12	0,00	0,00
1,0-1,5	0,01	4,38	18,52	9,45	7,09	3,10	0,90	0,09	0,01	0,00
0,5-1,0	0,02	0,76	2,57	0,95	0,98	0,39	0,07	0,02	0,00	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1 AVALIAÇÃO DO RECURSO ENERGÉTICO

Para estimar o valor da potência média do recurso marítimo tendo um diagrama de ocorrências e assumindo que este se refere a um local de águas profundas, poderá usar-se a expressão Equação 30, que é relembra na Equação 37:

$$P_w \approx \frac{\rho_{\text{agua}} g^2}{64\pi} T_e H_s^2 \quad (37)$$

Onde ρ_{agua} é a densidade da água do mar e tem um valor de 1025 kg/m^3 , g é a aceleração da gravidade com um valor de aproximadamente $9,8 \text{ m/s}^2$, T_e é o período de energia da onda e H_s a altura significativa da onda. Através da Equação 37 obtém-se a potência (W/m) das ondas incidentes e em conjunto com o diagrama de ocorrências do local onde queremos instalar a central, é possível calcular o valor médio da potência do recurso marítimo através de:

$$P_{wmed} = \sum (P_w \cdot \text{Prob}_{\text{mar}}) \quad (38)$$

Onde $Prob_{mar}$ representa a probabilidade de ocorrência do estado do mar (definido por T_e e H_S).

Tendo então o diagrama de ocorrências de ondas na região do Espírito Santo, é possível calcular a potência média total disponível por metro de onda no local. Assim sendo, na região de estudo desse trabalho, tem-se a potência média total calculada no valor de 12,65 kW/m, os valores para cada um dos 52 estados de mar encontram-se na Tabela 2. Considerando um total de aproximadamente 400km de costa oceânica no ES (PIUMBINI, 2009), estima-se que a potência total disponível em forma de onda marinha no estado seja de 5,06GW.

Tabela 2 – Potencial energético das ondas do ES para cada estado de mar

Condição	Hs(m)	Te(s)	Prob(%)	Pw(W/m)	Pwmed(W/m)
1	1,25	4	0,01	6120,07	0,70
2	0,75	4	0,02	1101,61	0,27
3	2,25	5	0,23	12393,14	28,75
4	1,75	5	2,60	7497,08	194,87
5	1,25	5	4,38	3825,04	167,49
6	0,75	5	0,76	1377,02	10,52
7	3,75	7	0,01	48195,53	4,76
8	3,25	7	0,18	36200,20	66,07
9	2,75	7	0,70	25918,48	180,15
10	2,25	7	2,43	17350,39	422,36
11	1,75	7	9,28	10495,92	973,87
12	1,25	7	18,52	5355,06	991,84
13	0,75	7	2,57	1927,82	49,64
14	4,25	9	0,01	79591,47	7,87
15	3,75	9	0,04	61965,68	26,39
16	3,25	9	0,25	46543,11	114,33
17	2,75	9	0,75	33323,77	251,39
18	2,25	9	2,87	22307,64	640,24
19	1,75	9	10,35	13494,75	1396,93
20	1,25	9	9,45	6885,08	650,36
21	0,75	9	0,95	2478,63	23,64
22	3,75	11	0,02	75735,83	12,10
23	3,25	11	0,13	56886,02	75,27
24	2,75	11	0,77	40729,05	315,31
25	2,25	11	2,98	27264,90	813,62
26	1,75	11	6,64	16493,58	1095,38
27	1,25	11	7,09	8415,09	596,75
28	0,75	11	0,98	3029,43	29,83
29	4,75	13	0,01	143607,37	8,74
30	4,25	13	0,06	114965,46	64,70
31	3,75	13	0,12	89505,98	109,59
32	3,25	13	0,20	67228,94	132,93
33	2,75	13	0,54	48134,33	258,43
34	2,25	13	2,27	32222,15	730,96
35	1,75	13	4,38	19492,41	853,10
36	1,25	13	3,10	9945,11	308,57
37	0,75	13	0,39	3580,24	14,02
38	3,75	15	0,02	103276,13	21,99
39	3,25	15	0,05	77571,85	38,93
40	2,75	15	0,21	55539,61	119,11
41	2,25	15	0,81	37179,41	301,97
42	1,75	15	1,52	22491,25	341,23
43	1,25	15	0,90	11475,13	103,67
44	0,75	15	0,07	4131,05	2,83
45	3,75	17	0,01	117046,28	8,01
46	3,25	17	0,01	87914,76	6,02
47	2,75	17	0,02	62944,89	13,40
48	2,25	17	0,07	42136,66	29,80
49	1,75	17	0,12	25490,08	30,24
50	1,25	17	0,09	13005,14	11,47
51	0,75	17	0,02	4681,85	0,71
52	1,25	19	0,01	14535,16	0,99
PwmedTotal(kW/m):					12,65

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA GERADA POR UMA CENTRAL CAO NO ESPÍRITO SANTO

Com base num diagrama de ocorrências do local que queremos avaliar, é possível estimar a variação de pressão no interior da câmara pneumática através da Equação 31 para cada estado do mar. Por comodidade, é relembrada na Equação 39:

$$\Delta P_t = \frac{8\pi^3 \rho_{agua} v_{onda}^2 H_s^2 r_{canal}}{\lambda^2 A} \quad (39)$$

Sendo ρ_{agua} a densidade da água do mar, v_{onda} a velocidade de propagação da onda, H_s a altura da onda, r_{canal} o raio do duto, λ o comprimento de onda e A a área da secção transversal do duto.

Sabe-se que a velocidade de propagação da onda se dá por:

$$v_{onda} = \frac{\lambda}{T} \quad (40)$$

Substituindo, tem-se:

$$\Delta P_t = \frac{8\pi^3 \rho_{agua} H_s^2 r_{canal}}{T^2 A} \quad (41)$$

Depois de calculada a variação de pressão que passa pela turbina no interior do CAO, faz-se necessário calcular a potência mecânica disponibilizada pela turbina para cada estado de mar. A performance da turbina Wells a ser utilizada no cálculo será similar a turbina da planta de geração de energia de Pico, que pode ser caracterizada por um conjunto de curvas características, conforme demonstrado pelas Figuras 23(a) e 23(b), definidas em função dos coeficientes adimensionais demonstrados no capítulo 3. São eles:

$$\Psi = \frac{\Delta P_t}{\rho_{ar} w_m^2 D^2} \quad (42)$$

$$\Pi = \frac{P'}{\rho_{ar} w_m^3 D^5} \quad (43)$$

Onde D é o diâmetro da turbina e ρ_{ar} a massa específica do ar. Desta forma, calculando a queda de pressão gerada na câmara pneumática para cada estado de mar (Equação 41) e de acordo com a análise da Figura 23(b), sabendo que o valor do coeficiente adimensional de pressão (Ψ) deverá rondar o valor crítico (tratando-se de um sistema otimizado para operar no ponto de potência máxima), ao qual corresponde o ponto de potência máxima, conforme foi explicado no capítulo 3, o valor de Ψ deverá ser:

$$\Psi = \Psi_{crit} \approx 0,065 \quad (44)$$

Desta forma é possível calcular a velocidade de rotação da turbina (rad/seg) através da manipulação algébrica da Equação 42, obtendo-se:

$$w_m = \sqrt{\frac{\Delta P_t}{\Psi_{crit} \rho_{ar} D^2}} \quad (45)$$

Para o coeficiente adimensional de potência (Π), avaliando a curva característica da Figura 23(b), constata-se que o seu valor máximo se obtém quando $\Psi \approx \Psi_{crit}$ e é igual a:

$$\Pi_{max}(\Psi_{crit} \approx 0,065) \approx 0,00214 \quad (46)$$

Sendo $\Pi_{max} \approx 0,00214$ o valor do ponto de potência máxima do sistema. Tendo os valores $\Psi \approx \Psi_{crit}$, $\Pi \approx \Pi_{max}$ e w_m (Equações 44, 46 e 45, respectivamente), e através da manipulação algébrica da Equação 43, é possível calcular a potência mecânica no eixo mecânico do sistema através de:

$$P_m = P' = \Pi \rho_{ar} w_m^3 D^5 \quad (47)$$

O valor da P_m (W) obtido a partir da Equação 47 corresponde a um valor de pico que se verifica quando a pressão atinge a amplitude máxima dada pela Equação 41. Entretanto, a pressão é variável e a sua natureza oscilante reflete-se na potência mecânica da turbina, faz-se necessário, então, calcular o valor médio da P_m . Para o cálculo do valor médio da potência mecânica aplica-se alguns conceitos matemáticos (Anexo A) de onde resulta que o valor médio de uma forma de onda senoidal é determinado multiplicando-se o valor de pico pela constante 0,637 (VELOSO, 2014). Logo, considerando o comportamento da P_m similar ao de uma onda senoidal, o seu valor médio ($P_{m'_{med}}$) será, aproximadamente, dado por:

$$P_{m'_{med}} = P_m \cdot 0,637 \quad (48)$$

Considerando um valor de rendimento do gerador acoplado a turbina, obtém-se, para cada estado de mar:

$$P_g = \eta_g P_{m'_{med}} \quad (49)$$

Onde P_g representa o valor da potência elétrica (W) disponibilizada pelo gerador para um determinado estado do mar, η_g o rendimento assumido para o gerador, que será considerado de 85% (VELOSO, 2014) e $P_{m'_{med}}$ o valor médio da potência mecânica no eixo da turbina para um determinado estado do mar. A fim de se obter a potência elétrica total do gerador disponibilizada pela central, deve-se multiplicar o valor de potência elétrica do gerador, para cada estado do mar, pela respectiva probabilidade de ocorrência do mesmo durante o ano.

$$P_{g'_{total}} = \sum (P_g \cdot Prob_{mar}) \quad (50)$$

Portanto, baseado no modelo da central CAO instalada em Pico, Portugal, e estudado por Veloso (2014), será calculado nesse trabalho o potencial de geração de uma central na região oceânica adjacente ao estado do Espírito Santo. Considerou-se a

massa específica do ar no valor de $\rho_{ar} = 1,225 \text{ kg/m}^3$, o diâmetro da turbina de $D=2,3\text{m}$, a densidade da água do mar um valor de $\rho_{agua} = 1025 \text{ kg/m}^3$, o raio do canal da câmara na região da turbina e a área da secção transversal foram estimados tendo em conta o diâmetro da turbina, sendo respetivamente, $r_{canal}=1,15\text{m}$, $A = 4,154 \text{ m}^2$ e foram considerados para os valores da altura da onda e do período, os valores da altura significativa e do período de energia da região de estudo, conforme diagrama de ocorrências(Tabela 1). Para condições intensas que originem quedas de pressão muito elevadas e que possam colocar em risco o funcionamento do sistema ($\Delta P_t > 10500\text{Pa}$) considera-se a atuação de uma válvula de alívio que reduz a pressão para um valor de aproximadamente 33% do valor correspondente ao caso da válvula permanecer fechada (BRITO-MELO; NEUMANN; SARMENTO, 2008). Foi também assumida uma velocidade de rotação mínima na ordem das 750 rpm (Falcão, 2000). Valores de altura significativa de onda abaixo de 0,5m e acima de 4m, assim como período de energia de onda abaixo de 4,5s e acima de 12,5s foram desconsiderados no cálculo por serem consideradas situações de extremas calmarias e agitações ondulatórias (LISBOA, 2016).

Desta forma, foi obtido um valor médio total de potência de saída no gerador de 52,70kW com todas as 25 condições de estado de mar da região de estudo, conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Potência elétrica disponibilizada pela central CAO para cada estado de mar

Condição	Hs (m)	Te (s)	Prob (%)	ΔP_t (Pa)	W_m (rad/seg)	P_m med (kW)	P_g (kW)	$P_g \cdot Prob$ (kW)
1	2,25	5	0,23	4702,50	183,93	668,80	568,48	1,32
2	1,75	5	2,60	8620,38	143,06	314,67	267,47	6,95
3	1,25	5	4,38	4398,15	102,18	114,68	97,48	4,27
4	0,75	5	0,76	1583,33	78,53	20,43	17,37	0,13
5	3,75	7	0,01	6664,55	218,97	1128,38	959,12	0,09
6	3,25	7	0,18	5005,82	189,77	734,53	624,35	1,14
7	2,75	7	0,70	3584,05	160,57	445,00	378,25	2,63
8	2,25	7	2,43	7270,42	131,38	243,73	207,17	5,04
9	1,75	7	9,28	4398,15	102,18	114,68	97,48	9,04
10	1,25	7	18,52	2243,96	78,53	41,35	35,15	6,51
11	0,75	7	2,57	807,82	78,53	4,38	3,72	0,10
12	3,75	9	0,04	4031,64	170,31	530,91	451,28	0,19
13	3,25	9	0,25	9176,39	147,60	345,60	293,76	0,72
14	2,75	9	0,75	6570,08	124,89	209,38	177,97	1,34
15	2,25	9	2,87	4398,15	102,18	114,68	97,48	2,80
16	1,75	9	10,35	2660,61	79,48	53,96	45,86	4,75
17	1,25	9	9,45	1357,45	78,53	14,84	12,61	1,19
18	0,75	9	0,95	488,68	78,53	0,24	0,21	0,00
19	3,75	11	0,02	8178,38	139,34	290,78	247,17	0,04
20	3,25	11	0,13	6142,87	120,76	189,29	160,90	0,21
21	2,75	11	0,77	4398,15	102,18	114,68	97,48	0,75
22	2,25	11	2,98	2944,22	83,61	62,81	53,39	1,59
23	1,75	11	6,64	1781,07	78,53	26,76	22,74	1,51
24	1,25	11	7,09	908,71	78,53	6,08	5,17	0,37
25	0,75	11	0,98	327,14	78,53	0,00	0,00	0,00
Prob Total:			84,96	Pg Total:				52,70

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao aplicar este método de cálculo às condições apresentadas na Tabela 3, surgiram 8 casos que foram obrigados a fazer algumas adaptações. Estes casos representam situações excepcionais onde, aplicando a fórmula para calcular a velocidade da turbina, obtém-se um valor inferior ao limite mínimo de 750 rpm (ou 78,53 rad/seg). Para isso, tendo em conta o limite mínimo de velocidade, não se pode assumir que o coeficiente adimensional de pressão seja igual ao valor crítico (ou seja Ψ é diferente de $\Psi_{crit} \approx 0,065$), logo, terá de se calcular o Ψ através da Equação 33 com o valor de velocidade mínimo (78,53 rad/seg) e a partir daí, retira-se o valor de $\Pi(\Psi)$ através da curva de performance da turbina Wells (Figura 23(b)). Para essas 8 condições, então, tem-se os valores de Ψ e Π considerados:

Tabela 4 – Valores de Ψ e Π para os estados de mar que se faz necessário recalcular a velocidade de rotação da turbina para a velocidade mínima

Condição	Hs (m)	Te (s)	Ψ	Π
4	0,75	5	0,03962	0,00084
10	1,25	7	0,05615	0,00170
11	0,75	7	0,02021	0,00018
17	1,25	9	0,03397	0,00061
18	0,75	9	0,01223	0,00001
23	1,75	11	0,04457	0,00110
24	1,25	11	0,02274	0,00025
25	0,75	11	0,00819	0,00000

Fonte: Elaborado pelo autor.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este trabalho teve como objetivo a avaliação do recurso energético proveniente de ondas marinhas na região oceânica adjacente ao Espírito Santo e seu aproveitamento para conversão da energia utilizando o método do dispositivo de coluna de água oscilante, similar ao modelo em operação em Açores, na ilha de Pico, Portugal. Para o levantamento dos dados de propagação e geração de ondas espectrais da região de interesse, foi usado o modelo aferido e validado por Piumbini (2009), o qual foi posteriormente comparado por Nogueira (2014), esse reconstituiu 45 anos de agitação ondulatória na região, fazendo ser possível determinar o potencial energético local.

A partir da reconstituição da agitação ondulatória da região, foi estimado um fluxo médio anual de energia na faixa de 12,65 kW/m, conforme Tabela 2. Estes valores, se considerados os 400km aproximados de costa oceânica no Espírito Santo, traduzem um fluxo anual de energia no ES em torno de 5,06GW provenientes das ondas, estando de acordo com estimativa energética apresentada na Figura 2 para a região, levando em consideração que o fluxo energético aumenta em direção ao sentido sul brasileiro.

Para determinar a potência gerada por uma CAO na região oceânica adjacente ao Espírito Santo, foi usado como base o modelo de cálculo apresentado por Veloso (2014), o qual foi validado em comparação à central já instalada em Pico, Portugal. Na análise do desempenho do equipamento de conversão, foi considerado o desempenho da turbina tipo Wells, levando em conta os sistemas de controle de rotação da turbina e da pressão dentro da câmara similares ao demonstrado por Veloso (2014) e utilizados em Pico. As dimensões do modelo de CAO utilizadas para validação do cálculo também foram idênticas ao modelo de central existente em Pico.

Foi calculado, então, um valor médio estimado de 52,70kW de potência anual disponibilizada por uma central CAO na região de interesse e observado, levando em consideração as situações de extrema calmaria e agitação ondulatória, um fator de disponibilidade da central de 84,96% (Tabela 3).

Através do fator de disponibilidade anual da central CAO, é possível estimar seu valor de produção anual de energia, utilizando da fórmula:

$$E_{\text{anual}} = fd \cdot h_{\text{ano}} \cdot P_{g\text{'total}} \quad (51)$$

Onde, E_{anual} é o valor da energia anual produzida (Wh), h_{ano} é o total de horas no ano (8760 horas), fd é o fator de disponibilidade da central e $P_{g\text{'total}}$ é a potencia elétrica total anual disponibilizada pela central. Com isso, obtém-se um valor total de energia produzida pela central de 391,84MWh/ano.

Foi notado que para cada central de 12m de largura – que foi o modelo do dispositivo CAO utilizado no cálculo deste trabalho – é produzido 52,70 kW de potência anual. O potencial do recurso energético das ondas na região oceânica do ES anual foi calculado em 12,65kW por metro de largura de onda, o que para 12m representa um potencial de 151,80kW. Pode-se concluir, com isso, que o rendimento da central CAO estudada neste trabalho foi aproximadamente 34,72% do total de energia disponível através das ondas e, apesar das diferentes formas de escolhas de sistemas *Power Take-Off* (turbina e gerador) ou de diferentes métodos de avaliação de agitação marítima do local, o valor gira próximo da eficiência padronizada para conversão da energia das ondas em energia elétrica através de uma central CAO fixa, segundo Dudhgaonkar et al. (2011). Um fator relevante que pode causar alterações na resposta prática do modelo CAO analisado, faz referência para a abordagem simplificada da dinâmica da pressão interna na câmara de ar, que por via da simplicidade poderá não representar de forma rigorosa os valores de pressão reais em função das características das ondas incidentes nesse componente.

7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

No sentido de atender a crescente demanda por energia a médio e longo prazo, a energia gerada pelas ondas do mar constitui-se numa alternativa bastante interessante, diversificando a matriz energética e auxiliando no cumprimento do plano estratégico da região de interesse, promovendo um desenvolvimento sustentável com reduzido impacto ambiental.

No desenvolvimento deste trabalho foi possível perceber o potencial da energia das ondas bem como as dificuldades na sua exploração. Estas dificuldades estão fortemente ligadas à natureza agressiva do meio marítimo e a sistemas de exploração ainda em fase de desenvolvimento, dado que, apesar das diversas tecnologias existentes, continua incerto qual será a dominante.

Dos vários sistemas analisados, este trabalho deu ênfase ao sistema coluna de água oscilante (CAO), que é de longe o mais estudado e analisado para o aproveitamento deste tipo de energia. Foi feita uma abordagem simplificada na qual resultou no cálculo para estimar a energia elétrica produzida anualmente por uma central CAO em águas profundas no oceano adjacente ao estado do Espírito Santo, onde existe uma grande concentração de plataformas para exploração de petróleo e gás instaladas, o que faz desse estudo, também, uma base para a análise de viabilidade de implantação do sistema de conversão energética a partir das ondas nesses locais.

Foram também analisadas as componentes principais de uma central CAO (câmara pneumática, turbina Wells e gerador) e em trabalhos futuros, com o objetivo de aumentar a eficiência da coluna de água oscilante, sugere-se um estudo das dimensões da câmara ideal, levando em conta a agitação marítima do local de instalação, bem como o estudo do diâmetro ótimo da turbina Wells. Para isso, poderiam ser aprofundados os estudos de agitação marítima na região oceânica do Espírito Santo, em que poderiam ser encontradas localizações pontuais com maiores potenciais energéticos para a instalação de um sítio de conversão de energia das ondas em energia elétrica.

Por fim, faz-se necessário avaliar não só através de simulações computacionais, mas também experimentalmente, a referida tecnologia de conversão energética, apontando os investimentos requeridos para implantação, a fim de resultar uma análise técnica, econômica e ambiental robusta para se obter o custo-benefício da instalação e utilização do sistema.

REFERÊNCIAS

ACCETA, D., FREIRE, P. C. S., VARGAS, B. M. **Relatório final da modelagem matemática da propagação das ondas junto à tomada d'água da Companhia Siderúrgica de Tubarão – CST**, Vitória, Espírito Santo. Companhia Docas do Rio de Janeiro (CDRJ), Instituto de Pesquisas Hidroviárias – INPH. p. 1 – 44. 2003.

AMUNDARAIN, M., ALBERDI, M., GARRIDO, A. J., GARRIDO, I. Modeling and Simulation of Wave Energy Generation Plants: Output Power Control. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 58, n. 1, jan. 2011.

ASSIS, L. E. **Avaliação e aproveitamento da energia de ondas oceânicas no litoral do Rio Grande do Sul**. 2010. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

BAKAR, B. A., MUSIRIN, I., OTHMAN, M. M., RAHIM, M.N.A. Mathematical Model of Sea Wave Energy in Electricity Generation. **5th International PEOCO**. Selangor (Malásia), 2011.

BENOIT, M., MARCOS, F., BECQ, F. Development of a thirdgeneration shallow- water wave model with unstructured spatial meshing. In: **Proceedings of 25th International Conference on Coastal Engineering**, pp. 465–478, Am. Soc. of Civ. Eng., New York, 1996.

BOAKE, C. B., WHITTAKER, T. J. T., FOLLEY, M., **Overview and initial operational experience of the LIMPET wave energy plant**. The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2002.

BOOIJ, N.; RIS, R. C.; HOLTHUIJSEN, L. H. A third-generation wave model for coastal regions, Part I: Model description and validation, **J.Geoph.Research**, v. 104, n. C4, p. 7649-7666. 1999.

CENTRE FOR RENEWABLE ENERGY (CRES), **Wave Energy Utilization in Europe – Current Status and Perspectives**, European Thematic Network on Wave Energy, 2002.

CORNETT, A., **Inventory of Canada's Marine Renewable Energy Resources**. Canadian Hydraulics Centre, Ottawa-Canada, 2006.

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

DHANASEKARAN, T.S., GOVARDHAN, M. Computational analysis of performance and flow investigation on wells turbine for wave energy conversion. **Renewable Energy**, v. 30, p. 2129-2147, 2005.

DICIO [Dicionário Online de Português]. **Energia**. Disponível em: <https://www.dicio.com.br/energia/>. Acesso em: 28 jul. 2017.

DUDHGAONKAR, P., KEDARNATH, S., PATTANAIK, B., JALIHAI, P., JAYASHANKAR, V. **Performance analysis of a floating power plant with a unidirectional turbine based power module**. National Institute of Ocean Technology, Chennai (India), 2011.

ESTEFEN, S. **Geração de Energia Elétrica pelas Ondas do Mar**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2006. Disponível em: < <http://www.coppe.ufrj.br/pt-br/geracao-de-energia-eletrica-pelas-ondas-do-mar-0>. Acesso em: 24 jul. 2017.

FALCÃO, A. F. O. **Energia das ondas**. In: SEMINÁRIO SOBRE FÍSICA E ENERGIA, 2005. Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2005.

FALCÃO, A. F. O. Wave Energy Utilization: A Review of the Technologies. In: **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 899 – 918, 2010.

FALCÃO, A. F. O., JUSTINO, P. A. P. OWC wave energy devices with air flow control. **Ocean Engineering**, v. 96, p. 1275-1295, dez, 1999.

FALCÃO, A. F. O., PONTES, M. T., 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.

FLEMING, F.P. **AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE ENERGIAS OCEÂNICAS NO BRASIL**. 2012. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

FURTADO, A.L.M.X, BUCCI, A.P., BARBARIOLI, A.B., FÉLIX, C., PRELLVITZ, L.J, CLARO, M.S., TORRES, O.J.F, CORTEZ, P.M, GIORDANO, P.B., NOGUEIRA, S. **Noções de oceanografia e meteorologia**. Rio de Janeiro: PETROBRAS – PUC/RJ, 2013, 287p.

GARCIA, F. H. **Análise Experimental e Simulação de Sistemas Híbridos Eólico-fotovoltaico**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

GODA, Y. Randon Seas and Design of Maritime Structures, **World Scientific Publishing, Advanced Series on Ocean Engineering**, v.15, 2010.

GONÇALVES, A. M. **Utilização de Dados de Altimetro na Avaliação do Recurso Energético das ondas do mar**. Relatório de Estágio Profissionalizante. Lisboa, 2003.

GUARRISON, T. **Oceanography: An Invitation to Marine Science**, Cengage Learning, 2009.

GUNN, K., STOCK-WILLIAMS, C. Quantifying the Global Wave Power Resource. **Renewable Energy**, v. 44, p. 296 – 304, 2012.

HOLTHUJSEN, L. H. Waves in Oceanic and Coastal Waters. **First Edition: Cambridge University Press**, p. 387, 2007.

JANSSEN, P. ., YMOND, B. J. **Part VII: ECMWF W A VE-MODEL DOCUMENTATION (CY23R4)**. p. 1-46, 2003.

JARDIM, A. S. **Utilização de máquina de indução duplamente alimentada sem escovas (BDFM) como gerador eólico**. 2014. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

KÅLLBERG, P., SIMMONS, A., UPPALAHSAJSH, S., FUENTES, M. ERA-40 Project Report Series. **European Centre for Medium Range Weather Forecasts**, Shinfield Park, Reading, RG2 9AX, England. n. 17, p. 1-32, 2007.

LISBOA, R. C. **Avaliação numérica da potência das ondas absorvida por um dispositivo de coluna de água oscilante instalado na costa sul do Brasil**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2016.

MAGAGNA, D., **Oscillating Water Column Wave Pump: A Wave energy converter for Water Delivery**. 2011 (Doctor of Philosophy Dissertation) – University of Southampton, Southampton, 2011.

MELO, F. E., HAMMES, G. R., FRANCO, D., ROMEU, M. A. R. Avaliação de desempenho do modelo WW3 em Santa Catarina. **III Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica**, 2008.

MOOMAW, W., F. YAMBA, M. KAMIMOTO, L. MAURICE, J. NYBOER, K. URAMA, T. WEIR. **Introduction. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation** [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C.von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2011. 48p.

MØRK, G., BARSTOW, S., KABUTH., A, PONTES, M. T. Assessing the Global Wave Energy Potential. **Proceedings of OMAE 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore Mechanics and Arctic Engineering**. p. 447– 454, 2010.

MUETZE, A., VINING, J. G., Ocean wave energy conversion – A survey. **Proceedings of the IEEE IAS'06**, Tampa (USA), vol. 3, pp. 1410-1417, 2006.

NOGUEIRA, I. C. M. **Caracterização do clima de ondas na Bacia do Espírito Santo através de modelagem numérica**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

OEE [Ocean Energy Europe], **A energia do oceano pode fornecer 10% da eletricidade da Europa até 2050**. 2017. Disponível em: <https://www.oceanenergy-europe.eu/en/communication/why-ocean-energy/ocean-energy-can-provide-10-of-europe-s-electricity-by-2050>. Acesso em: 29 jul. 2017

PIUMBINI, P. P. **Clima de Ondas de Gravidade e Estado de Agitação Marítima em Ambientes Marinhos no Espírito Santo**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009.

RAGHUNATHAN, S. The Wells Air Turbine for Wave Energy Conversion. **Prog. Aerospace Sci.**, V. 31, 1995.

SARMENTO, A. **Engineering, analysis and monitoring of full-scale and prototype plants: performance, safety and environmental impacts**. Wave Energy Center (WEC), 2010.

SESMIL, E.L.F. **Energia maremotriz: impactos ambientais e viabilidade econômica no Brasil**. Minas Gerais, 2013. 61p.

SOUZA, R. D. A. E. **Escolha de Tecnologia de Conversão da Energia das Ondas em Energia Elétrica**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) –

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2011.

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

TOLMAN, H. L. **User Manual and System Documentation of WAVEWATCHIII version 3.14**. U. S. Department of Commerce. National Oceanic and Atmospheric Administration. National Weather Service. National Centers for Environmental Prediction. Technical Note. 2009.

TOLMASQUIM, M.T. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro, EPE, 2016. 452p.

TORRES, F. R. **Método numérico simplificado para determinação das curvas de potência mecânica de turbina Wells instalada em dispositivo para a captação da energia das ondas do tipo coluna de água oscilante sob incidência de ondas monocromáticas**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2015.

VECCHIA, L. C. D., FARIAS, C. F., SCHARLAU, C. C. Modelagem e dimensionamento de um sistema de geração de energia a partir das ondas do oceano. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 21, 2016, Vitória. **Anais do XXI Congresso Brasileiro de Automática**. Vitória: 2016, p. 750-755.

VELOSO, R. C. M. **Avaliação Técnica da Energia das Ondas em Portugal**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores), Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2014.

WAMDI GROUP. **The WAM Model - A Third Generation Ocean Wave Prediction Model**, J. Phys. Oceanogr., v. 18, n.12, pp. 1775-1810 , 1988.

WMO, Guide to wave analysis and forecasting. **Secretariat of the World Meteorological Organization**, Geneva (Switzerland), n. 702, 2nd edition, 1998.

YOUNG, I. R. **Wind Generated Ocean Waves**. Elsevier: 1999. 288p.

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

ANEXO A - VALOR MÉDIO DE UMA SENOIDE

O valor médio de uma função senoidal (considerando apenas a metade do ciclo de onda, caso contrário o valor médio seria nulo), é dado matematicamente fazendo a aproximação da área sob a curva em vários intervalos de distância o que pode ser feito usando trapézios. Somando-se todas as áreas dos trapézios o valor médio pode ser encontrado e se for utilizado um número grande de trapézios mais pequenos mais preciso será o resultado final. A área sob a curva pode ser encontrada por vários métodos como o método trapezoidal, o *mid-ordinate rule* (na língua anglo-saxónica) ou a regra de Simpson. Utilizando uma simples integração, a área sob curva da função sinusoidal (parte positiva), que é definida como $V_{(t)} = V_p \cdot \sin(\omega t)$ com um período T , é dada por:

$$\text{Área} = \int_0^{\pi} V_p \sin(\omega t) d\theta \quad (52)$$

Onde 0 e π são os limites da integração, dado que se quer apenas calcular o valor médio durante metade de um ciclo de onda. Ao resolver a integral, obtém-se:

$$\text{Área} = 2 V_p \quad (53)$$

Sabendo a área sob a curva, é possível determinar o valor médio da zona positiva (ou negativa) de uma onda senoidal obtendo-se a expressão 54, onde $T = \pi$:

$$V_m = \frac{2 V_p}{T} = V_p \cdot 0,637 \quad (54)$$