



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

RAFAEL LUZ ESPINDOLA

**MAPEAMENTO DE SITES COM POTENCIAL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA
ONDOMOTRIZ POR MEIO DE ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO**

**RECIFE
2017**

RAFAEL LUZ ESPINDOLA

**MAPEAMENTO DE SITES COM POTENCIAL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA
ONDOMOTRIZ POR MEIO DE ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como requisito para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Energia.

Orientador: Prof. Dr. Alex Maurício Araújo

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Dóris Regina Aires Veleda

**RECIFE
2017**

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

E77m Espindola, Rafael Luz.
Mapeamento de sites com potencial para geração de energia ondomotriz por meio de análise de decisão multicritério / Rafael Luz Espindola. - 2017. 239 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Alex Maurício Araújo.
Coorientadora: Profa. Dra. Dóris Regina Aires Veleda.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2017.
Inclui Referências, Apêndices e Anexos.

1. Engenharia Mecânica. 2. AHP. 3. TOPSIS. 4. ERA-INTERIM. 5. Reanálise. 6. WEC. I. Araújo, Alex Maurício. (Orientador). II. Veleda, Dóris Regina Aires. (Coorientadora). III. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2017-381

08 de novembro de 2017.

“MAPEAMENTO DE SITES COM POTENCIAL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA
ONDOMOTRIZ POR MEIO DE ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO”

RAFAEL LUZ ESPINDOLA

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

Prof. Dr. ALEX MAURÍCIO ARAÚJO
ORIENTADOR/PRESIDENTE

Prof^a Dr^a DÓRIS REGINA AIRES VELEDA
COORIENTADORA

Prof. Dr. CEZAR HENRIQUE GONZALEZ
COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. ALEX MAURÍCIO ARAÚJO (UFPE)

Prof^a Dr^a DÓRIS REGINA AIRES VELEDA (UFPE)

Prof. Dr. JOSÉ MARIA ANDRADE BARBOSA (UFPE)

Prof. Dr. CESAR AUGUSTO SALHUA MORENO (UFPE)

Prof. Dr. SÍLVIO EDUARDO GOMES DE MELO (UFPE)

Prof. Dr. MARCUS ANDRÉ SILVA (UFPE)

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM-UFPE) pela oportunidade.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão das bolsas de doutorado.

Ao Dr. Alex Maurício Araújo pela orientação desde a graduação, pela disposição em ajudar ao desenvolvimento do trabalho e pelas oportunidades oferecidas.

Aos membros da banca que tanto contribuíram para a melhoria deste trabalho enxergando onde eu não conseguia mais enxergar.

Ao Dr. Jean Bidlot do ECMWF pela ajuda no processamento dos dados do espectro de onda do ERA-Interim.

Aos amigos do Laboratório de Mecânica dos Fluidos Ambiental da UFPE (LABMEC-FLU) pelo apoio e pelas opiniões que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) pelo apoio, e conselhos de quem já passou por essa etapa da vida acadêmica.

À minha família pelo apoio, suporte, carinho e amor para que eu chegasse ao fim com sucesso.

E por último, mas não menos importante, à Anna Ingrid Soares de Sousa Espindola, que leu por cima do meu ombro e aguentou os períodos de ausência e de falta de humor, sempre oferecendo seu carinho e apoio.

***“Se, a princípio, a ideia não é absurda,
então não há esperança para ela.”***

Albert Einstein

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise dos locais mais indicados para aproveitamento do recurso ondomotriz. Para isso, utilizou-se um banco de dados de reanálise de 35 anos do projeto ERA-Interim. Foram realizadas análises estatísticas anuais e sazonais de altura e período energético significativos e avaliada a variabilidade direcional das ondas incidentes. O recurso de energia das ondas foi caracterizado em termos dos parâmetros estatísticos de média, máxima, percentil 95 e desvio padrão, e em termos dos coeficientes de variabilidade temporal *COV*, *SV* e *MV*. A partir dessas análises, estimou-se em 89,97 GW o potencial anual total de onda disponível sobre o offshore brasileiro, com a maior potência de onda média de 20,63 kW/m na parte mais meridional da área de estudo. Adicionalmente, foram realizadas análises comparativas do desempenhos dos dispositivos de conversão de ondas (WEC) na região, resultando num fator de capacidade de 21,85% para o dispositivo Pelamis no local mais energético. Analisou-se também qual o impacto da redução de escala dos WEC no fator de capacidade, o que indicou que pode-se chegar a mais de 80% com o Wave Dragon. E por fim, aplicou-se a análise multicritério baseada nos métodos AHP e TOPSIS para estimar os locais mais adequados, concluindo que a Região Sul, a Região Sudeste, e a parte norte da Região Leste são as mais propícias para a produção de energia ondomotriz independente do cenário analisado.

Palavras-chave: AHP. TOPSIS. ERA-INTERIM. Reanálise. WEC.

ABSTRACT

This work presents an analysis of the most suitable sites for harvesting wave power. To do so it was used a 35 years reanalysis database from the ERA-Interim project. Annual and seasonal statistical analyzes of significant height and energy period were performed, and the directional variability of the incident waves were evaluated. The wave power resource was characterized in terms of the statistical parameters of mean, maximum, 95th percentile and standard deviation, and in terms of the temporal variability coefficients *COV*, *SV* e *MV*. From these analyzes, the total annual wave power resource available over the Brazilian offshore was estimated in 89.97 GW, with largest mean wave power of 20.63 kW/m in the southernmost part of the study area. Additionally, comparative analyzes of wave energy converters (WEC) performance was carried, resulting in a capacity factor of 21.85% for Pelamis device at the most energetic site. It was also analyzed the impact of the WEC's scale reduction in the capacity factor, which indicated that it can reach more than 80% with Wave Dragon. Finally, a multi-criteria analysis based on the AHP and TOPSIS methods was applied to estimate the most suitable locations, concluding that the South Region, the Southeast Region, and the northern part of the East Region are the more indicated, independently of the scenario.

Keywords: AHP. TOPSIS. ERA-INTERIM. Reanalysis. WEC.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Pressão normal induzida pelo vento ao longo da superfície oceânica.....	25
Figura 2 - Crescimento da onda pela variação da pressão induzida pelo vento	25
Figura 3 - Formação de um campo de ondas.....	26
Figura 4 - Esquema de uma onda progressiva.....	27
Figura 5 - Movimento orbital das partículas da onda.....	29
Figura 6 - Geração do espectro a partir da série temporal.....	32
Figura 7 - Distribuição mundial da potência média anual das ondas	37
Figura 8 - Etapas de desenvolvimento da tecnologia ondomotriz.....	48
Figura 9 - Regiões do mar em relação a profundidade.....	50
Figura 10 - Exemplo de classificação dos dispositivos de conversão ondomotriz.....	52
Figura 11 - WEC atenuador, ponto absorvedor e exterminador.....	52
Figura 12 - Tipos de WEC.....	53
Figura 13 - Pelamis P750	54
Figura 14 – AquaBuoy	55
Figura 15 - CETO.....	56
Figura 16 - Oyster 800, Órcades, Escócia	57
Figura 17 - Islay LIMPET, Reino Unido.....	58
Figura 18 - Wave Dragon	59
Figura 19 - Archimedes Waveswing	60
Figura 20 - Métodos de conversão elétrica.....	61
Figura 21 - Representação hierárquica básica	70
Figura 22 - Etapas processuais da metodologia TOPSIS	76
Figura 23 - Batimetria da costa brasileira com a localização dos 49 pontos analisados	84
Figura 24 - Fluxograma da validação dos dados do ERA-Interim	91
Figura 25 - Organização dos dados do Jason-2/OSTM.....	92
Figura 26 - Organização dos dados do ERA-Interim	93
Figura 27 - Escalonamento da matriz de potência do WEC.....	102
Figura 28 - Mapeamento dos dados de H_s do ERA-Interim.....	111
Figura 29 - Mapeamento dos dados de T_e do ERA-Interim	112
Figura 30 - Mapeamento dos dados de P do ERA-Interim	113
Figura 32 - Regiões com maiores coeficientes de proximidade relativa à solução ideal	176

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Exemplo de série temporal de medição da superfície oceânica.....	31
Gráfico 2 - Espectro de densidade de variância da onda típico.....	32
Gráfico 3 - Regiões avaliadas com publicação na <i>Renewable Energy</i> de 1993 a 2016	38
Gráfico 4 - Publicações sobre energia das ondas na <i>Renewable Energy</i>	44
Gráfico 5 - Distribuição das pesquisas por tipo de tecnologia ondomotriz.....	45
Gráfico 6 - Distribuição das companhias de energia ondomotriz ao redor do mundo	46
Gráfico 7 - Distribuição dos WEC em relação ao local de instalação.....	46
Gráfico 8 - <i>LCOE</i> para fontes de energia alternativas e convencionais	47
Gráfico 9 - Espectros de onda unidimensional - Janeiro	114
Gráfico 10 - Espectros de onda unidimensional - Julho.....	115
Gráfico 11 - Espectros de onda bidimensional para a região Norte	117
Gráfico 12 - Espectros de onda bidimensional para a região Nordeste.....	118
Gráfico 13 - Espectros de onda bidimensional para a região Leste.....	119
Gráfico 14 - Espectros de onda bidimensional para a região Leste-Sudeste.....	120
Gráfico 15 - Espectros de onda bidimensional para a região Sudeste.....	121
Gráfico 16 - Espectros de onda bidimensional para a região Sul	122
Gráfico 17 - Média anual de H_s e frequência de ocorrência de H_s acima de 2 m.....	124
Gráfico 18 - Média anual de T_e	125
Gráfico 19 - Parâmetros estatísticos anuais de H_s	126
Gráfico 20 - Média sazonal de H_s por região da margem continental.....	128
Gráfico 21 - Distribuição direcional anual de H_s	131
Gráfico 22 - Distribuição direcional sazonal de H_s para a Região Norte (P7)	132
Gráfico 23 - Distribuição direcional sazonal de H_s para a Região Nordeste (P14).....	133
Gráfico 24 - Distribuição direcional sazonal de H_s para a Região Leste (P19).....	134
Gráfico 25 - Distribuição direcional sazonal de H_s para a Região Leste-Sudeste (P32).....	135
Gráfico 26 - Distribuição direcional sazonal de H_s para a Região Sudeste (P38).....	136
Gráfico 27 - Distribuição direcional sazonal de H_s para a Região Sul (P48).....	137
Gráfico 28 - Distribuição de ocorrência bivariável de H_s x T_e	139
Gráfico 29 - Média anual da potência ondomotriz	141
Gráfico 30 - Parâmetros estatísticos anuais da potência ondomotriz	143
Gráfico 31 - Média sazonal do recurso ondomotriz	144

Gráfico 32 - Valores médios mensais do recurso ondomotriz.....	146
Gráfico 33 - Coeficientes de Variabilidade Temporal.....	149
Gráfico 34 - Produção elétrica anual dos dispositivos ondomotriz.....	152
Gráfico 35 - Fator de Capacidade dos três WEC selecionados	155
Gráfico 36 - Variação do fator de capacidade em função da direção.....	157
Gráfico 37 - C_f dos pontos selecionados para WEC com escalas reduzidas	159
Gráfico 38 - Coeficiente de proximidade para os cenários analisado	166

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Níveis de prontidão tecnológica	48
Tabela 2 - Sistemas de conversão e geração.....	61
Tabela 3 - Impacto ambiental dos dispositivos de conversão ondomotriz	64
Tabela 4 - Métodos de MCDA e sua aplicabilidade aos tipos de decisão.....	67
Tabela 5 - Entradas para métodos de MCDA em problemas de escolha e ordenamento.....	69
Tabela 6 - Entradas para métodos de MCDA em problemas de classificação	69
Tabela 7 - Escala numérica de Saaty	72
Tabela 8 - Índices randômicos (<i>IR</i>) calculados por Saaty	75
Tabela 9 - Literatura selecionada sobre métodos MCDA aplicada às energias renováveis	80
Tabela 10 - Critérios de seleção para planejamento energético sustentável.....	81
Tabela 11 - Compartimentação da margem continental brasileira	85
Tabela 12 - Matriz de prioridades com pesos diferentes	104
Tabela 13 - Matriz de prioridades com pesos iguais	105
Tabela 14 - Cenários analisados pela técnica TOPSIS.....	106
Tabela 15 - Valor de PIS e NIS para cada critério	106
Tabela 16 - Características médias anuais da onda para oito locais da área de estudo	108
Tabela 17 - Análise estatística anual entre a reanálise ERA-Interim e o altímetro Jason-2... 108	
Tabela 18 - Características dos WEC selecionados.....	151
Tabela 19 - Comparação entre os C_f do Brasil e o de outros locais do mundo	155
Tabela 20 - Análise de desempenho dos WEC após redução de escala	162
Tabela 21 - Wave Dragon com escala reduzida e os outros WEC sem redução.....	162
Tabela 22 - Matriz de prioridades com pesos diferentes	164
Tabela 23 - Matriz de prioridades com pesos iguais	164

LISTA DE SIGLAS

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
AHPSort	<i>AHP-Based Method for Sorting Problems</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	<i>Analytic Network Process</i>
ASAS	Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul
AVISO ⁺	<i>Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data</i>
AWS	<i>Archimedes Waveswing</i>
CDO	<i>Climate Data Operators</i>
CNES	<i>Centre National d'Études Spatiales</i>
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
DEA	<i>Data Envelopment Analysis</i>
DFIG	<i>Doubly-Fed Induction Generator</i>
DJF	Dezembro-Janeiro-Fevereiro
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
ELECTRE	<i>Elimination et Choix Traduisant la Réalité</i>
Eletrobrás	Centrais Elétricas Brasileiras S.A.
ENVISAT	<i>Environmental Satellite</i>
EONDAS-RS	Estudos de Tecnologias para a Conversão de Energia das Ondas em Energia Elétrica na Costa do Rio Grande do Sul
ERS	<i>European Remote Sensing</i>
EUMETSAT	<i>European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites</i>
FURG	Universidade Federal do Rio Grande
GEBCO	<i>General Bathymetric Chart of the Oceans</i>
GFO	<i>Geosat Follow-On</i>
GFS	<i>Global Forecast System</i>
GRIB	<i>Gridded Binary</i>
IC	Índice de consistência
IR	Índice randômico
JJA	Junho-Julho-Agosto
JONSWAP	<i>Joint North Sea Wave Project</i>
LCOE	<i>Levelised Cost of Energy</i>

LPMG	<i>Linear Permanent Magnet Generator</i>
MACBETH	<i>Measuring Attractiveness by a categorical Based Evaluation Technique</i>
MAM	Março-Abril-Maio
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
MAUT	<i>Multi-Attribute Utility Theory</i>
MCDA	<i>Multi-Criteria Decision Analysis</i>
MIKE21 SW	MIKE 21 <i>Spectral Wave Model FM</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NetCDF	<i>Network Common Data Form</i>
NIS	<i>Negative Ideal Solution</i>
NOAA	<i>National Oceanic & Atmospheric Administration</i>
NPT	Nível de Protidão Tecnológica
NWW3	NOAA <i>Wave Watch III</i>
O&M	Operação e Manutenção
OSTM	<i>Ocean Surface Topography Mission</i>
Petrobras	Petróleo Brasileiro S.A.
PIS	<i>Positive Ideal Solution</i>
PMSG	<i>Permanent Magnet Synchronous Generator</i>
PROMETHEE	<i>Preference Ranking Organization Method for. Enrichment Evaluations</i>
PTO	<i>Power Take-Off</i>
RC	Razão de consistência
SAGA	<i>System for Automated Geoscientific Analyses</i>
SI OCEAN	<i>Strategic Initiative for Ocean Energy</i>
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SON	Setembro-Outubro-Novembro
SWAN	Simulating Waves Nearshore
TMA	Texel-Marsen-Arsloe
TOPSIS	<i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i>
WAM	<i>Wave Modeling</i>
WEC	<i>Wave Energy Converter</i>
WERATLAS	<i>European Wave Energy Atlas</i>
WW3	<i>WaveWatch-III</i>
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
ZEE	Zona Econômica Exclusiva

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Parâmetro adimensional quantitativo
α_i	Fase da frequência f_i
γ	Fator de aprimoramento de pico
Δf	Intervalo de frequência
Δt	Intervalo de tempo
η	Superfície da onda
λ	Fator de escala
λ_{max}	Autovalor máximo da matriz de comparação
ρ	Massa específica
σ	Frequência angular da onda; Desvio padrão da série de dados
σ_{ku}	Coefficiente de backscatter da banda Ku do altímetro Jason-2
σ_{rea}	Desvio padrão dos dados da reanálise
σ_{sat}	Desvio padrão dos dados do satélite
$\frac{1}{2} \overline{a^2}$	Variância de cada componente da onda
A	Eixo horizontal da trajetória elíptica da onda
\mathbf{A}	Matriz de comparação
a	Amplitude da onda
A^-	Solução não-ideal, nadir, negativo ideal
A^+	Solução ideal, zênite
a_i	Amplitude da frequência f_i
a_{ij}	Comparação entre a alternativa i com a j
A_w	Área máxima da seção transversal horizontal do WEC
B	Eixo vertical da trajetória elíptica da onda
$bias$	Viés
C	Celeridade da onda
C_f	Fator de capacidade
C_g	Velocidade de grupo
C_i	Coefficiente de proximidade relativa
COV	Coefficiente de variação
CW	Comprimento de captura
CWR	Razão do comprimento de captura

D	Dimensão característica
d_i^-	Distância do critério relativa a solução não-ideal
d_i^+	Distância do critério relativa a solução ideal
E	Energia total da onda
E_{CIN}	Energia cinética da onda
E_{POT}	Energia potencial da onda
e_{ij}	Erro na comparação entre as alternativas i e j
f	Frequência da onda
f_i	Frequência da i -ésima onda
f_p	Frequência de pico do espectro
Fr	Número de Froude
g	Aceleração gravitacional
H	Altura da onda
H_{m0}, H_s	Altura significativa da onda
$H_{s,era}$	Altura significativa da onda pelo ERA-Interim
$H_{s,jas-c}$	Altura significativa da onda na banda C do altímetro Jason-2
$H_{s,jas-ku}$	Altura significativa da onda na banda Ku do altímetro Jason-2
h	Profundidade oceânica local
i	i -ésima onda
IC	Índice de consistência
IR	Índice randômico
k	Número da onda
KC, kc	Custo de capital
L	Comprimento da onda
L_c	Comprimento característico
L_t	Tempo de vida útil de um WEC
LCOE	Custo de energia normalizado
m_{-1}	Inverso do primeiro momento espectral de onda
m_0	Momento espectral da onda zero
m_n	n -ésimo momento espectral da onda
MV	Índice de variabilidade mensal
MWD	Direção média da onda
NIS	Distância em relação à solução não-ideal
n	Dimensão da matriz de comparação A

$O\&M$	Custo de operação e manutenção
P	Potência ondomotriz; Fluxo energético da onda
\bar{P}	Potência ondomotriz média
\mathbf{p}	Vetor de prioridades
P_{abs}	Potência absorvida da onda
P_{ano}	Potência ondomotriz média anual
P_E	Potência elétrica média produzida pelo dispositivo
PEA	Produção elétrica anual do dispositivo
$P_{E,MAX}$	Potência elétrica máxima produzida por um WEC dentre os locais analisados
$P_{E,MIN}$	Potência elétrica mínima produzida por um WEC dentre os locais analisados
P_{en}	Potência elétrica normalizada
P_i	Prioridade global da alternativa i
p_i	Prioridade da alternativa i
p_{ij}	Prioridade local em relação ao critério j
p_j	Prioridade da alternativa j
P_{M1}	Potência média do mês mais energético
P_{M12}	Potência média do mês menos energético
P_n	Potência nominal do dispositivo
P_{S1}	Potência média da estação mais energética
P_{S4}	Potência média da estação menos energética
PIS	Distância em relação à solução ideal
PWD	Direção de pico da onda
R	Taxa de desconto; Coeficiente de correlação de Pearson
r	Taxa de desconto
RC	Razão de consistência
r_i	Somatório dos elementos da i -ésima linha da matriz de comparação
r_{ij}	Performance do elemento ij da matriz de decisão
$RMSE$	Raiz quadrada do erro médio
S_f	Espectro de densidade de variância da onda
SI	Índice de dispersão
SV	Índice de variabilidade sazonal
T	Período
t	Tempo
TC	Custo de transmissão e distribuição

T_e	Período de energia
$T_{e,era}$	Período de energia da onda pelo ERA-Interim
$T_{e,hwa-c}$	Período de energia da onda na Banda C do altímetro Jason-2 pelo método Hwang
$T_{e,hwa-ku}$	Período de energia da onda na Banda Ku do altímetro Jason-2 pelo método Hwang
$T_{e,qui}$	Período de energia da onda na Banda Ku do altímetro Jason 2 pelo método Quilfen
T_m	Período médio da onda
T_p	Período de pico
U	Velocidade do vento medida a 19,5 m acima do nível do mar
u_j^-	Performance da menor valor para o critério j
u_j^+	Performance da maior valor para o critério j
U_{10}	Velocidade do vento medida a 10 m acima do nível do mar
$U_{pressão}$	Velocidade de propagação do campo de pressão induzido pelo vento
U_{vento}	Velocidade do vento
u_x	Velocidade horizontal do movimento circular da onda
u_z	Velocidade vertical do movimento circular da onda
V	Velocidade da onda
v_{ij}	Valor da performance normalizada
w_j	Peso do critério j
\mathbf{X}	Matriz de decisão
x	Posição em relação ao eixo horizontal
\bar{X}	Valor médio dos dados de reanálise
x'	Posição horizontal da partícula da onda
\bar{Y}	Valor médio dos dados de satélite
z	Posição em relação ao eixo vertical
z'	Posição vertical da partícula da onda

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	OBJETIVO GERAL	23
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
1.3	ESTRUTURA DA TESE	23
2	ONDAS OCEÂNICAS	24
2.1	FORMAÇÃO DA ONDA	24
2.2	TEORIA LINEAR DA ONDA.....	26
2.3	TEORIA IRREGULAR DA ONDA	31
2.4	PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DA ONDA.....	33
2.4.1	Altura Significativa da Onda	34
2.4.2	Período de Energia da Onda	34
2.4.3	Potência da Onda	35
2.5	AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DAS ONDAS	35
2.5.1	Potencial ondomotriz ao Redor do Mundo	36
2.5.2	Potencial do Brasil	39
2.5.3	Metodologias de Avaliação do Potencial das Ondas	40
3	DISPOSITIVOS DE CONVERSÃO DE ONDAS	44
3.1	SETOR DE ENERGIA ONDOMOTRIZ.....	44
3.2	DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA	47
3.3	CLASSIFICAÇÃO DOS WEC.....	49
3.3.1	Classificação quanto à Localização	49
3.3.1.1	Dispositivos Costeiros	50
3.3.1.2	Dispositivos Próximos à Costa	51
3.3.1.3	Dispositivos em Alto-Mar.....	51
3.3.2	Classificação quanto aos Princípios de Conversão	51
3.3.2.1	Atenuador.....	53
3.3.2.1.1	<i>Pelamis</i>	54
3.3.2.2	Absorvedor Pontual	55
3.3.2.2.1	<i>AquaBuoy</i>	55
3.3.2.2.2	<i>CETO</i>	56
3.3.2.3	Oscilante de Translação das Ondas.....	56

3.3.2.3.1	<i>Oyster</i>	57
3.3.2.4	Coluna de água oscilante	57
3.3.2.4.1	<i>LIMPET</i>	58
3.3.2.5	Galgamento	59
3.3.2.5.1	<i>Wave Dragon</i>	59
3.3.2.6	Pressão Submersa.....	60
3.3.2.6.1	<i>AWS</i>	60
3.4	MÉTODOS DE CONVERSÃO ELÉTRICA.....	61
3.5	PARÂMETROS DE DESEMPENHO	62
3.5.1	Comprimento de Captura	62
3.5.2	Razão do Comprimento de Captura	62
3.5.3	Fator de Capacidade.....	63
3.5.4	Potência Elétrica Normalizada	63
3.6	IMPACTOS AMBIENTAIS	63
3.7	ASPECTOS ECONÔMICOS	64
3.7.1	Custo Normalizado de Energia.....	65
4	ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO	66
4.1	MÉTODOS DE MCDA	67
4.1.1	AHP	70
4.1.1.1	Estruturação do Problema	70
4.1.1.2	Cálculo da Prioridade dos Critérios e da Prioridade Local das Alternativas	71
4.1.1.3	Cálculo da Prioridade Global das Alternativas	74
4.1.1.4	Checagem da Consistência.....	74
4.1.1.5	Análise de Sensibilidade	75
4.1.2	TOPSIS	75
4.1.2.1	Construção da Matriz de Decisão Normalizada.....	76
4.1.2.2	Construção da Matriz de Decisão de Pesos Normalizados	77
4.1.2.3	Determinação das Soluções Ideal e Não Ideal	78
4.1.2.4	Cálculo da Distância em Relação às Soluções Ideal e Não Ideal	78
4.1.2.5	Cálculo do Coeficiente de Proximidade Relativa para a Solução Ideal.....	78
4.2	MÉTODOS MCDA APLICADOS ÀS ENERGIAS RENOVÁVEIS	79
5	MATERIAIS E MÉTODOS	83
5.1	ÁREA DE ESTUDO	83
5.1.1	Margem Continental.....	85

5.1.1.1	Região Norte	86
5.1.1.2	Região Nordeste	86
5.1.1.3	Região Leste	86
5.1.1.4	Região Leste-Sudeste	86
5.1.1.5	Região Sudeste	87
5.1.1.6	Região Sul	87
5.1.2	Sistemas Meteorológicos	87
5.2	MATERIAIS	88
5.2.1	Projeto ERA-Interim	89
5.2.2	Satélite Altimétrico Jason-2/OSTM	89
5.2.3	<i>MATLAB</i>[®]	90
5.2.4	<i>Climate Data Operators</i>	90
5.2.5	<i>SAGA</i>	90
5.3	MÉTODOS	91
5.3.1	Metodologia da Validação	91
5.3.1.1	Aquisição de Dados	92
5.3.1.2	Ajuste dos Dados	93
5.3.1.3	Análise Estatística	95
5.3.2	Metodologia da Caracterização da Onda	97
5.3.3	Metodologia das Análises de Desempenho dos WEC	98
5.3.3.1	Metodologia da Análise Global de Desempenho	99
5.3.3.2	Metodologia da Análise da Dependência Direcional	100
5.3.3.3	Metodologia da Análise de Escala	100
5.3.4	Metodologia da Análise Multi-Critério	102
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	107
6.1	VALIDAÇÃO DOS DADOS DE REANÁLISE	107
6.2	ANÁLISE DO CLIMA DE ONDAS	110
6.2.1	Caracterização Anual de H_s e T_e	124
6.2.2	Caracterização Sazonal de H_s	127
6.2.3	Caracterização da Distribuição Direcional de H_s	131
6.3	ANÁLISE DO RECURSO ONDOMOTRIZ	138
6.3.1	Caracterização Anual de P	140
6.3.2	Caracterização Sazonal de P	144
6.3.3	Caracterização Mensal de P	145

6.3.4	Análise da Variabilidade Temporal de <i>P</i>.....	149
6.4	ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS WEC.....	151
6.4.1	Análise Global de Desempenho.....	151
6.4.2	Análise da Dependência Direcional.....	156
6.4.3	Análise de Escala.....	158
6.5	ANÁLISE MULTICRITÉRIO.....	163
6.5.1	Aplicação do Método AHP.....	163
6.5.2	Aplicação do Método TOPSIS.....	165
7	CONCLUSÕES.....	178
	REFERÊNCIAS.....	180
	APÊNDICE A – ARTIGOS SOBRE POTENCIAL ONDOMOTRIZ.....	200
	APÊNDICE B – TUTORIAL DE MAPEAMENTO NO SAGA®.....	204
	APÊNDICE C – MATRIZ DE POTÊNCIA DOS WEC UTILIZADOS.....	210
	APÊNDICE D - ATLAS DO RECURSO ONDOMOTRIZ.....	212
	APÊNDICE E - ATLAS DO DESEMPENHO DOS WEC.....	219
	APÊNDICE F – DADOS UTILIZADOS NAS ANÁLISES.....	229
	ANEXO A – PUBLICAÇÕES.....	233
	ANEXO B – MORFOLOGIA DA MARGEM CONTINENTAL.....	239

1 INTRODUÇÃO

Há algumas décadas o mundo tem buscado encontrar soluções energéticas ambientalmente sustentáveis. Para isso, um grande esforço científico em pesquisas sobre energia eólica, solar, de biomassas, de ondas, e de outras fontes renováveis vem sendo feito. Por estar disponível, praticamente, ao redor de todo o mundo, a energia das ondas¹ vem se mostrando bastante promissora. Além disso, o fato de ser uma fonte regular de energia e de ser mais previsível que outras fontes como a eólica e a solar, contribui para essa boa expectativa na sua utilização (CRUZ, 2008). A energia das ondas ainda possui uma outra vantagem em relação à eólica e à solar, que é possuir uma maior densidade de potência, o que possibilita a extração da mesma quantidade de energia em áreas menores (SILVA, RUSU e GUEDES SOARES, 2013).

Estudo feito por Gonçalves, Feijó e Abdallah (2008) estima o potencial dessa fonte de energia no Brasil em 50 TWh/ano, enquanto que Boud e Thorpe (2003) estima para o mundo um potencial entre 8.000 e 80.000 TWh/ano. Estima-se também que uma vez madura esta tecnologia possa atender cerca de 10% da demanda global de energia (PANICKER, 1976).

De acordo com Cruz e Sarmento (2004), esse tipo de energia é atrativo para ilhas e países com vasta extensão litorânea. O Brasil se encaixa nesse perfil, uma vez que é um país continental que apresenta uma faixa litorânea de mais de 7.000 km, onde se encontra 73% da sua população, e uma Zona Econômica Exclusiva (ZEE) de mais de 3,6 milhões de km², onde apenas áreas pontuais vêm sendo exploradas e, em geral, pela atividade petrolífera.

O Brasil é um grande utilizador de fontes renováveis de energia como a hidroelétrica, fonte predominante na sua matriz energética, e nos últimos anos está investindo cada vez mais em energia eólica. Porém, apesar de todo o seu litoral e da sua ZEE, poucos estudos visando o aproveitamento energético das ondas tem sido feito. Pode-se citar, dentre esses poucos esforços o convênio entre a COPPE/RJ, Eletrobrás e Governo do Estado do Ceará, a fim de desenvolver e instalar a primeira usina de Energia das Ondas das Américas (RICARTE BESERRA *et al.*, 2005).

¹ No Brasil ainda não existe um termo consolidado para a energia das ondas oceânicas, uma vez que o assunto ainda está em estágio inicial no país. A ANEEL, no seu Banco de Informações de Geração designa esse tipo de energia como undi-elétrica, termo que tem origem na palavra latina para onda, “unda”. Em espanhol essa energia é denominada undimotriz, fazendo uso, portanto, do mesmo prefixo latino. Entretanto, optou-se por adotar a nomenclatura ondomotriz por essa ser utilizada e já estar consolidada em Portugal, e por parecer de mais fácil compreensão do seu significado do que undimotriz ou undi-elétrica.

Gonçalves, Feijó e Abdallah (2008) apontam como motivos para o baixo número de estudos na área de geração de energia por meio de ondas oceânicas no Brasil os seguintes fatores:

- Falta de dados do potencial energético do país;
- Dificuldade de atração de investidores;
- Ausência de mecanismos institucionais que incluam projetos de investimentos desse tipo de geração de energia em programas de incentivos ao desenvolvimento de energias alternativas, como acontece, por exemplo, com as energias eólica e solar.

A falta de dados citada por Gonçalves, Feijó e Abdallah (2008), é resultado dos poucos estudos que têm sido realizados com o objetivo de caracterizar o potencial de que o país dispõe nessa área. A grande maioria dos trabalhos existentes não utilizam dados medidos diretamente para estimar o potencial das ondas. Isso acontece porque, de acordo com Ricarte Beserra (2007), o litoral brasileiro, em sua maior parte, ainda se encontra desconhecido à luz de técnicas modernas de medições e caracterização dos seus oceanos, uma vez que são realizadas poucas medições e estas normalmente estão voltadas para atender as atividades petrolíferas. Essa falta de dados pode produzir resultados muito divergentes.

Outro ponto a ser levantando quando se fala de aproveitamento da energia ondomotriz é qual tecnologia utilizar. Ao contrário de outras fontes de energia como, por exemplo, a eólica, as tecnologias desenvolvidas para o aproveitamento das ondas não convergem para uns poucos modelos de solução. Margueritini, Hansen e Frigaard (2012) citam que no ano de 2011, só na Europa, quarenta e nove conceitos diferentes de dispositivos de conversões de energia ondomotriz (WEC) estavam sendo desenvolvidos, cada um com características diferentes e podendo ser instalados tanto na costa quanto em alto mar. Como cada conceito é único, um mesmo local pode ser apropriado para um modelo e não ser para outro. Por isso, há a necessidade de se identificar os modelos mais apropriados para cada local.

Dessa maneira, para geração de energia a partir das ondas é necessário o conhecimento do potencial existente e o WEC que melhor se adeque ao local. Além disso, é necessário identificar os possíveis fatores que tornem inviável a instalação de um parque no local, como, por exemplo: ser área militar, rota de navios, área de proteção ambiental, área tradicional de pesca, entre outros; ou que contribuam para a sua instalação, como por exemplo proximidade com portos e com centrais de distribuição.

1.1 OBJETIVO GERAL

Determinar os locais mais indicados para o melhor aproveitamento do recurso ondomotriz na região offshore do Brasil.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Caracterizar o regime de ondas na ZEE do Brasil;
- ii. Estimar o potencial da energia ondomotriz da ZEE do Brasil;
- iii. Avaliar o desempenho dos WEC selecionados;
- iv. Mapear os melhores *sites* para aproveitamento da energia ondomotriz utilizando análise multi-critério;
- v. Analisar a escala de WEC existentes de forma a otimizá-los para as condições do Brasil.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

O presente trabalho está estruturado em sete Seções, onde as Seções 2, 3 e 4 apresentam uma revisão bibliográfica do estado da arte de tópicos importantes para a total compreensão das Seções seguintes. A Seção 2 apresenta alguns conceitos relacionados com ondas oceânicas e traz uma revisão do estado da arte da avaliação do potencial ondomotriz. A Seção 3 aborda os dispositivos utilizados para a conversão da energia ondomotriz, apresentando um levantamento das tecnologias mais pesquisados, e as principais características de alguns dispositivos selecionados. A Seção 4 traz uma revisão do estado da arte dos métodos de análise multi-critério, com enfoque na sua utilização para tomada de decisões envolvendo fontes renováveis de energia. A Seção 5 apresenta a área de estudo e suas características, além de apresentar os materiais e métodos utilizados. A Seção 6 apresenta os resultados encontrados a partir da aplicação da metodologia e são realizadas algumas discussões. A Seção 7, por fim, traz as conclusões tiradas a partir dos resultados e das discussões.

2 ONDAS OCEÂNICAS

As ondas se manifestam como movimentações ascendentes e descendentes da superfície oceânica em uma determinada localização, e podem variar de pequenas ondulações a ondas gigantescas e altamente destrutivas como os tsunamis. Elas são energia em movimento na interface entre o oceano e a atmosfera (TRUJILLO e THURMAN, 2011).

Elas são responsáveis por transferir grande quantidade de energia de uma tempestade distante através de quilômetros da superfície do oceano (TRUJILLO e THURMAN, 2011). A sua arrebentação na costa dissipa grande quantidade de energia, ocasionando a erosão das praias e a destruição de estruturas artificiais instaladas nas costas. Além disso, a quebra das ondas torna mais fácil a dissolução do oxigênio e do gás carbônico atmosférico no mar, e intensifica a mistura da camada superficial dos oceanos, aspectos de grande importância para a vida marinha. Outro aspecto importante das ondas, é a possibilidade de utilização desta energia potencial como fonte de energia limpa e renovável.

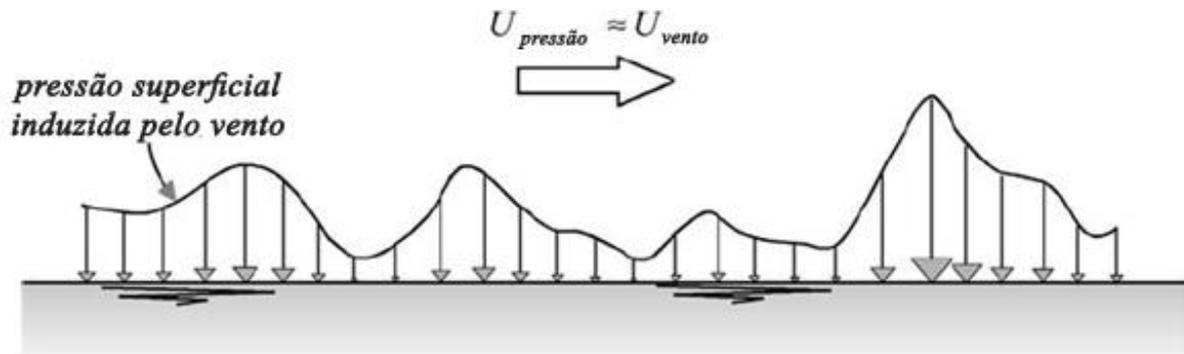
Apesar de possuir várias fontes geradoras, tais como terremotos, deslizamentos e erupções submarinas, e efeitos gravitacionais da Lua e do Sol, a mais comum e influente é o vento.

2.1 FORMAÇÃO DA ONDA

A energia das ondas é convertida a partir da energia solar. A diferença na absorção de luz solar incidente na superfície dos oceanos produz diferenças de temperaturas ao redor do globo, induzindo a formação de ventos que sopram ao longo dos oceanos. Estes ventos por sua vez interagem com a superfície oceânica transferindo parte da sua energia (CRUZ, 2008). Esse mecanismo de transferência de energia do vento para a onda é bastante complexo e não totalmente compreendido ainda (GONÇALVES, FEIJÓ e ABDALLAH, 2008).

De acordo com Holthuijsen (2007, p. 177), um dos mecanismos que explicariam a formação das ondas é o proposto por Phillips (1957), no qual as ondas são geradas pela ressonância entre a pressão normal à superfície, induzida pelo vento, e a superfície oceânica que se propaga livremente. Essa pressão induzida é turbulenta, e se propaga como um campo estático aproximadamente aleatório, como mostra a Figura 1.

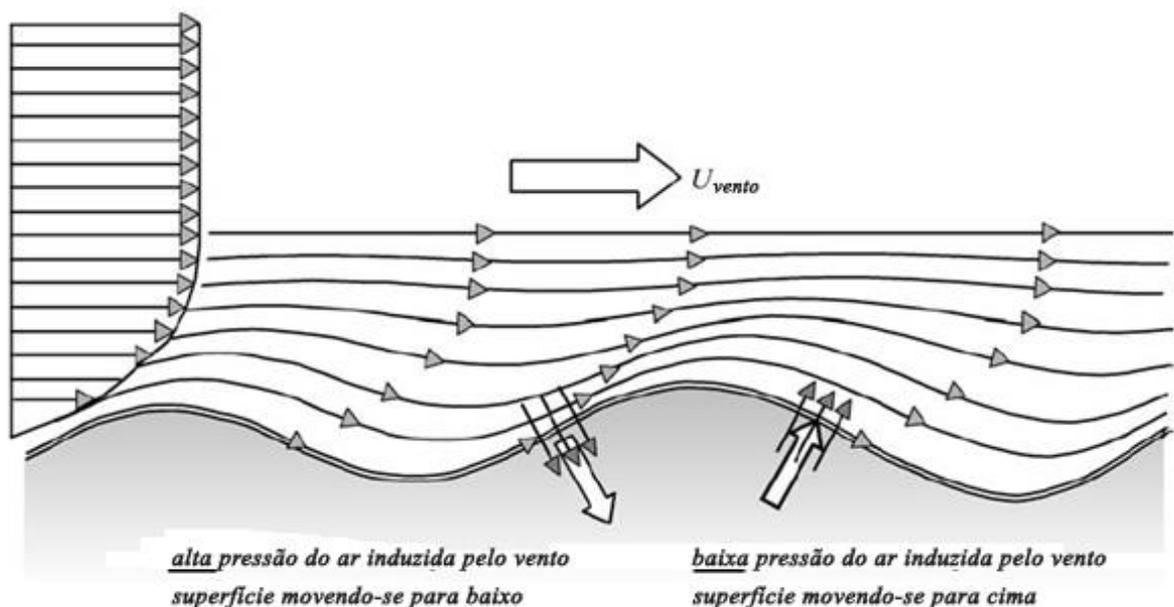
Figura 1 - Pressão normal induzida pelo vento ao longo da superfície oceânica



Fonte: Adaptado de Holthuijsen (2007, p. 179)

Uma vez que as primeiras ondulações na superfície oceânica são formadas, Miles (1957) propõem que elas próprias modificam o fluxo de ar e, conseqüentemente, a pressão induzida pelo vento, de forma a provocarem o próprio crescimento. A pressão induzida se torna máxima no lado da crista da onda que recebe o vento e mínima no lado oposto. Isso implica que o vento efetivamente “empurra” para baixo a superfície da onda que está descendo e “puxa” a superfície que está subindo. É esse acoplamento fora de fase entre a pressão e o movimento da superfície que transfere energia para a onda. Além disso, uma vez que essa transferência depende da amplitude da onda, ela se torna cada vez mais efetiva à medida que a onda se desenvolve (HOLTHUIJSEN, 2007, p. 179). A Figura 2 ilustra esse mecanismo.

Figura 2 - Crescimento da onda pela variação da pressão induzida pelo vento

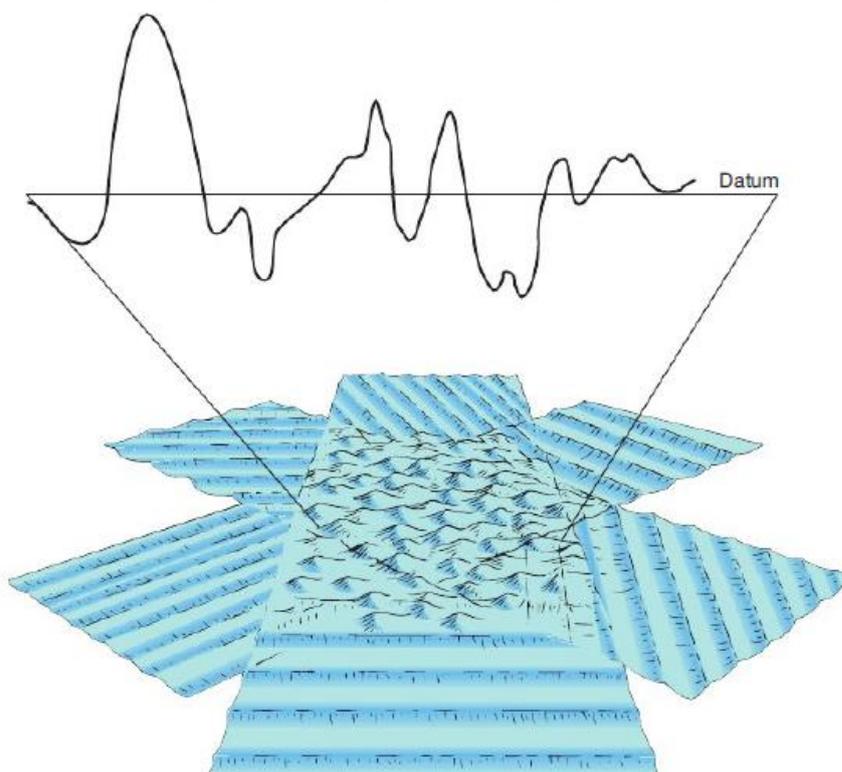


Fonte: Adaptado de Holthuijsen (2007, p. 180)

A altura final da onda, e conseqüentemente a energia transferida, vai depender da intensidade do vento, do tempo de duração dele e do tamanho da pista por onde ele sopra. Dessa forma, a princípio, quanto mais intenso, constante e duradouro for o vento atuante, maiores serão as ondas geradas. Entretanto, o crescimento das ondas tem um limite. Após certo tempo, com o vento agindo a certa velocidade, acontece um equilíbrio entre a taxa de energia recebida e a dissipada pela onda. Esta condição é conhecida como “mar completamente desenvolvido” (BROWN e BEARMAN, 1999).

Acontece, entretanto, do vento variar ao longo do tempo, tanto em direção quanto em velocidade. Essa variação vai provocar a formação de ondas com alturas e períodos diferentes entre si. O conjunto dessas várias ondas com características diferentes é chamado campo de onda. Esse processo de formação do campo de onda pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Formação de um campo de ondas



Fonte: Trujillo e Thurman (2011).

2.2 TEORIA LINEAR DA ONDA

A teoria linear da onda, também conhecida como teoria de onda de Airy (1845), tem sido a teoria básica sobre ondas oceânicas nos últimos 150 anos. Nela, a água é assumida como

sendo um fluido ideal, e somente a gravidade induz forças que controlam o movimento das suas partículas (HOLTHUIJSEN, 2007, p. 107-108).

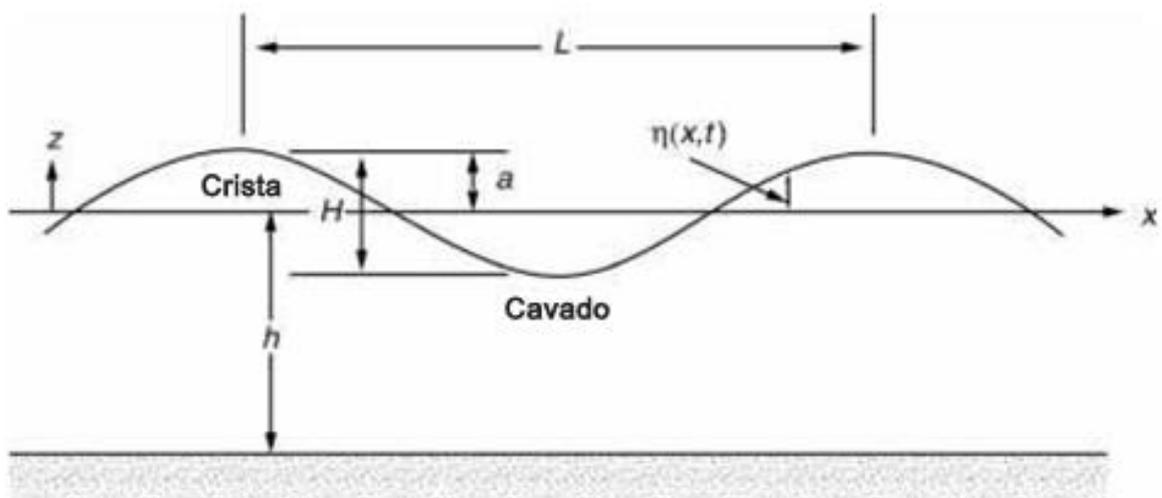
Como fluido ideal, a água é assumida como sendo incompressível, com massa específica constante, sem viscosidade e contínua. A condição de incompressibilidade é razoável, uma vez que as forças envolvidas são tão pequenas que qualquer compressão que haja pode ser ignorada. Com respeito à massa específica constante, apesar de haver variação horizontal desse parâmetro nos oceanos por causa de variações de temperatura e salinidade, esta escala em que ela acontece (dezenas de quilômetros ou mais) é muito maior que a escala horizontal em que a teoria é aplicada. Verticalmente qualquer variação também é ignorada. Porém, em alguns casos, como em rios estuarinos, onde a mistura de camadas de água salgada e doce é relevante, a teoria deve ser aplicada com cuidado. A condição de continuidade, por sua vez, só não se aplica quando há muitas descontinuidades na água, como por exemplo, quando a onda quebra e há formação de bolhas (HOLTHUIJSEN, 2007, p. 108).

Outra consideração feita pela teoria linear é que as partículas de água não podem nem deixar a superfície, nem penetrar o fundo oceânico (HOLTHUIJSEN, 2007, p. 108).

Apesar da formação das ondas envolver forças de pressão induzidas pelo vento, na teoria linear elas são desconsideradas, assim como outras forças como a tensão superficial, a força de Coriolis e a força de atrito com o fundo. Essa limitação das forças envolvidas, implica que o comprimento das ondas em que a teoria linear se aplica vai de poucos centímetros, a poucos quilômetros (HOLTHUIJSEN, 2007, p. 108-109).

A forma mais simples de uma onda progressiva aceita pela teoria linear é apresentada na Figura 4. A onda é assumida como estando se deslocando na direção positiva de x .

Figura 4 - Esquema de uma onda progressiva



Fonte: Adaptado de Dean e Dalrymple (2001).

A Equação 1 representa a forma como a superfície da onda, $\eta(x,t)$, se desloca em relação ao nível médio da água (DEAN e DALRYMPLE, 2001, p. 89).

$$\eta(x,t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \quad (1)$$

onde H é a altura da onda, definida como sendo a distância entre uma crista e um cavado e equivalente ao dobro da amplitude da onda, a ; k é o parâmetro denominado número da onda, que tem como função garantir que o cosseno se repita periodicamente a uma distância L equivalente ao comprimento da onda, e σ é a frequência angular, que tem função semelhante ao número de onda, mas com intuito de garantir a repetitividade temporal a cada T segundos. Assim, k e σ podem ser definidos, respectivamente, pelas Equações 2 e 3.

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

$$\sigma = \frac{2\pi}{T} \quad (3)$$

A velocidade com que a onda viaja é chamada de celeridade e é definida de acordo com a Equação 4.

$$C = \frac{\sigma}{k} = \frac{L}{T} \quad (4)$$

Ao contrário do que aparentam, as partículas de água em uma onda não se deslocam horizontalmente junto com a onda. Na verdade, as partículas de uma onda progressiva apresentam um movimento circular que pode ser decomposto nas componentes de velocidade horizontal, u_x , e vertical, u_z , respectivamente, Equações 5 e 6.

$$u_x(x, z, t) = \frac{H\sigma}{2} \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \cos(kx - \sigma t) \quad (5)$$

$$u_z(x, z, t) = \frac{H\sigma}{2} \frac{\sinh k(h+z)}{\sinh kh} \sin(kx - \sigma t) \quad (6)$$

onde h é a profundidade oceânica local, ou seja, a distância entre o fundo e o nível oceânico.

A trajetória das partículas, por sua vez, pode ser obtida a partir da integração no tempo das Equações 5 e 6. Assim, a posição horizontal, x' , e vertical, z' , podem ser determinadas pelas Equações 7 e 8 (HOLTHUIJSEN, 2007, p. 122).

$$x' = -\frac{H}{2} \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \sin(kx - \sigma) \quad (7)$$

$$z' = \frac{H}{2} \frac{\sinh k(h+z)}{\sinh kh} \cos(kx - \sigma) \quad (8)$$

Uma vez que a posição horizontal varia com o seno e a posição vertical varia com o cosseno, cada partícula apresenta uma trajetória elíptica, como a da Equação 9.

$$\frac{x'^2}{A^2} + \frac{z'^2}{B^2} = 1 \quad (9)$$

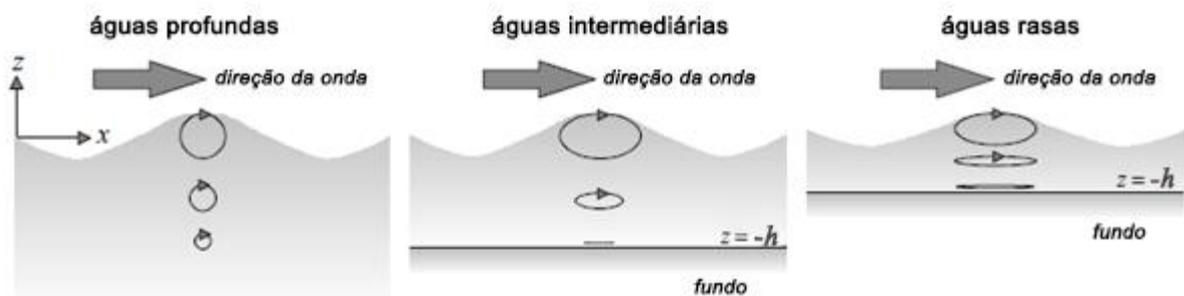
onde A e B são, respectivamente, os eixos horizontal e vertical definidos pelas Equações 10 e 11.

$$A = \frac{H}{2} \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \quad (10)$$

$$B = \frac{H}{2} \frac{\sinh k(h+z)}{\sinh kh} \quad (11)$$

Em águas consideradas profundas, ou seja, quando $kh \rightarrow \infty$, os comprimentos dos dois eixos são iguais ($A=B$) e portanto as partículas apresentam um movimento circular, cujo raio diminui exponencialmente com o aumento da distância em relação à superfície, como pode ser visualizado na Figura 5 (HOLTHUIJSEN, 2007, p. 122). Essa diminuição do raio se estende até metade do comprimento da onda ($L/2$). A partir dessa profundidade, chamada de base da onda, ela não tem mais influência. Uma consequência disso é que para $h \geq L/2$ a onda não sofre interferência do fundo oceânico (TRUJILLO e THURMAN, 2011).

Figura 5 - Movimento orbital das partículas da onda



Fonte: Adaptado de Holthuijsen (2007, p. 122)

Em águas consideradas como rasas, ou seja, quando $kh \rightarrow 0$, o comprimento dos eixos são respectivamente $A=a/(kh)$ e $B=a(1+z/d)$ e, portanto, as partículas se movem em elipses que se tornam mais achatadas à medida que se aproximam do fundo oceânico, mas com trajetória horizontal constante. No fundo oceânico o movimento é praticamente horizontal, conforme mostra a Figura 5 (HOLTHUIJSEN, 2007, p. 122). Essa diminuição das elipses é consequência direta da interferência do fundo oceânico na onda. Quando a profundidade é menor do que $1/20$ do comprimento da onda, ou seja, $h < 1/20$, ela é considerada onda de águas rasas (TRUJILLO e THURMAN, 2011).

Ondas que ocorrem em profundidades compreendidas entre as de águas profundas e as de águas rasas são chamadas ondas intermediárias (ou transientes), e apresentam características tanto das ondas de águas profundas quanto das ondas de águas rasas (TRUJILLO e THURMAN, 2011).

A presença de uma onda na superfície oceânica implica que as partículas de água foram movidas de uma posição de repouso para outra. Essa mudança de posição implica em trabalho contra a gravidade e representa uma energia potencial. Somado a isso, a partícula se move, o que representa uma energia cinética. As Equações 12 e 13 fornecem meios para se quantificar, respectivamente, as energias potencial e cinética por unidade de área da superfície.

$$E_{POT} = \frac{1}{16} \rho g H^2 \quad (12)$$

$$E_{CIN} = \frac{1}{16} \rho g H^2 \quad (13)$$

A partir das Equações 12 e 13, percebe-se que uma das aproximações da teoria linear da onda é que a energia potencial e a energia cinética em uma onda tem igual valor. A energia total, por sua vez, é o somatório das duas, e pode ser determinada a partir da Equação 14 (HOLTHUIJSEN, 2007, p. 132).

$$E = E_{POT} + E_{CIN} = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (14)$$

As ondas ao viajarem através da superfície oceânica transportam essas energias cinética e potencial com elas. Esse transporte de energia, também chamado de fluxo energético, P , pode ser determinado a partir da Equação 15 (HOLTHUIJSEN, 2007, p. 136).

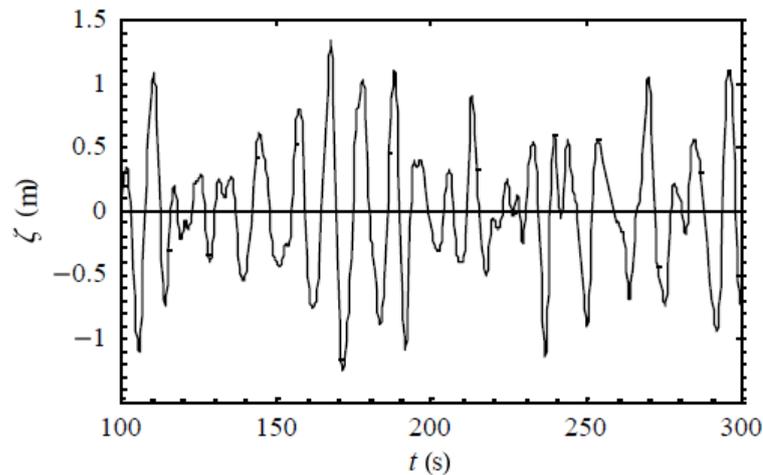
$$P = \left(\frac{1}{8} \rho g H^2 \right) \cdot \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \frac{\sigma}{k} \right] = EC_s \quad (15)$$

onde C_g é definido como velocidade de grupo, e g é a aceleração gravitacional.

2.3 TEORIA IRREGULAR DA ONDA

Enquanto a teoria linear idealiza a superfície oceânica como ondas monocromáticas progressivas regulares, uma análise de uma série temporal de dados da elevação oceânica em um determinado local, como a apresentada no Gráfico 1, mostra claramente que o comportamento das ondas não é regular, e sim, um processo irregular e estocástico (SAMPAIO, 2008).

Gráfico 1 - Exemplo de série temporal de medição da superfície oceânica



Fonte: Adaptado de Falcão (2014, p. 53).

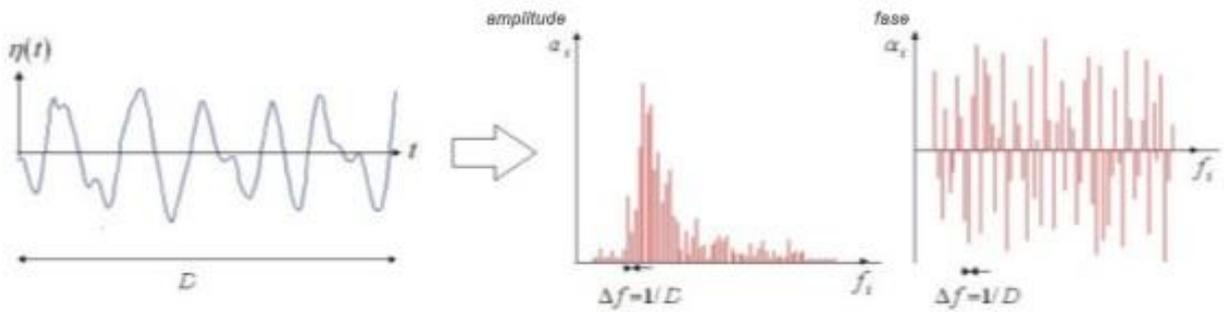
Dessa forma, a análise espectral da série utilizando a Equação 16 permite a caracterização da superfície livre do mar enquanto processo estocástico, possibilitando a descrição da distribuição de energia de um estado de agitação pelos períodos e direções das diferentes ondas geradas (SAMPAIO, 2008).

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N a_i \cos(2\pi f_i t + \alpha_i) \quad (16)$$

onde a_i e α_i são a amplitude e a fase, respectivamente, de cada frequência $f_i = i/\Delta t$ (HOLTHUIJSEN, 2007, p. 31).

A partir da análise de Fourier descrita na Equação 16, pode-se determinar os valores de amplitude e fase de cada frequência, o que proporciona o conhecimento do espectro de amplitude e de fase do registro (HOLTHUIJSEN, 2007, p. 31), como mostra a Figura 6.

Figura 6 - Geração do espectro a partir da série temporal



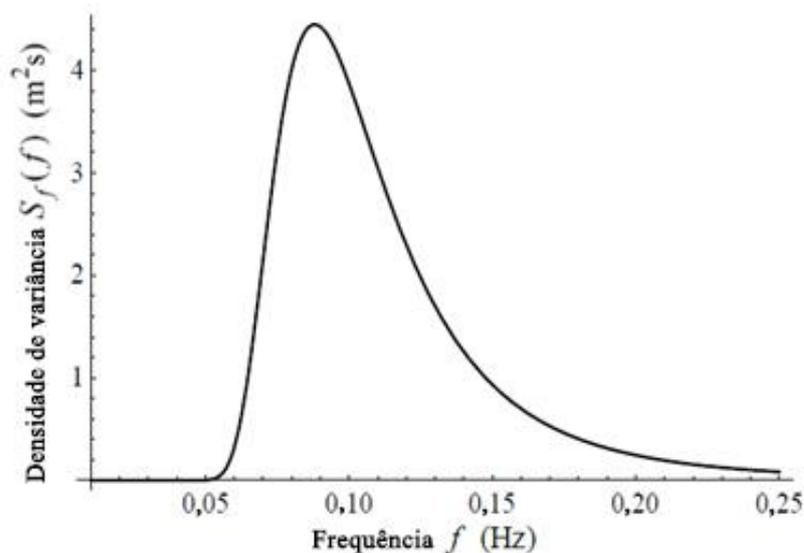
Fonte: Adaptado de Holthuijsen (2007, p. 32).

Entretanto, estatisticamente é mais interessante o conhecimento da variância do que da amplitude. Assim, a caracterização do espectro de densidade de variância da onda se torna mais importante (HOLTHUIJSEN, 2007). A Equação 17 fornece a maneira de se caracterizar o espectro de densidade de variância da onda, S_f .

$$S_f(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f} \overline{\frac{1}{2} a^2} \quad (17)$$

onde $\overline{\frac{1}{2} a^2}$ é a variância de cada componente da onda e $\Delta f = 1/\Delta t$ é o intervalo de frequência. O Gráfico 2 ilustra um espectro de densidade de variância da onda típico.

Gráfico 2 - Espectro de densidade de variância da onda típico



Fonte: Adaptado de Falcão (2014, p. 54).

As características da onda são descritas, a partir do espectro de densidade de variância, em termos dos momentos do espectro, definidos pela Equação 18.

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n S_f(f) df \quad (n = \dots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (18)$$

Existem diversos modelos que tentam estimar o espectro de onda de um determinado local a partir de um número limitado de parâmetros. Como exemplos, temos: o espectro de Phillips, o de TMA (Texel-Marsen-Arsloe), o de Pierson-Moskowitz e o de JONSWAP (*Joint North Sea Wave Project*), sendo os dois últimos os mais utilizados.

O espectro de Pierson-Moskowitz é utilizado, normalmente, quando se têm uma situação de mar completamente desenvolvido, tendo forma dada pela Equação 19.

$$S_f(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4 f^5} e^{-0,74 \left(\frac{g}{2\pi U f} \right)^4} \quad (19)$$

onde f é a frequência da onda em Hz, U é a velocidade do vento medida a 19,5 m acima do nível do mar em m/s, g é a aceleração gravitacional em m/s², e α é um parâmetro adimensional quantitativo, onde $\alpha = 0,0081$ (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 1998, p. 13).

Por sua vez, para situações onde as condições de mar apresentam ondas em crescimento, o espectro de JONSWAP, dado pela Equação 20, adequa-se melhor.

$$S_f(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4 f^5} e^{-1,25 \left(\frac{f}{f_p} \right)^4} \gamma(f) \quad (20)$$

onde f_p é a frequência de pico do espectro, e a função γ é o fator de aprimoramento de pico, a qual modifica o intervalo em torno do pico do espectro, fazendo-o muito mais afilado que o espectro de Pierson-Moskowitz. No resto do intervalo, os dois espectros são semelhantes (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 1998, p. 14).

2.4 PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DA ONDA

As ondas oceânicas são caracterizadas por uma série de parâmetros tais como altura significativa de onda e período de energia de onda, que podem ser definidos a partir da análise dos momentos do espectro de densidade de variância da onda.

2.4.1 Altura Significativa da Onda

A altura significativa da onda, H_s , é definida como a média do 1/3 das maiores ondas registradas em um determinado local (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION'S, 2017). Por ser um parâmetro estatístico, de acordo com Wiegel (1992) existem formas diferentes de se obter esse parâmetro. Entretanto, de acordo com Falcão (2014, p. 56), Holthuijsen (2007) e Cruz (2008, p. 105), a forma mais usada para calcular H_s a partir do espectro de onda é a da Equação 21.

$$H_s \cong H_{m0} = 4\sqrt{m_0} \quad (21)$$

Apesar da maneira incomum utilizada para se caracterizar H_s , experimentos tem demonstrado que o valor encontrado pela Equação 21 se aproxima dos valores estimados visualmente (HOLTHUIJSEN, 2007).

2.4.2 Período de Energia da Onda

O período normalmente utilizado como característico da onda é o denominado período de energia, T_e , que é definido pela Equação 22 (FALCÃO, 2014, p. 56).

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (22)$$

Existem outros parâmetros utilizados para caracterizar o período da onda. Um deles é o período de pico, T_p , definido como sendo o período em que o espectro $S_f(f)$ é máximo.

De acordo com Karimirad (2014, p. 80), os períodos T_e e T_p relacionam-se a partir da Equação 23.

$$T_e = \alpha T_p \quad (23)$$

onde α depende da forma do espectro de onda. Por exemplo, para o espectro de Pierson-Moskowitz, $\alpha = 0,86$. Já pra o espectro de JONSWAP, $\alpha = 0,9$. Em alguns estudos, entretanto,

o valor de T_p é assumido como sendo igual ao de T_e . (KARIMIRAD, 2014, p. 80 *apud* MULTON, 2012).

2.4.3 Potência da Onda

Na teoria linear, o fluxo energético da onda é definido pela Equação 15. Para ondas irregulares, com espectro de densidade de variância $S_f(f)$, o fluxo de energia transportado pelas ondas em águas profundas, ou seja, a potência ondomotriz média em águas profundas é dada pela Equação 24.

$$d\bar{P} = \rho g C_g S_f(f) df \quad (24)$$

Considerando que em águas profundas o valor de $C_g = g/(4\pi f)$, e integrando a Equação 24, a potência média da onda é definida pela Equação 25.

$$\bar{P} = \frac{\rho g^2}{4\pi} \int_0^{\infty} S_f(f) \frac{1}{f} df = \frac{\rho g^2}{4\pi} m_{-1} \quad (25)$$

Utilizando as definições de H_s e T_e , dadas pelas Equações 21 e 22, podemos reescrever a Equação 25 conforme a Equação 26 (FALCÃO, 2014, p. 57).

$$\bar{P} = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e \quad (26)$$

com \bar{P} dado em kW/m , H_s em m e T_e em s .

A Equação 26 é válida para ondas de águas profundas, pois a medida que a onda se desloca para regiões mais rasas, ela sofre interferência do fundo oceânico e perde parte dessa energia devido ao atrito, à percolação e a não rigidez do fundo (WIEGEL, 1992).

2.5 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DAS ONDAS

A avaliação do potencial das ondas de uma determinada localidade é etapa fundamental para a análise da viabilidade do aproveitamento desse recurso. Sendo assim, diversos estudos

vêm sendo realizados ao longo dos anos com o objetivo de quantificar o recurso disponível nos mares de todo o mundo, utilizando-se para isso das mais diversas metodologias.

2.5.1 Potencial ondomotriz ao Redor do Mundo

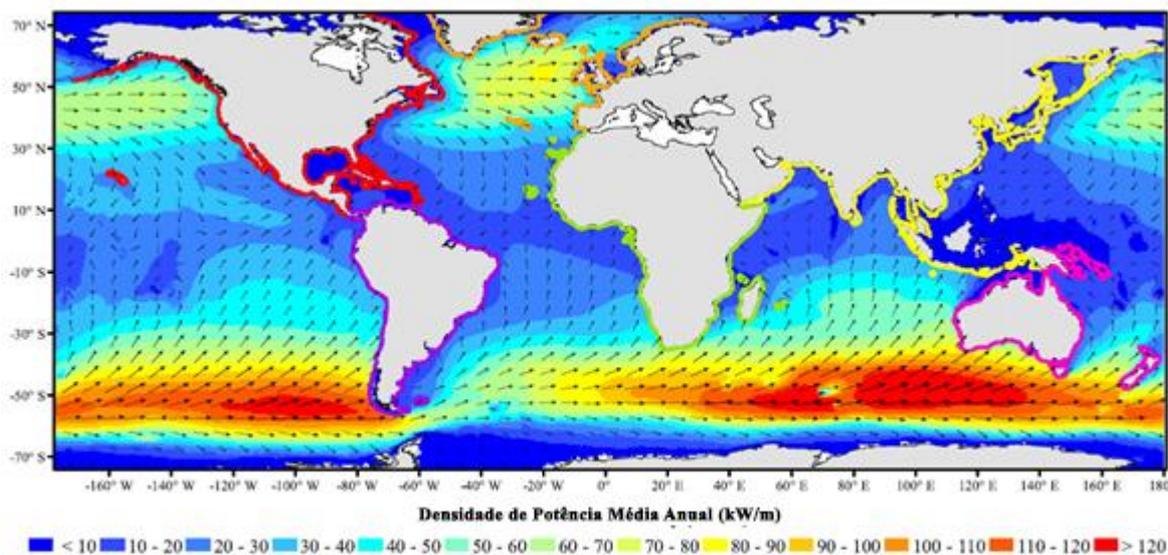
Em escala global, diversos mapeamentos da fonte ondomotriz vêm sendo realizados desde a década de 1960. De acordo com Pontes (1998), um dos primeiros levantamentos do recurso energético das ondas foi realizado por Kinsman (1965). Dos anos que se seguiram, até a atualidade, diversos outros estudos foram realizados. Podemos citar como exemplos, os trabalhos de Inman e Brush (1973), de Isaacs e Seymour (1973), de Panicker (1976), de Pond e Pickard (1978), de Strange *et al.* (1993), de Boud e Thorpe (2003), e mais recentemente os de Cornett (2008), de Gunn e Stock-Williams (2012) e de Arinaga e Cheung (2012).

Dentre os trabalhos mais recentes, Cornett (2008) concluiu que os maiores potenciais médio anual ficam no Hemisfério Sul, com o valor máximo de aproximadamente 125 kW/m ocorrendo no sudoeste da Austrália. Já no Hemisfério Norte, têm-se um potencial acima de 80 kW/m no Atlântico Norte, logo ao sul da Islândia, e um potencial máximo de aproximadamente 75 kW/m no Pacífico Norte. Para a zona tropical (25° N a 25° S), o potencial encontrado fica, em sua grande maioria, abaixo dos 30 kW/m. Entretanto, Cornett (2008) destaca que a variabilidade temporal é um fator importante quando se deseja aproveitar essa energia disponível. Assim, locais com um fluxo moderado e constante de energia das ondas podem ser mais atrativos que locais mais energéticos, porém, menos constantes. Nesse quesito, o estudo evidencia que a zona tropical, com exceção do Mar da Arábia, tende a ser mais constante do que as regiões de altas latitudes.

Gunn e Stock-Williams (2012), por sua vez, estimam que a potência ondomotriz nas linhas costeiras ao redor do mundo é de $2,11 \pm 0,05$ TW, com uma confiabilidade de 95%. Além disso, constataram que, apesar da grande densidade de potência das ondas no Hemisfério Sul na região dos ventos do Oeste, a potência que atinge as costas nos dois hemisférios é praticamente a mesma, com $1,07 \pm 0,03$ TW para o Hemisfério Norte e $1,05 \pm 0,02$ TW para o Hemisfério Sul. Além da análise por hemisfério, foi feita uma análise por continente que levou aos seguintes resultados em ordem decrescente de potencial médio anual: América do Norte, 427 ± 18 GW; Oceania, 400 ± 15 GW; América do Sul, 374 ± 16 GW; África, 324 ± 12 GW; Ásia, 318 ± 14 GW; e Europa, 270 ± 20 GW. Comparativamente com o consumo anual de eletricidade de cada continente, a energia das ondas seria capaz de suprir toda a demanda de

todos os continentes, com exceção da América do Norte e Ásia. A Figura 7 apresenta o mapeamento deste recurso de acordo com Gunn e Stock-Williams (2012, p. 297).

Figura 7 - Distribuição mundial da potência média anual das ondas



Fonte: Adaptado de Gunn e Stock-Williams (2012, p. 297).

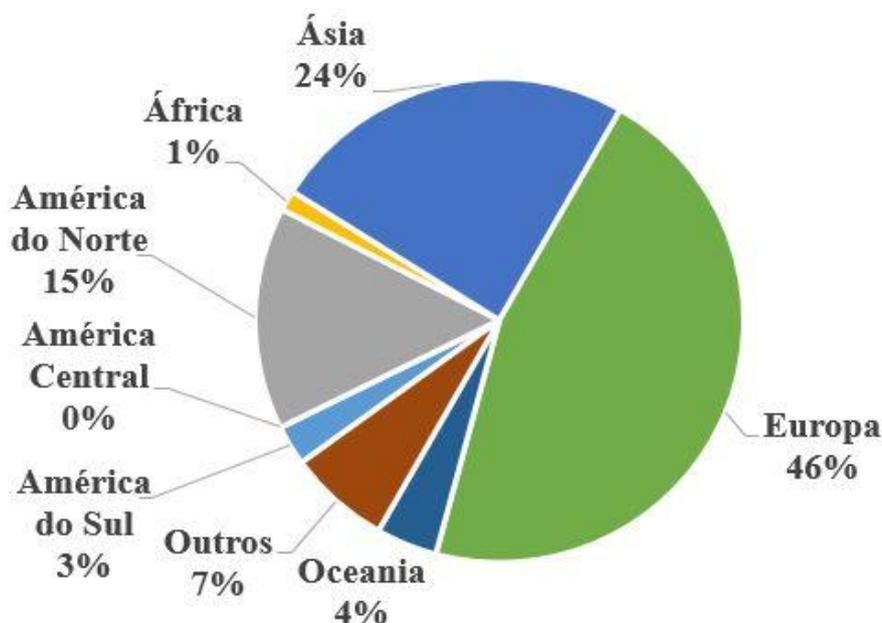
Já em Arinaga e Cheung (2012), a partir da análise de 10 anos de dados de reanálise, estima-se potenciais variando de 17 a 130 kW/m em latitudes acima de 30° N, enquanto que para as latitudes abaixo de 30° S, a energia das ondas é mais constante ao longo do ano e varia entre 50 e 100 kW/m, valores próximos aos encontrados por Cornett (2008). Entretanto, apesar do grande potencial nessas regiões, ela se concentra grande parte em alto mar. Já a energia das ondas na região dos ventos alísios é mais acessível, apesar de moderada, com valores máximos de 20 kW/m e 13,5 kW/m nos oceanos Pacífico e Atlântico, respectivamente.

Por abrangerem uma dimensão espacial muito grande, os estudos feitos em escala global apenas dão indicativos do potencial de cada região, sendo assim necessárias análises locais para uma melhor precisão do potencial existente.

A Europa é o continente que mais tem investigado o potencial dessa fonte. Um levantamento realizado a partir da revista *Renewable Energy*, um dos principais veículos de divulgação da área, desde a sua criação em 1993 até o ano de 2016, mostra que avaliações do potencial de locais na Europa representam 46% de todos os locais avaliados, cujos resultados foram publicados nela. O Gráfico 3 apresenta ainda os percentuais dos demais continentes, onde a Ásia corresponde a 24%, enquanto que a América do Norte, principalmente os EUA, correspondem a 15%. Oceania, América do Sul e África, correspondem, respectivamente, a 4%, 3% e 1%. Os demais 7% estão distribuídos entre avaliações globais e trabalhos que envolvem mais de um continente, como por exemplo o de Zodiatis *et al.* (2014), que avalia o recurso da

região da Bacia do Levante, no Mar Mediterrâneo, englobando assim partes da Europa, Ásia e África.

Gráfico 3 – Publicações na *Renewable Energy* por continente.



O período analisado compreende os anos de 1993 a 2016. As referências dos artigos utilizados na construção do gráfico encontram-se listadas no Apêndice A. Fonte: Autor.

Como exemplo de avaliações realizadas na Europa podem ser citados os estudos feitos por Mollison e Pontes (1992), Pontes (1998), Clément *et al.* (2002), Bernhoff, Sjöstedt e Leijon (2006), Henfridsson *et al.* (2007), Waters *et al.* (2009), Rusu e Guedes Soares (2009), Iglesias *et al.* (2009), Iglesias e Carballo (2010a e 2010b), Bento *et al.* (2011), Bento, Martinho e Guedes Soares (2011), Mendes, Calado e Mariano. (2012), Barbariol *et al.* (2013), Nieuwkoop *et al.* (2013), Vicinanza, Contestabile e Ferrante (2013), Gonçalves, Martinho e Guedes Soares (2014b), Mota e Pinto (2014), Soomere e Eelsalu (2014) e Kasiulis, Punys e Kofoed (2015).

Já o potencial energético dos outros continentes, comparativamente às análises feitas para a Europa, foi pouco investigado. São exemplos de estudos na Ásia os trabalhos de Alnaser (1993), Raju e Ravindran (1997), Zhang, Li e Lin (2009), Abbaspour e Rahimi (2011), Saket e Etemad-Shahidi (2012), Aoun *et al.* (2013), Liang *et al.* (2013 e 2014), nas Américas os de Özger, Altunkaynak e Sen (2004), Lenee-Bluhm, Paasch e Özkan-Haller (2011), García-Medina, Özkan-Haller e Ruggiero (2014), Hiles *et al.* (2014), Robertson, Hiles e Buckham (2014), López, Veigas e Iglesias (2015), na Oceania os de Hughes e Heap (2010), Behrens *et al.* (2012), na África o de Sierra *et al.* (2016), além de trabalhos que envolvem regiões abrangendo mais de um continente, como os de Aydogan, Ayat e Yüksel (2013) e Zodiatis *et al.* (2014).

2.5.2 Potencial do Brasil

No Brasil, estudo feito por Gonçalves, Feijó e Abdallah (2008) estima o potencial dessa fonte de energia em 50 TWh/ano, enquanto que Boud e Thorpe (2003) estima para o mundo um potencial entre 8.000 e 80.000 TWh/ano. Além do trabalho de Gonçalves, Feijó e Abdallah (2008), podemos citar o feito por Estefen (2003), que apresenta o potencial da costa entre as latitudes 19° S a 32° S usando seis anos e meio de dados do satélite de altimetria Topex/Poseidon, resultando em uma estimativa de 40 GW.

Ricarte Beserra (2007) usou aproximadamente dois anos de dados de boia para mensurar o potencial do Estado do Ceará. Como resultado, o recurso avaliado mensalmente variou entre 6 kW/m e 11 kW/m, com uma média anual de 7,7 kW/m.

Contestabile, Ferrante e Vicinanza (2015) avaliaram o recurso offshore e a uma profundidade de 20 m na costa de Santa Catarina. Dados de reanálise do ERA-Interim foram utilizados para avaliar o recurso offshore (15,25 kW/m) e o modelo numérico de propagação costeira Mike21 SW foi utilizado na modelagem próxima à costa (11,43 kW/m).

Pianca, Mazzini e Siegle (2010) avaliaram seis pontos ao longo da costa do Brasil usando o modelo NWW3 (NOAA Wave Watch III) com foco na altura significativa e no período da onda. O modelo NWW3 foi validado em um dos pontos a partir de dados de boia. Esses mesmo dados de boia já haviam sido utilizados anteriormente por Alves e Melo (2001) para modelar as ondas da região.

Além desses trabalhos, avaliações completas do potencial ondomoriz na região offshore do Brasil foram realizadas por Carvalho (2010), Souza (2011) e Silva (2013), com o primeiro e o último utilizando o modelo de 3ª geração WW3 (WaveWatch-III).

Carvalho (2010) apresenta uma das análises mais completas sobre o potencial da costa do Brasil. Nele, a costa brasileira é dividida em 10 regiões e a média mensal da potência da onda de cada uma é estimada. A partir dos resultados, a região mais indicada para instalação de dispositivos de conversão de ondas seria a parte mais ao leste da Região Nordeste, onde a potência mensal média varia entre 10 kW/m e 17 kW/m.

Usando os resultados de Carvalho (2010), Fleming (2012) estima o recurso total da região offshore do Brasil em 91 GW. Souza (2011), por sua vez, usa um relatório de acesso restrito do projeto EONDAS-RS entre a Petrobrás e a FURG para avaliar o potencial da região offshore em 160 GW. Complementarmente, Silva (2013) realizou uma análise sazonal do recurso ondomotriz, onde observou-se que entre os meses de dezembro e fevereiro o potencial

ondomotriz é alto nas Regiões Norte e Nordeste e baixo nas Regiões Sul e Sudeste. Durante o período entre junho e agosto ocorre o inverso.

Todos estes trabalhos citados, com exceção dos de Alves e Melo (2001), Ricarte Beserra (2007) e Pianca, Mazzini e Siegle (2010), não utilizam dados medidos diretamente para estimar o potencial das ondas. Isso acontece porque, de acordo com Ricarte Beserra (2007), o litoral brasileiro, em sua maior parte, ainda se encontra desconhecido à luz de técnicas modernas de medições e caracterização dos seus oceanos, uma vez que são realizadas poucas medições e estas normalmente estão voltadas para atender as atividades petrolíferas. Essa falta de dados pode produzir resultados muito divergentes como acontece entre os estudos de Carvalho (2010) e Souza (2011), onde ocorre uma diferença de cerca de 80% entre os potenciais energéticos totais estimados.

2.5.3 Metodologias de Avaliação do Potencial das Ondas

De acordo com Gonçalves, Martinho e Guedes Soares (2014b), as metodologias para realização dos levantamentos do potencial de energia ondomotriz encontram-se na sua terceira geração.

Na primeira geração, os levantamentos eram realizados a partir de dados de onda medidos por boias instaladas na costa e em regiões de alto mar, o que permitia uma visão geral das condições médias do oceano local. As limitações desse método estão associadas com o período de tempo de medição das boias que normalmente são limitados, e com o fato das informações serem adquiridas para um ponto, que muitas vezes não é o mesmo para o qual se está considerando fazer investimentos. Entretanto, apesar das limitações, os dados de medição são essenciais para a previsão das condições de onda por meio de modelos numéricos (GONÇALVES, MARTINHO e GUEDES SOARES, 2014b).

A segunda geração de avaliações da energia das ondas é baseada nos dados de boia e nos resultados de modelos numéricos para águas profundas, o que permite a avaliação das condições de onda em alto mar (GONÇALVES, MARTINHO e GUEDES SOARES, 2014b). Um exemplo de trabalho realizado utilizando essa metodologia é o de Pontes (1998), que sintetiza informações do recurso na costa europeia do Atlântico e do Mediterrâneo na forma do Atlas Europeu da Energia das Ondas (*European Wave Energy Atlas - WERATLAS*).

Já a terceira geração, utiliza modelos numéricos que são capazes de levar em consideração a física da geração de ondas e a sua propagação em águas rasas na região costeira.

Esses modelos conseguem realizar avaliações mais realísticas do potencial da energia das ondas nas áreas costeiras, regiões mais propícias ao desenvolvimento de parques ondomotrizs. Dentre os modelos de terceira geração podemos citar o WW3, o WAM, e o SWAN (GONÇALVES, MARTINHO e GUEDES SOARES, 2014).

Mesmo quando analisada uma mesma geração, tem-se várias ferramentas diferentes que podem ser utilizadas. Tanto os modelos, quanto as fontes de dados de entrada e de dados para validação utilizados variam bastante de trabalho a trabalho. Porém, segundo Hiles *et al.* (2014) existem duas metodologias predominantes para levantamento do potencial próximo à costa.

A primeira envolve criar uma matriz de estados de mar parametrizados a partir do clima de onda em alto mar, separado por bins. Cada estado de mar, por sua vez, é executado no modelo e o clima de onda próximo à costa é então determinado. A vantagem desse método é que o número de simulações é limitado pelo tamanho de estados de mar parametrizados. Quando vários anos de estados de mar são analisados, esse método pode reduzir o esforço computacional em várias ordens de grandeza. A desvantagem desse método é que a parametrização negligencia muitos detalhes do espectro de onda que são importantes para se determinar o desempenho de um WEC. Adicionalmente, esse método não considera ondas como condições de fronteira (HILES *et al.*, 2014).

A segunda metodologia é uma abordagem de série temporal. Condições de onda são simuladas em um intervalo de tempo discreto ao longo de um extenso período de *hindcast*, e os resultados das séries temporais são então sintetizados para gerar os dados estatísticos. A vantagem desse método é que as condições de contorno são específicas para cada intervalo de tempo, então elas podem ser tão detalhadas quanto necessário. A desvantagem desse método, por sua vez, é o grande gasto computacional exigido. Simulações de 10 anos de condições de ondas a intervalos de 3 h vão exigir 292.220 simulações (HILES *et al.*, 2014).

Dentre os diversos trabalhos publicados nos últimos anos, que utilizam metodologias de 3ª geração para estimar o potencial das ondas, podemos citar, por exemplo, o de Zodiatis *et al.* (2014), que realizou um estudo da região leste do Mar Mediterrâneo (30°N – 38°N e 27,5°L – 36,5°L), mais especificamente, na Bacia do Levante, utilizando o modelo WAM na versão CY33R1 produzida pelo *European Centre for Medium-range Weather Forecast* (ECMWF). O modelo gerou em modo águas rasas um *hindcast* de 10 anos (2001 – 2010) da energia das ondas, que foi validado a partir da comparação com três meses de dados medidos por uma boia instalada no porto de Hareda, Israel. No modelo foi utilizada uma alta resolução espacial, com dimensões de 1/60° x 1/60°, o que proporcionou uma estimativa das características locais com maior credibilidade do que outros estudos realizados no mesmo local, tais como Pontes (1998)

com resolução de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ e Arinaga e Cheung (2012) com resolução de $1,25^\circ \times 1^\circ$. Além da alta resolução, o espectro de onda foi discretizado em 25 frequências entre 0,0417 Hz e 0,54764 Hz, espaçadas logaritmicamente, e em 24 direções igualmente espaçadas, enquanto que os intervalos de tempo de propagação foram de 45 s. Como forçante de vento foi utilizada a saída de dados de velocidade de vento a 10 m de altura e direção, ambos a cada 3 horas, do modelo regional de sistema atmosférico SKIRON, que possui a mesma resolução horizontal do modelo de onda. O principal resultado do modelo de onda é o espectro de ondas 2D, a partir do qual foi estimado o potencial de energia.

García-Medina, Özkan-Haller e Ruggiero (2014), por sua vez, baseando-se em estudos de potenciais globais (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, 2004a; ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, 2004b; CORNETT, 2008; ARINAGA e CHEUNG, 2012) que identificaram a costa Noroeste dos Estados Unidos como tendo um bom potencial para geração de energia a partir das ondas, realizaram um estudo que avaliou o potencial energético da plataforma continental (profundidades de 50 a 250 m) dos estados do Oregon e Washington, sendo este último apenas da sua parte sudoeste. Neste estudo foi realizado um hindcast de sete anos de alta resolução das ondas utilizando-se o modelo SWAN com condições de alto mar fornecida por aninhamentos de simulações do modelo WW3. Pelo modelo WW3 foram realizadas duas simulações, uma de escala global com resolução de $1^\circ \times 1,25^\circ$ e um aninhamento englobando o noroeste do Oceano Pacífico com resolução de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Já com o modelo SWAN, foram realizados outros dois aninhamentos, um com resolução de três arco-minutos envolvendo a região de $41,45^\circ\text{N} - 47,50^\circ\text{N}$ e $127^\circ\text{O} - 123,75^\circ\text{O}$, e um último nível de aninhamento com resolução de trinta arco-segundos cobrindo a região de $41,50^\circ\text{N} - 47,35^\circ\text{N}$ e $125,25^\circ\text{O} - 123,75^\circ\text{O}$. Como forçante das simulações do modelo WW3 foram utilizados campos de vento a 10 m de altura obtidos do modelo atmosférico *Global Forecast System* (GFS). Além disso, nesse modelo, o espectro de onda foi discretizado em 25 intervalos espaçados logaritmicamente entre 0,04118 e 0,5 Hz e em 24 direções. Já no modelo SWAN o espectro foi discretizado nos mesmos 25 intervalos, porém, foram utilizadas 72 direções para melhor simular o processo de refração. Para a batimetria, implementada no modelo SWAN foram utilizados os dados obtidos do ETOPO1 e do *NGDC Gridded Tsunami Bathymetry* combinados. A qualidade do hindcast foi avaliada usando dados de boia disponíveis na região.

De forma similar, Gonçalves, Martinho e Guedes Soares (2014a) utilizaram os modelos WW3 e SWAN conjuntamente para estimar a energia das ondas nas Ilhas Canárias. Entretanto, a validação do modelo nesse trabalho incluiu, além da comparação com dados de boia, uma comparação com dados obtidos por sensoriamento remoto via satélites. O modelo WW3 foi

simulado com resolução de $1^\circ \times 1^\circ$, utilizando como batimetria a base de dados do *General Bathymetric Chart of the Oceans* (GEBCO) e como forçante o campo de vento obtido na base de dados do ERA-Interim, produzido pelo ECMWF, para uma área cobrindo praticamente todo o Atlântico Norte ($10^\circ\text{N} - 75^\circ\text{N}$ e $70^\circ\text{O} - 30^\circ\text{L}$). Os resultados dessa primeira modelagem serviram como condições de contorno para o modelo SWAN com resolução de $0,05^\circ \times 0,1^\circ$ envolvendo as Ilhas Canárias ($27^\circ\text{N} - 30,5^\circ\text{N}$ e $20^\circ\text{O} - 13^\circ\text{O}$). Uma segunda simulação foi realizada, com resolução de $0,0083^\circ \times 0,0083^\circ$, envolvendo agora parte da Ilha Gran Canaria ($27,93^\circ\text{N} - 28,33^\circ\text{N}$ e $15,92^\circ\text{O} - 15,23^\circ\text{O}$), e incluindo uma boia que foi utilizada na validação do modelo. A validação se deu por meio da comparação estatística dos dados de H_s , período médio (T_m) e T_p . Além da validação por meio de comparação com dados de boia presente na área, também foram utilizados dados de quatro satélites (ERS-2, TOPEX, Jason-1 e GFO), cujas rotas passam por sobre a área analisada.

Outros exemplos de trabalhos que utilizaram a mesma metodologia foram: Silva, Rusu e Guedes Soares (2013), que a partir do levantamento do potencial das regiões de Aguçadora e São Pedro de Moel, respectivamente, parte norte e central da costa de Portugal, estimaram a produção de energia de cinco tipos de WEC diferentes; Rusu e Guedes Soares (2013), que utilizaram a metodologia para avaliar o impacto que parques compostos pelo WEC Pelamis provocariam na costa de Portugal; e Gonçalves, Martinho e Guedes Soares (2014b), que realizaram estudo para a costa oeste da França, porém realizando validação apenas com dados de boia.

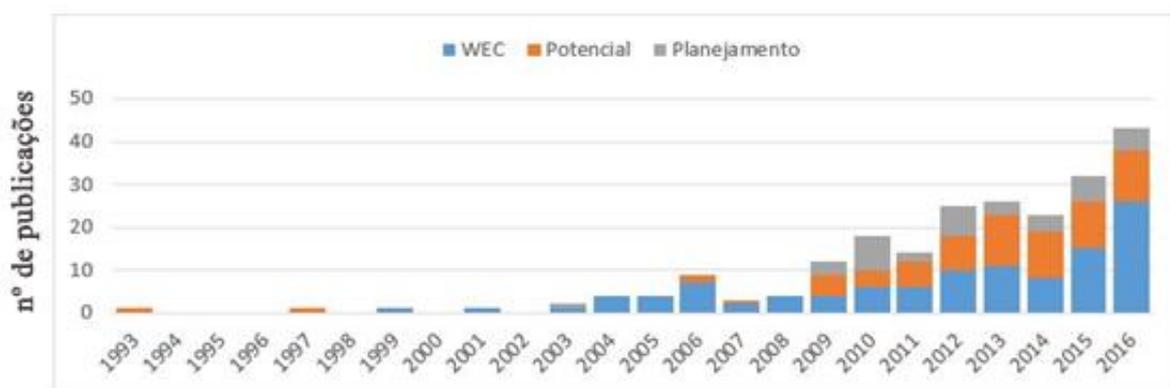
Hiles *et al.* (2014), em seu trabalho de avaliação do recurso energético das ondas em Hot Spring Cove, Costa Oeste da Ilha Vancouver - Canadá, utilizaram um modelo diferente dos utilizados nos trabalhos citados anteriormente. Ele fez uso do REF/DIF-1, que é um software de modelagem de ondas monocromáticas de resolução por fase, baseado na equação de leve inclinação (*mild-slope equation*). O modelo foi utilizado no modo linear, com espectro de onda discretizado em intervalos constantes de direção de 15° e com intervalo de frequência variável de $0,00955f$ (onde f é o centro do intervalo da frequência). Como condições de contorno, foram utilizados dados do espectro de ondas direcional, com 24 intervalos constantes de direção de 15° , e 25 intervalos de frequência de $0,0955f$ Hz de largura ($0,04 - 0,41$ Hz) do modelo *NOAA WW3 global mosaic*, disponibilizados publicamente pelo NOAA. Uma aproximação por função de transferência foi utilizada para modelar as ondas irregulares. A utilização da função de transferência reduziu significativamente o esforço computacional necessário. A validação do modelo foi realizada através de comparação com dados de boias de medição.

3 DISPOSITIVOS DE CONVERSÃO DE ONDAS

Aproveitar a energia transportada pelos oceanos na forma de ondas é uma ideia que remonta ao final do séc. XVIII. De acordo com Burman e Walker (2009, p. 4), a primeira patente registrada foi dada a Monsieur Girard, em 1799, por um equipamento que consistia de um navio atracado na costa que usava as ondas para acionar bombas e outras máquinas.

Desde a primeira patente, até meados do século XX, poucas tentativas de desenvolvimento da tecnologia foram realizadas. Somente a partir da década de 1970, com a crise do petróleo, e da década de 1990, com o crescimento da preocupação em relação às reservas de recursos naturais, é que as pesquisas visando o desenvolvimento de dispositivos de conversão ondomotriz se intensificaram. Essa evolução pode ser vista no Gráfico 4, que apresenta um levantamento dos artigos relacionados com a energia ondomotriz publicados no periódico *Renewable Energy* entre 1993, ano de lançamento da revista, e 2016. A *Renewable Energy* é um dos principais veículos de divulgação científica na área.

Gráfico 4 - Publicações sobre energia das ondas na *Renewable Energy*



WEC representa os artigos que tratam sobre desenvolvimento e testes de dispositivos de conversão ondomotriz; Potencial representa os artigos que avaliam o recurso ondomotriz ou a capacidade de geração ondomotriz em um determinado local; Planejamento envolve artigos que tratam da análise econômica ou de viabilidade técnica da utilização dessa fonte de energia. Fonte: Autor.

3.1 SETOR DE ENERGIA ONDOMOTRIZ

O setor de energia das ondas vem avançando no sentido de desenvolver uma indústria. Passos vêm sendo dados na direção da viabilidade comercial dos projetos. Os mais avançados estão progredindo além dos protótipos de demonstração e estão se encaminhando para o desenvolvimento de dispositivos comerciais de vários megawatts. Esse avanço deve-se em

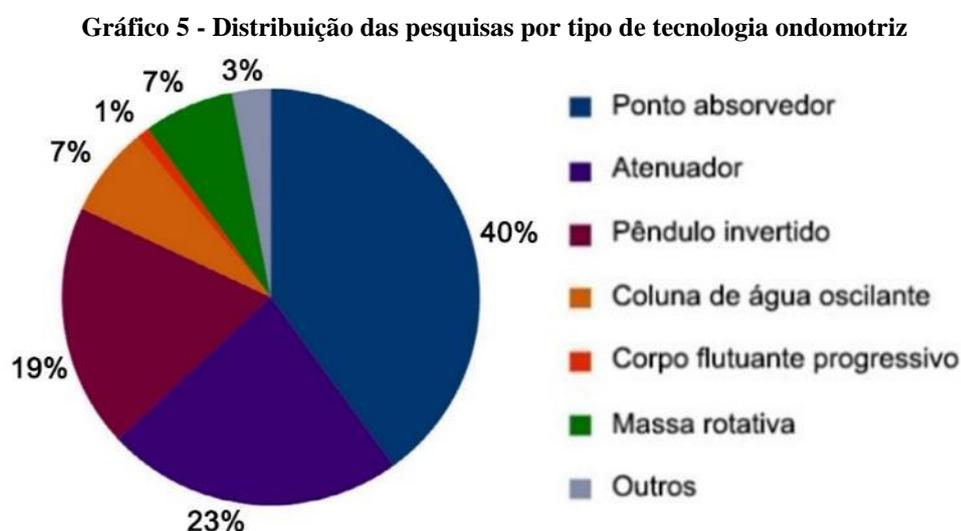
parte ao apoio das concessionárias no âmbito de parcerias no processo de desenvolvimento, e em alguns casos, cooperações internacionais (CARBON TRUST, UNIVERSITY OF EDINBURGH & JRC, 2012, p. 13). Entretanto, apesar dos avanços recentes, nenhum projeto atingiu maturidade suficiente para competir com as outras fontes de energia renováveis existentes ou sequer para se tornar comercial (MAGAGNA e UIHLEIN, 2015, p. 87).

Magagna e Uihlein (2015, p. 87 *apud* MacGillivray *et al.*, 2013) cita que as tecnologias de energias oceânicas, inclusa a energia ondomotriz, enfrentam quatro barreiras principais para o seu desenvolvimento e implantação: desenvolvimento tecnológico; finanças e mercado; questões ambientais e administrativas; e disponibilidade de rede. Dentre estas quatro barreiras, as tecnológicas representam o maior desafio a ser enfrentado pelo setor no curto e médio prazo.

Soerensen e Weinstein (2008, p. 3) estimam que até o ano de 2008 tenham sido registradas mais de 4000 patentes de diferentes dispositivos de conversão. Já Rhinefrank *et al.* (2006, p. 1280) estimam esse número em mais de 1500 patentes em 2006. Essa grande quantidade deve-se principalmente a dois fatores: as características oceânicas para as quais os conversores são desenvolvidos, e os princípios tecnológicos empregados. O somatório desses dois fatores torna difícil a convergência da tecnologia para um único modelo.

A falta de consenso com relação aos projetos entre os dispositivos de energia das ondas constitui um obstáculo tecnológico que o setor deve superar, tanto em matéria de concepção global dos conversores quanto em relação aos seus componentes. A convergência para um ou poucos projetos é essencial para garantir a existência de uma cadeia de suprimentos e para reduzir custos através da economia de escala (MAGAGNA e UIHLEIN, 2015, p. 87).

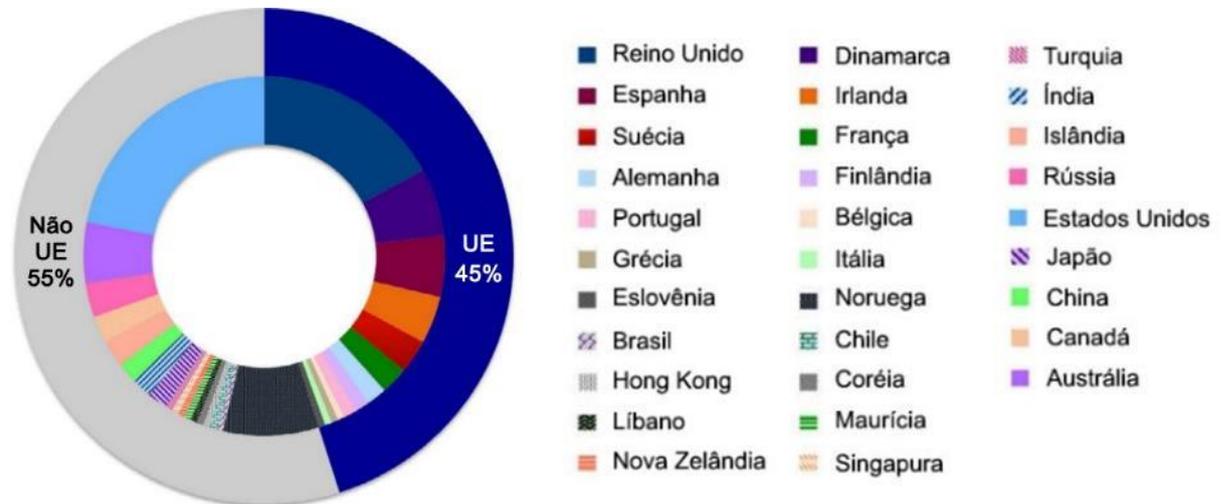
Apesar da falta de consenso com relação ao projeto dos WEC, três diferentes classes concentram 82% dos esforços de pesquisa mundial, como pode ser visto no Gráfico 5.



Ano de referência: 2014. Fonte: Adaptado de Magagna e Uihlein (2015, p. 95).

Em 2014, aproximadamente 170 desenvolvedores compunham o setor de energia ondomotriz, onde 45% destes se concentram na União Europeia conforme Gráfico 6 (MAGAGNA e UIHLEIN, 2015).

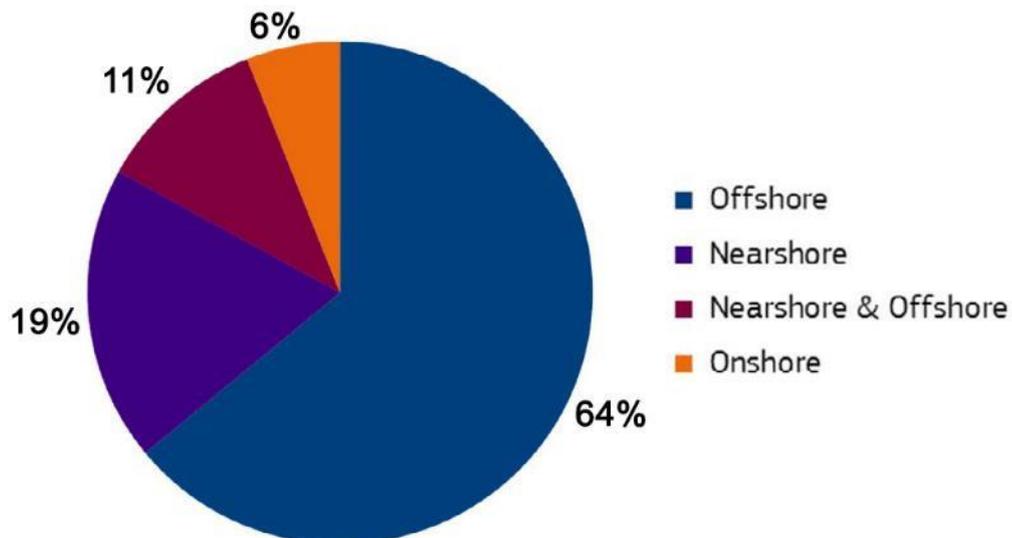
Gráfico 6 - Distribuição das companhias de energia ondomotriz ao redor do mundo



Ano de referência: 2014. Fonte: Adaptado de Magagna e Uihlein (2015, p. 96).

Outra característica que precisa ser definida é a distância de instalação dos WEC em relação à costa. Do total de WEC desenvolvidos, 64% são projetados para locais afastados da costa, com profundidades maiores que 25 m e distâncias de até 10 km, como mostra o Gráfico 7. A instalação em locais com distâncias variadas em relação à costa implica em projetos diferentes para dispositivos dentro da mesma classe, o que aumenta ainda mais o problema de consenso de projeto.

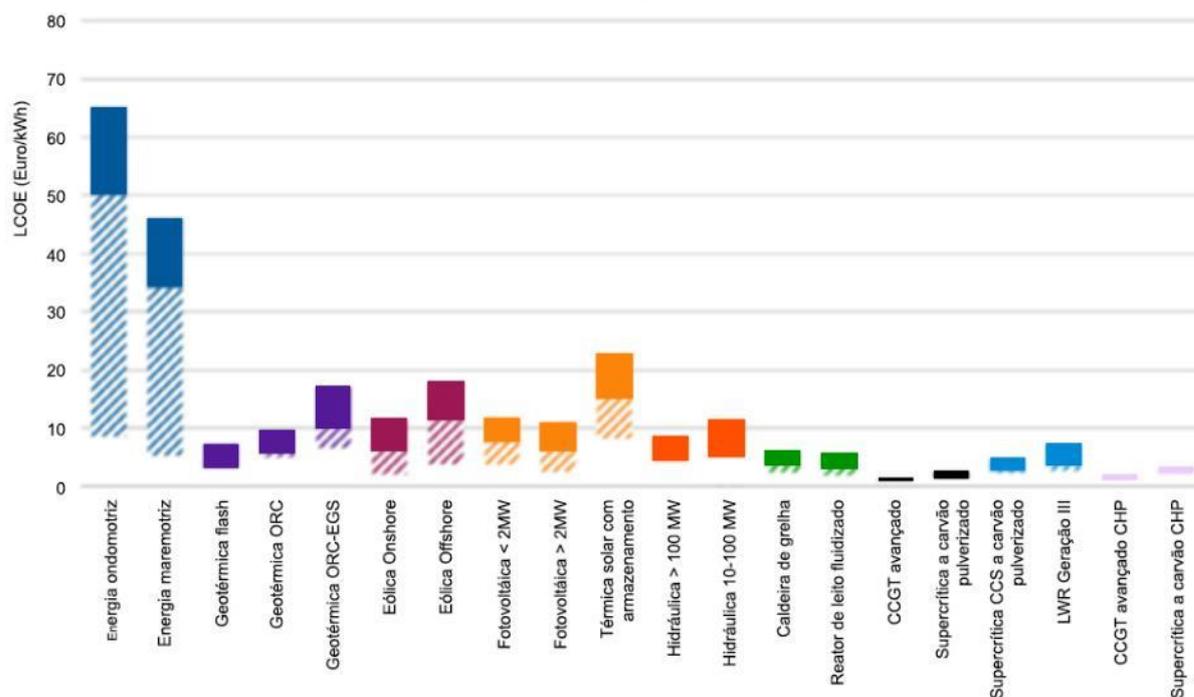
Gráfico 7 - Distribuição dos WEC em relação ao local de instalação



Ano de referência: 2014. Fonte: Adaptado de Magagna e Uihlein (2015, p. 96).

Outra barreira existente está relacionada com os custos ainda muito elevados da tecnologia. O Gráfico 8 mostra um comparativo entre os Custos de Energia Normalizados (LCOE) de diversas fontes de energia, tanto renováveis quanto convencionais, onde a energia ondomotriz se apresenta como a de maior custo atualmente.

Gráfico 8 - LCOE para fontes de energia alternativas e convencionais



As barras sólidas indicam o custo atual da tecnologia em Euro por kWh, enquanto que as barras hachuradas representam a redução de custos esperada para o futuro. Fonte: Adaptado de Magagna e Uihlein (2015, p. 88).

Os altos custos e incertezas associados com a tecnologia das ondas têm afastado investidores. Assim, existe uma necessidade óbvia de se identificar maneiras de facilitar o desenvolvimento da tecnologia e diminuir os riscos associados aos investidores, tornando essa fonte competitiva frente as outras alternativas renováveis (MAGAGNA e UIHLEIN, 2015, p. 88).

3.2 DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA

Existem diversas etapas que os desenvolvedores devem superar entre o conceito inicial e o produto comercial. A Figura 8 mostra essas diferentes etapas e estima o quanto gasta-se progressivamente. Os valores estão em euros.

Figura 8 - Etapas de desenvolvimento da tecnologia ondomotriz



Fonte: Adaptado de SI Ocean (2013, p. 10).

Dentro das etapas de desenvolvimento da tecnologia, pode-se definir o conceito de Nível de Prontidão Tecnológica (NPT). O NPT determina o progresso do desenvolvimento de um WEC desde o conceito inicial até o produto final, portanto, sendo útil para identificar a disponibilidade para o mercado de um dispositivo de conversão de onda. O Tabela 1 apresenta os níveis que toda nova tecnologia ondomotriz terá que superar até se tornar comercial.

Tabela 1 - Níveis de Prontidão Tecnológica (Continua)

NPT	Descrição	Indicador do Dispositivo Ondomotriz
1	Princípios básicos observados e reportados	Definição de conceitos; Pesquisa científica começa a ser traduzida em pesquisa aplicada e desenvolvimento, onde os princípios básicos são observados e reportados.
2	Conceito tecnológico e/ou aplicação formulados	O conceito tecnológico e as aplicações são formuladas e investigadas através de estudos analíticos e considerações sobre o projeto principal. Este estágio é caracterizado por revisão bibliográfica, exploração de conceitos e planejamento. Escala Guia: 1:25 – 1:100 (Pequena Escala)
3	Função crítica analítica e experimental e/ou prova de conceito característica	Estágios Iniciais de Desenvolvimento, Projeto e Engenharia; Pesquisa ativa é iniciada, incluindo estudos de engenharia e estudos de laboratório para fisicamente validar previsões analíticas dos elementos da tecnologia. Escala Guia: 1:25 – 1:100 (Pequena Escala)
4	Componentes e/ou validação parcial do sistema em laboratório	Prova do Conceito; Prova do conceito do sistema, ou desenvolvimento de componentes, testes e validação do conceito. Elementos críticos da tecnologia são desenvolvidos e testados em laboratório, e simulações computacionais dos dispositivos são realizadas. Escala Guia: 1:10 – 1:25 (Média Escala)
5	Validação dos componentes e/ou parcial do sistema em ambiente relevante	Demonstração Técnica em Laboratório; Componentes básicos da tecnologia são fabricados em escala relevante ou real e integrados para estabelecer e verificar o nível de funcionalidade e preparação do sistema e subsistema para testes em ambiente simulado. Escala Guia: 1:2 – 1:5 (Larga Escala)
6	Validação do modelo do sistema/subsistema em ambiente relevante	Integração do Sistema e Demonstração Técnica do Sistema em Laboratório; Nível de interfaceamento/integração demonstrado por teste de modelo ou protótipo em escala real. Nesse estágio, um modelo representativo ou um protótipo do sistema em escala entre relevante e real, que está além do apresentado no NPT 5, é testado em um ambiente relevante, como por exemplo, uma instalação de testes capaz de produzir ondas simuladas e outras condições de operação, enquanto monitora a resposta e a performance do dispositivo. Além disso, os conceitos de fundação do dispositivo devem ser incorporados e demonstrados. Esse estágio representa o maior passo na demonstração da prontidão da tecnologia, na mitigação de riscos e é o estágio que conduz aos testes em mar aberto. Escala Guia: 1:2 – 1:5 (Larga Escala)

Tabela 1 - Níveis de Prontidão Tecnológica (Conclusão)

7	Demonstração do sistema protótipo em ambiente operacional	Testes e Demonstração do Sistema em Mar Aberto; Teste podem ser realizados inicialmente em local com água relativamente benigna, com a expectativa de se testar depois em ambiente de mar aberto, onde ambientes operacionais representativos podem ser testados. O projeto final da fundação/ancoragem deve ser incorporado aos testes nesse estágio. Escala Guia: 1:1 – 1:3 (Larga Escala)
8	Sistema atual completo e serviço qualificado através de testes e demonstração	Operação do Sistema em Mar Aberto; O protótipo em sua forma final (em escala ou próximo) deve ser testado e qualificado em um ambiente de mar aberto sob todas as condições operacionais esperadas para demonstrar a prontidão para desenvolvimento comercial em um projeto demonstrativo. Os testes devem incluir condições extremas. Produção de eletricidade na escala de GWh e operação contínua por pelo menos um ano. Escala Guia: 1:1 – 1:2 (Demonstrados Pré Comercial)
9	Prova do sistema atual através de missão operacional bem-sucedida	Produção/Operação em Escala Comercial; Unidade comercial final desenvolvida comercialmente quando a tecnologia está pronta para ser produzida em massa e foi posta a prova operando por vários anos. Escala de projeto de parques. Escala Guia: 1:1 (Escala Real)

Fonte: Adaptado de SI Ocean (2013, p. 12).

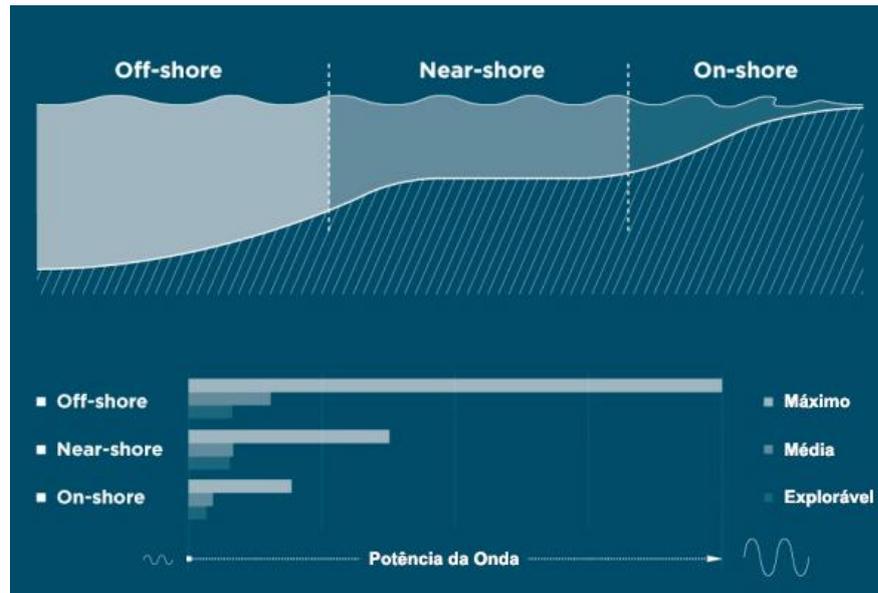
3.3 CLASSIFICAÇÃO DOS WEC

Tradicionalmente a classificação dos conversores ondomotriz se dá de duas formas: com relação ao local de instalação do conversor; e com relação aos princípios técnicos utilizados para extrair a energia das ondas.

3.3.1 Classificação quanto à Localização

A maneira mais simplificada de se classificar os conversores é com relação à profundidade do local em que ele é instalado. Essa classificação se dá em três categorias: dispositivos costeiros (ou *onshore*); dispositivos próximos à costa (ou *nearshore*); e dispositivos em alto-mar (ou *offshore*). A Figura 9 apresenta um esquema da localização de cada uma dessas zonas e a potência da onda inerente a elas. Fica evidente por ela, que quanto mais afastado da costa, mais energético se torna o mar.

Figura 9 - Regiões do mar em relação a profundidade



Fonte: Adaptado de WaveRoller (2012).

3.3.1.1 Dispositivos Costeiros

Esse tipo de equipamento é instalado fixo à costa, ou incorporado a ela, o que facilita tanto a instalação quanto a manutenção. Além disso, por já estar na costa, não são necessários gastos com ancoragem ao fundo marinho, nem longos cabos elétricos submarinos. Porém, devido ao atrito da onda com o fundo oceânico, o regime de ondas é menos energético. Esse fato pode ser compensado instalando-se o dispositivo em locais com características naturais que concentrem a energia (CLÉMENT *et al.*, 2002, p. 408)

Apesar do regime de ondas fraco gerar uma concentração de energia menor, o que é desfavorável para a produção de energia elétrica, esse mesmo fato é favorável do ponto de vista mecânico, uma vez que o equipamento estará sujeito a condições climáticas menos extremas. Além disso, a proximidade com a rede elétrica e a facilidade de manutenção são vantagens da instalação dos WEC próximos à costa (DREW, PLUMMER e SAHINKAYA, 2009, p. 888).

Outros fatores que podem atuar como limitadores para a utilização de um WEC em determinado local são: a geologia e a geometria da linha costeira, a variação da maré, as áreas de proteção ambiental, etc. A soma desses fatores implica em dispositivos que são únicos para cada local, tornando quase impossível a produção em massa (DREW, PLUMMER e SAHINKAYA, 2009, p. 888).

3.3.1.2 Dispositivos Próximos à Costa

Estes dispositivos são instalados em profundidades moderadas que variam entre 20 e 25 m e podem se estender a até 500 km de distância em relação à costa. Normalmente os WEC instalados a essa profundidade são presos diretamente no fundo marinho, o que proporciona uma base estacionária contra a qual um dispositivo oscilante pode atuar (DREW, PLUMMER e SAHINKAYA, 2009, p. 888).

Assim como os dispositivos instalados na costa, estes sofrem da diminuição de energia que a onda enfrenta quando se aproxima do litoral, o que limita a capacidade de produção do dispositivo. Entretanto, a perda é um pouco menor do que a sentida pelos dispositivos *onshore*. Outra semelhança entre esses dois tipos é a facilidade de manutenção e instalação (FLEMING, 2012, p. 14).

3.3.1.3 Dispositivos em Alto-Mar

A classificação dos dispositivos ondomotriz nessa categoria dá-se quando eles estão instalados a uma profundidade maior que 25 m (FLEMING, 2012, p. 14). A grande vantagem da instalação offshore diz respeito ao montante de energia que atinge o dispositivo. A essa profundidade o efeito do fundo marinho na onda é anulado ou minimizado, assim, muito mais energia está disponível na onda nessa região (DREW, PLUMMER e SAHINKAYA, 2009, p. 888).

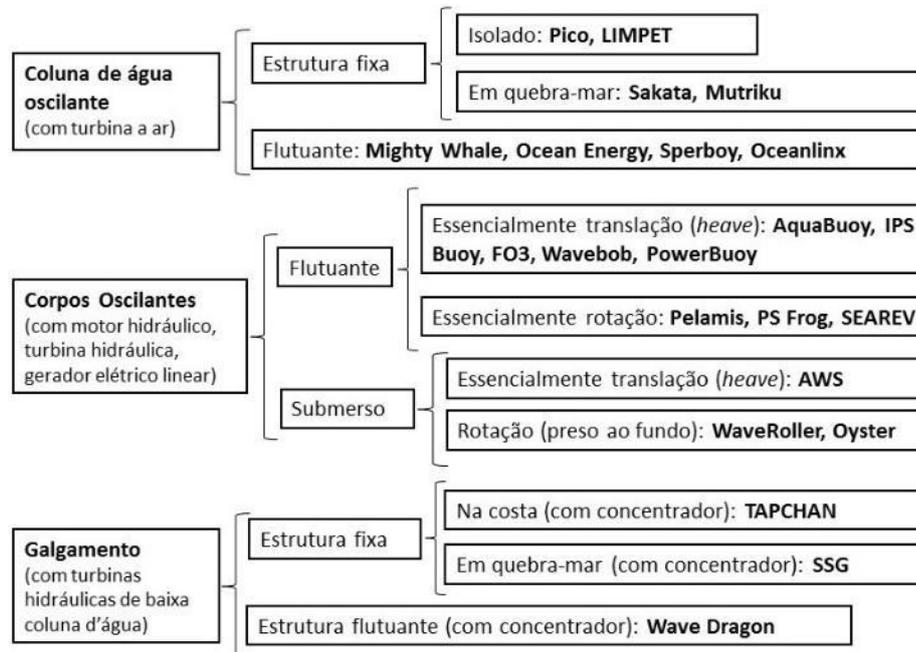
Apesar da maior quantidade de energia presente na onda, a distância em relação à costa significa uma maior dificuldade tanto para a instalação dos dispositivos, quanto para sua manutenção. Além disso, a maior energia e as ondas de maiores amplitudes exigem que os projetos sejam mais robustos, capazes de suportar eventos extremos, o que torna o projeto em si mais caro (DREW, PLUMMER e SAHINKAYA, 2009, p. 888).

3.3.2 Classificação quanto aos Princípios de Conversão

Existem diversas formas de se classificar os dispositivos de conversão ondomotriz em relação aos princípios de conversão. Falcão (2010) descreve três princípios que seriam capazes

de englobar todos os dispositivos já projetados: coluna de água oscilante; corpos oscilantes; e galgamento. A Figura 10 sintetiza essa classificação.

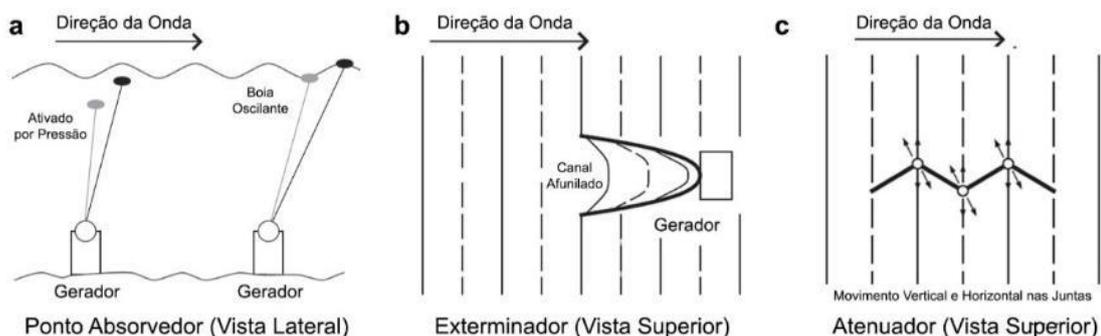
Figura 10 - Exemplo de classificação dos dispositivos de conversão ondomotriz



Em negrito estão listados alguns exemplos de WEC para cada classificação. Fonte: Adaptado de Falcão (2010, p. 904).

Drew, Plummer e Sahinkaya (2009, p. 889), por sua vez, distinguem os WEC em três tipos básicos (atenuador, ponto absorvedor e exterminador) e quatro princípios de operação (pressão diferencial submersa, oscilante de translação das ondas, coluna de água oscilante, galgamento) que abarcariam todos os dispositivos. O atenuador seria um dispositivo montado paralelo à direção predominante da onda. O ponto absorvedor seria um dispositivo de dimensões pequenas em relação a onda incidente, de forma que a direção da onda não teria influência na produção. E o exterminador teria seu eixo principal paralelo à frente da onda. A Figura 11 sintetiza o posicionamento dos três tipos básicos em relação às ondas.

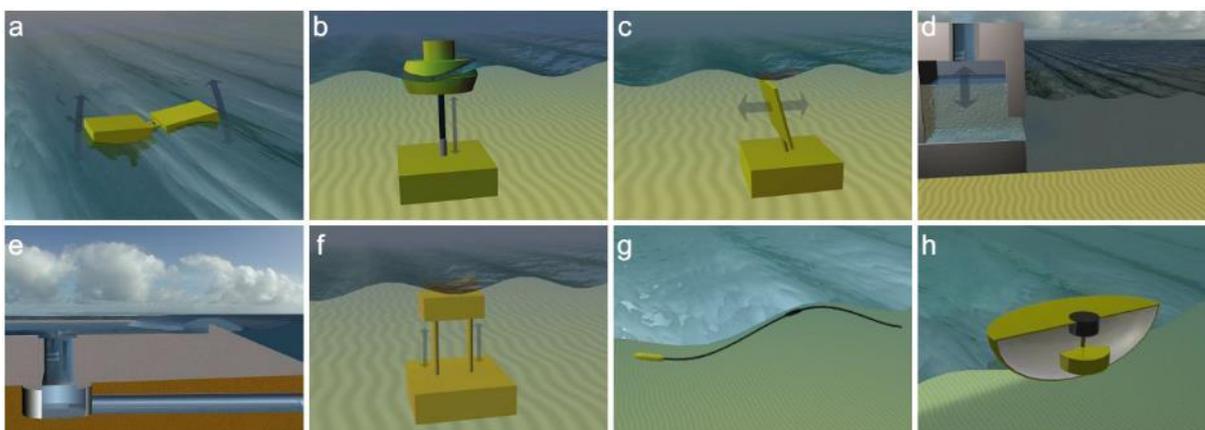
Figura 11 - WEC atenuador, ponto absorvedor e exterminador



Fonte: Adaptado de Behrens *et al.* (2012, p. 211).

Uma classificação mais completa é dada pelo SI OCEAN (2013, p. 15) que divide os tipos de WEC em 8 categorias: atenuador; ponto absorvedor; oscilante de translação das ondas; coluna de água oscilante; galgamento (ou exterminador); pressão diferencial submersa; onda arqueante; e massa rotativa. O SI OCEAN (*The Strategic Initiative for Ocean Energy*) foi um projeto de dois anos (2012-2014) fundado pelo *Intelligent Energy Europe Programme* com o objetivo de desenvolver uma estratégia comum entre os países europeus para garantir uma capacidade instalada máxima de energia ondomotriz e maremotriz até 2020, proporcionando os meios para um crescimento exponencial do mercado entre os anos de 2030 e 2050. A Figura 12 apresenta uma representação dos WEC para cada uma das categorias.

Figura 12 - Tipos de WEC



Representação esquemática da classificação dos WEC proposta pelo SI Ocean: (a) Atenuador; (b) Absorvedor pontual; (c) Oscilante de translação das ondas; (d) Coluna de água oscilante; (e) Galgamento; (f) Pressão diferencial submersa; (g) Onda arqueante; (h) Massa rotativa. Fonte: Adaptado de SI Ocean (2013).

Neste trabalho será adotada a classificação proposta pelo SI Ocean. Porém, como os dispositivos do tipo onda arqueante e massa rotativa são menos usuais, somente os seis primeiros tipos serão abordados mais profundamente.

3.3.2.1 Atenuador

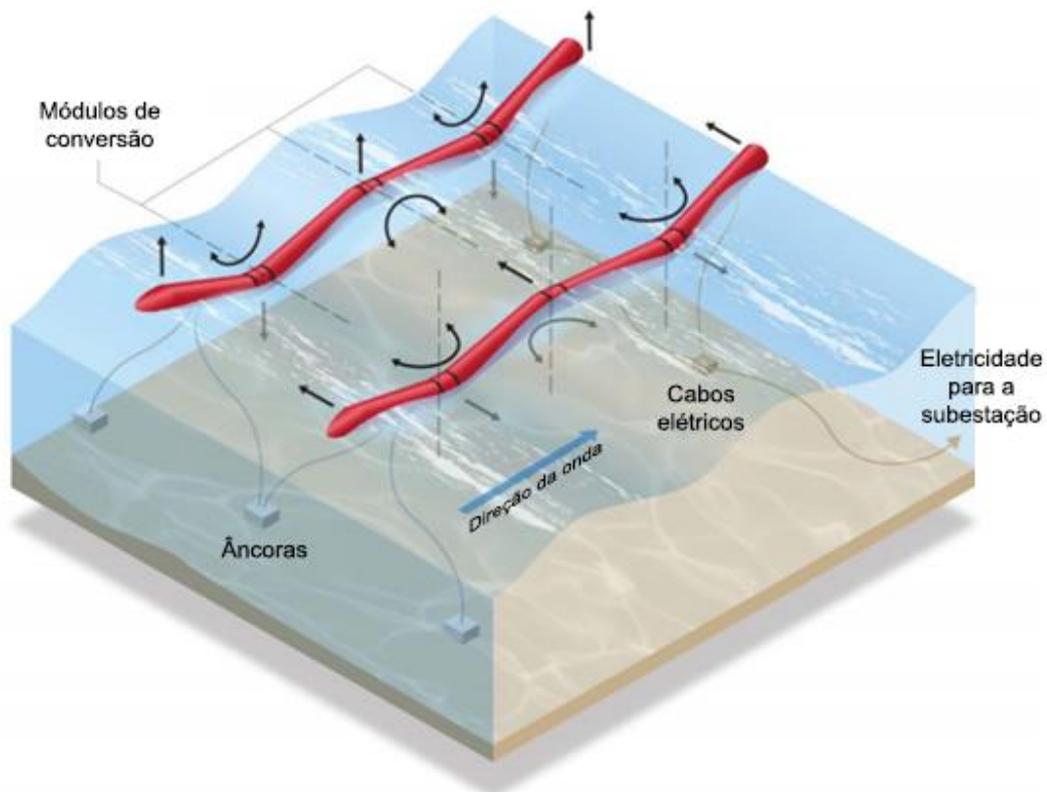
Os conversores do tipo atenuador (Figura 12a) usam a energia das ondas incidentes para induzir um movimento oscilatório entre dois (ou mais) componentes estruturais adjacentes. Esse movimento induzido pode ser aproveitado por pistões hidráulicos que bombeiam um fluido à alta pressão através de um motor, ou ainda por um sistema de conversão de acionamento direto. Os WEC atenuadores podem ser flutuantes ou completamente submerso, sendo que o

primeiro caso é o mais comum. Os atenuadores tendem a se alinhar com a direção predominante da onda (SI OCEAN, 2013, p. 15).

3.3.2.1.1 Pelamis

O projeto Pelamis, em Portugal, é um exemplo de conversor do tipo atenuador. Ele é um grande dispositivo em formato de “cobra” com vários cilindros articulados entre si, como mostra a Figura 13. Esses cilindros tem um diâmetro de 3,5 metros e são feitos de 700 toneladas de aço-carbono. O movimento nas articulações entre os cilindros faz com que os êmbolos presentes sejam comprimidos e tracionados. Estes êmbolos pressurizam um fluido que passa por um motor hidráulico acoplado a um gerador elétrico produzindo eletricidade. O dispositivo apresenta 140 m de comprimento, uma potência nominal de 750 kW e uma produção total anual estimada de 2,2 GWh (LAGOUN, BENALIA e BENBOUZID, 2010, p. 637). Em 2013, o NPT dele era 7, de acordo com o SI Ocean (2013, p. 21)

Figura 13 - Pelamis P750



Fonte: Adaptado de Li e Yu (2012, p. 4353).

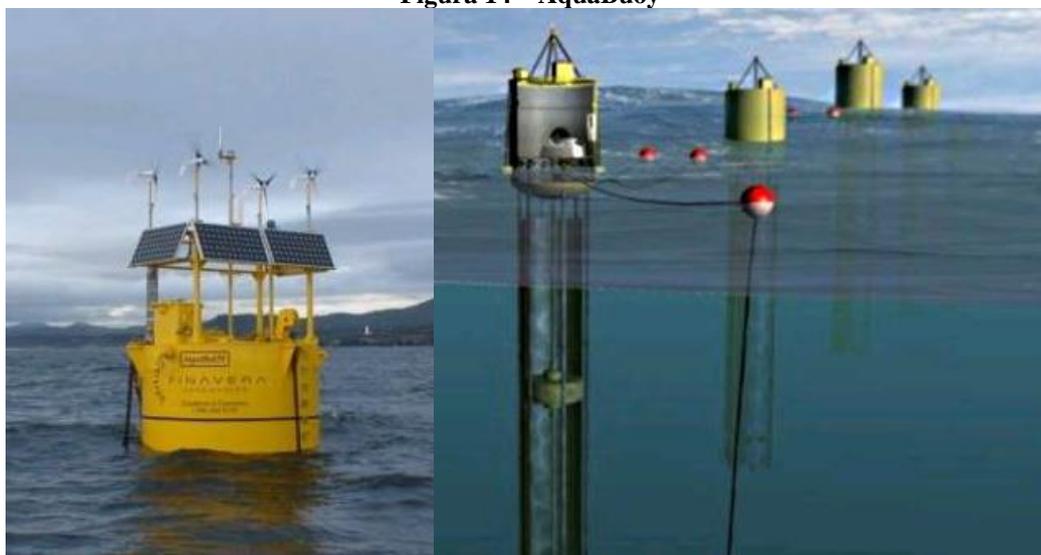
3.3.2.2 Absorvedor Pontual

Também chamados de boias (Figura 12b), são dispositivos pequenos quando comparados aos demais conversores. Apresentam geralmente formato cilíndrico, o que pode variar de acordo com o fabricante. Esse tipo de WEC usa o empuxo para induzir um movimento vertical de um corpo em relação a um outro corpo fixo. Eles podem ser fixos ao fundo do mar, ou, ancorados por meio de cabos. Devido ao fato de apresentarem diâmetro consideravelmente menor que o comprimento de onda que passará por eles são capazes de captar energia de todas as direções (LAGOUN, BENALIA e BENBOUZID, 2010, p. 638).

3.3.2.2.1 *AquaBuoy*

Um exemplo de dispositivo que se enquadra nessa categoria é o projeto AquaBuoy, mostrado na Figura 14. Ele consiste de uma boia circular fixa por uma amarração flexível que permite o seu movimento vertical. Abaixo da boia existe um longo tubo vertical designado por tubo de aceleração que fica preenchido com água. A partir do movimento relativo entre a boia e a massa de água amortecedora que preenche o tubo de aceleração, parte dessa água é transferida para um subsistema de conversão localizado no corpo do flutuador. Esse fluido pressurizado é então utilizado para acionar uma turbina hidráulica do tipo Pelton (WAVE ENERGY CENTRE, 2004).

Figura 14 – AquaBuoy

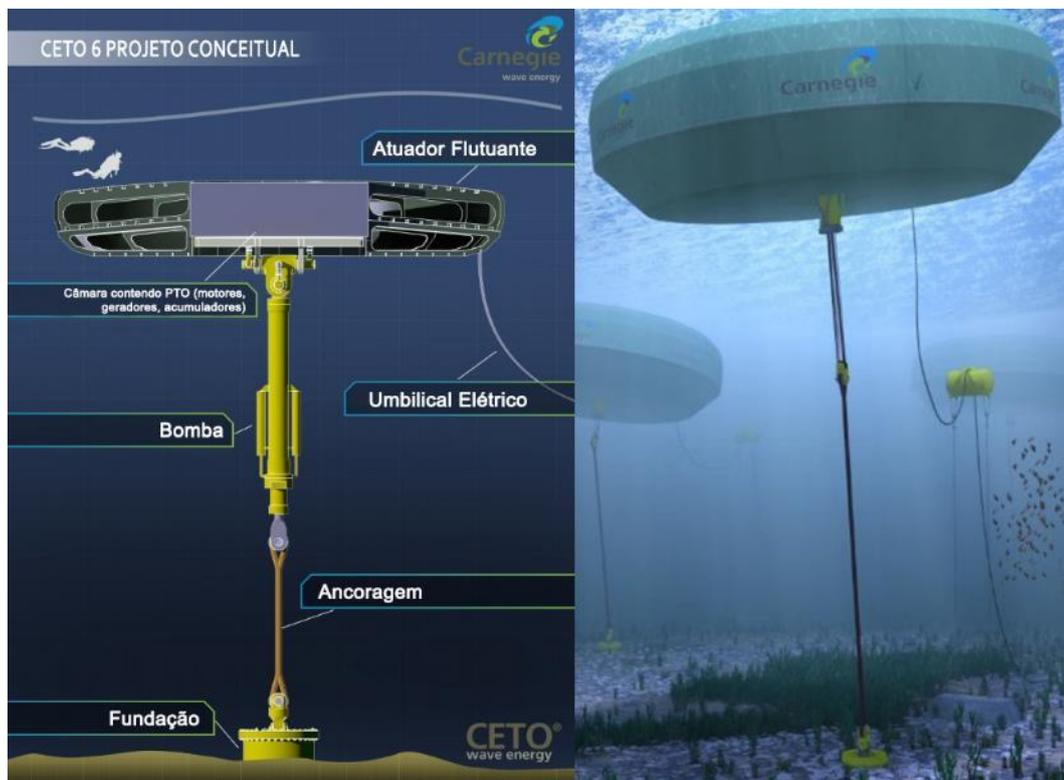


Fonte: Adaptado de Chapa (2007).

3.3.2.2.2 CETO

Outro exemplo de WEC desse tipo é o projeto Ceto, mostrado na Figura 15, desenvolvido pela companhia australiana Carnegie Wave Energy. Nele, uma boia submersa está conectada a uma bomba ancorada no fundo oceânico. A medida que uma onda passa acima do dispositivo, a boia apresenta um movimento vertical para cima e exerce tensão na amarra, forçando o pistão dentro da bomba a se mover para cima, expelindo fluido a alta pressão. Esse fluido a alta pressão, normalmente água, é então conduzido à costa e armazenado para ser depois utilizado no acionamento de uma turbina para produção de eletricidade, ou para a produção de água dessalinizada, ou ainda, uma combinação de ambos (MANN, 2011, p. 721).

Figura 15 - CETO



Fonte: Adaptado de Sawyer (2015).

3.3.2.3 Oscilante de Translação das Ondas

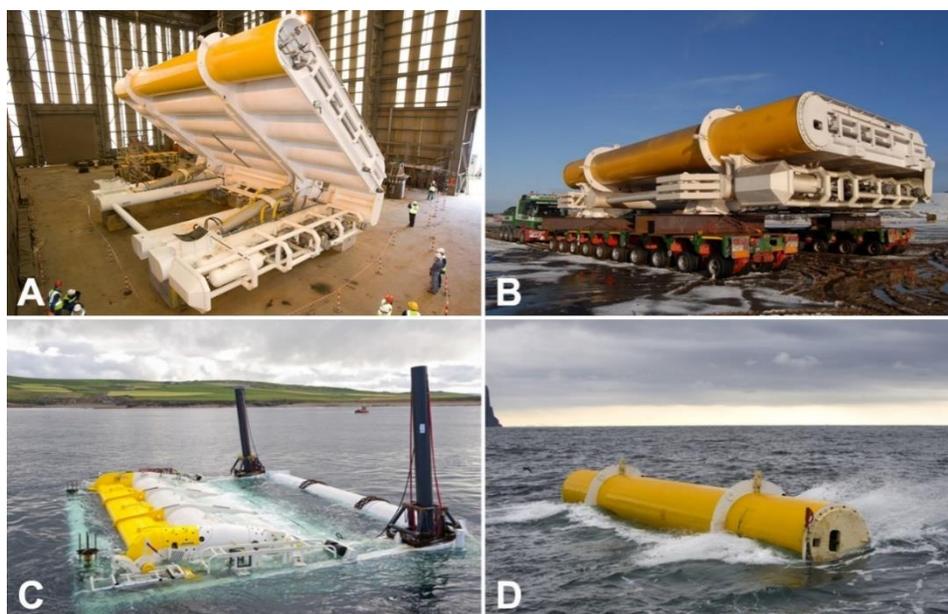
Esse tipo de dispositivo (Figura 12c) utiliza o movimento horizontal das ondas para induzir um movimento de oscilação em um corpo na mesma direção. Devido a essa característica, esse tipo de WEC costuma ser instalado na região próxima à costa onde o

movimento das partículas de água das ondas apresentam formato mais elipsoide (SI OCEAN, 2013, p. 15).

3.3.2.3.1 *Oyster*

Um exemplo de dispositivo projetado para operar nessas condições é o Oyster 800 da empresa Aquamarine Power, mostrado na Figura 16. Essencialmente o Oyster 800 é um flutuador com formato de placa preso ao fundo do mar, quase que completamente submerso e a uma profundidade entre 10 e 15 m e posicionado a meio quilômetro de distância da costa. Ele funciona como uma bomba movida à onda que pressuriza um fluido de trabalho (no caso água) por meio de dois pistões a partir do movimento oscilatório da placa induzido pela onda. Esse fluido pressurizado é utilizado para impulsionar uma turbina hidroelétrica instalada na costa (AQUAMARINE POWER, 2011).

Figura 16 - Oyster 800, Órcades, Escócia



Construção (A), transporte (B), instalação (C) e operação (D) do Oyster 800. Fonte: Adaptado de Aquamarine Power (2011).

3.3.2.4 Coluna de água oscilante

É um dispositivo parcialmente submerso (Figura 12d), onde existe uma abertura para que uma coluna de água seja movimentada pelas ondas. Quando essa coluna sobe, o ar dentro

da câmara é forçado a sair por uma abertura na parte superior, onde está instalada uma turbina. Esse ar pressurizado é ejetado da câmara, fazendo a turbina girar e produzir energia mecânica. Quando a coluna de água baixa após a passagem da onda, a diferença de pressão existente irá fazer com que o ar seja succionado de volta para a câmara e possa ser utilizado pela turbina novamente para extração de energia (LAGOUN, BENALIA e BENBOUZID, 2010, p. 639).

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

3.3.2.4.1 LIMPET

Um exemplo desse tipo de dispositivo é a Islay LIMPET, a primeira central de produção de eletricidade a partir da energia das ondas a entrar em serviço comercial em 2000, mostrada na Figura 17. Está situada na ilha de Islay, nas Hébridas, e fornece energia à rede elétrica do Reino Unido. A capacidade da Islay LIMPET é de 500 kW, tendo atingido disponibilidade de 98% em 2010 (RENEWABLE ENERGY FOCUS, 2010).

Figura 17 - Islay LIMPET, Reino Unido



Vistas frontal (A) e traseira (B) do Islay LIMPET. Fonte: Hitz (2010) e Whittaker *et al.* (2002, p. 40), respectivamente.

3.3.2.5 Galgamento

Nesse dispositivo (Figura 12e), as ondas se movem em direção a uma rampa inclinada, galgando-a devido à energia cinética e se acumulando em um reservatório. Quando quantidade suficiente de água é acumulada, é liberada a vazão dela de volta para o oceano. A água escoo pela ação da gravidade e passa por turbinas. Assim como numa hidrelétrica, a energia potencial acumulada será transformada em energia mecânica pelas turbinas. A borda com angulação para acumulo de água deve estar sempre direcionada de encontro ao movimento das ondas (LAGOUN, BENALIA e BENBOUZID, 2010, p. 640).

3.3.2.5.1 Wave Dragon

Como exemplo de dispositivo de galgamento pode-se citar o Wave Dragon, um WEC flutuante que consiste de dois braços parabólicos refletores, uma rampa de dupla curvatura, um compartimento para armazenagem da água e múltiplas turbinas, conforme pode ser observado na Figura 18.

Figura 18 - Wave Dragon



Fonte: Adaptado de Lagoun, Benalia e Benbouzid (2010, p. 640) e Tedd e Kofoed (2009, p. 712).

O Wave Dragon consiste em três componentes principais: dois refletores de onda, cuja função é direcionar as ondas incidentes; a plataforma principal que funciona como um reservatório flutuante; e as hidroturbinas do tipo Kaplan de pequena queda (TEDD e KOFOED, 2009, p. 711).

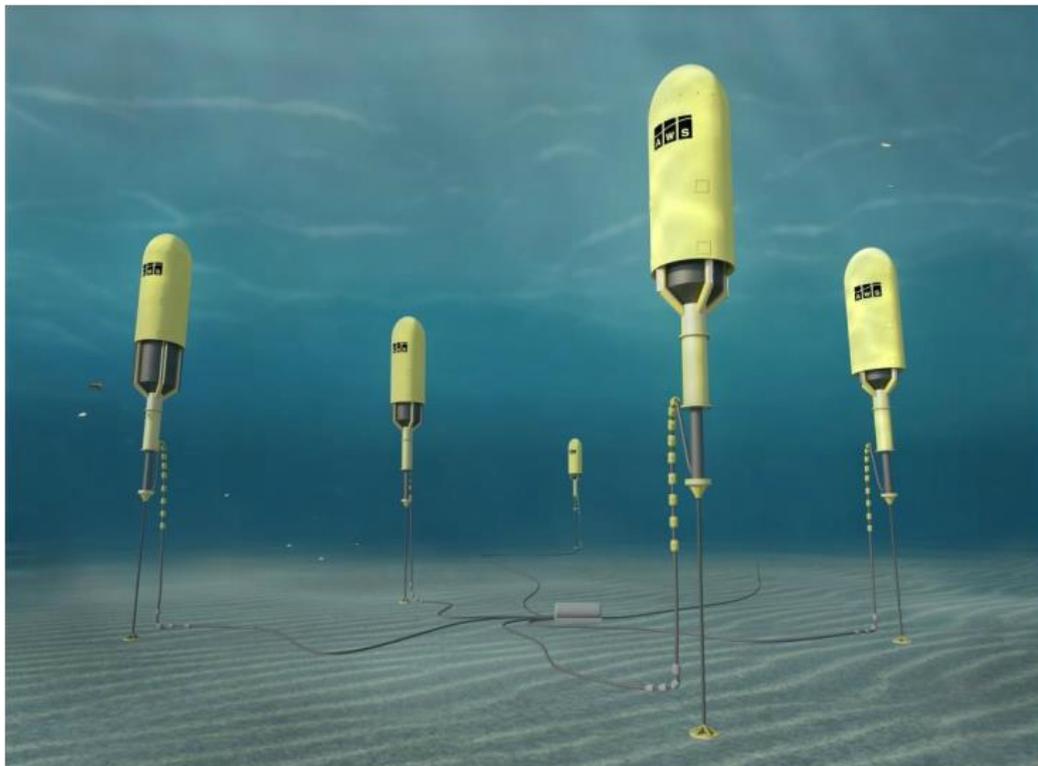
3.3.2.6 Pressão Submersa

Esse tipo de dispositivo (Figura 12f) é, tipicamente, desenvolvido para ser instalado próximo à costa e ancorado ao fundo oceânico. O movimento das ondas provoca o aumento e a diminuição do nível de água acima dos dispositivos, induzindo assim um diferencial de pressão. Essa pressão alternada pode ser utilizada para bombear um fluido através de um sistema para gerar eletricidade (LAGOUN, BENALIA e BENBOUZID, 2010, p. 640).

3.3.2.6.1 AWS

Um exemplo de dispositivo do tipo pressão submersa é o Archimedes Waveswing (AWS), mostrado na Figura 19. Esse dispositivo reage às mudanças de pressão subaquáticas provocadas pela passagem das ondas e converte o movimento resultante em eletricidade por meio de um gerador de acionamento direto. Ele é apropriado para profundidades maiores que 25 m e pode ser dimensionado para potências entre 25 e 250 kW (AWS OCEAN ENERGY LTD., 2016).

Figura 19 - Archimedes Waveswing

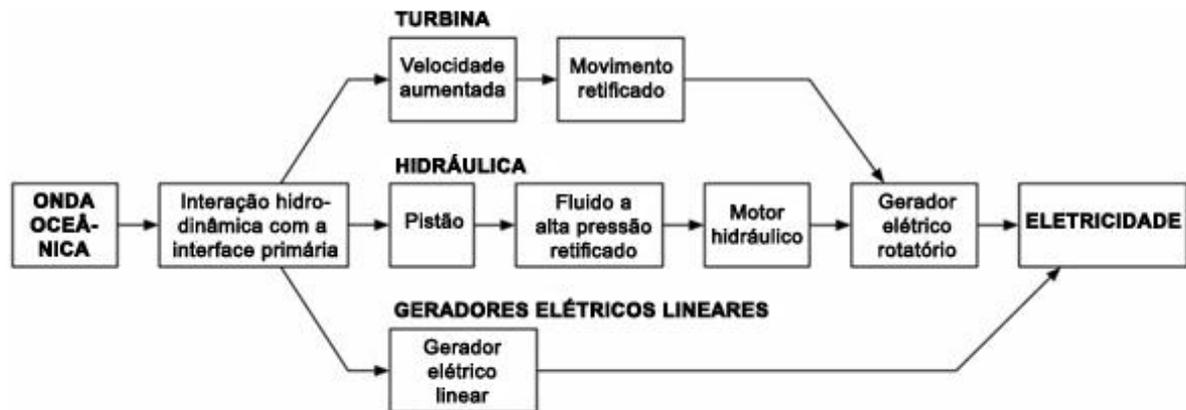


Fonte: AWS Ocean Energy Ltd. (2016).

3.4 MÉTODOS DE CONVERSÃO ELÉTRICA

O método de captura da energia da onda, também chamado de *power take-off* (PTO) pode variar entre os diversos tipos de WEC existentes. Entretanto, a conversão em energia elétrica se dá majoritariamente por meio de geradores elétricos de alta velocidade de rotação. Outra possibilidade são os geradores elétricos lineares, porém em menor escala de utilização (DREW, PLUMMER e SAHINKAYA, 2009, p. 892 *apud* MUELLER, 2002). A Figura 20 apresenta os principais métodos de conversão elétrica.

Figura 20 - Métodos de conversão elétrica



Fonte: Adaptado de Drew, Plummer e Sahinkaya (2009, p. 893).

Os maiores desafios encontrados pelos WEC estão relacionados ao acionamento dos geradores, uma vez que o movimento de alguns dos diversos tipos de WEC não são compatíveis com às máquinas elétrica rotativas convencionais (DREW, PLUMMER e SAHINKAYA, 2009, p. 892), e ao fato das ondas apresentarem uma frequência muito inferior à necessária para o acionamento desses equipamentos (CLÉMENT *et al.*, 2002, p. 408)

A Tabela 2 sintetiza os sistemas de conversão e geração elétrica para alguns WEC (LAGOUN, BENALIA e BENBOUZID, 2010).

Tabela 2 - Sistemas de conversão e geração

Dispositivo	PTO	Gerador	Velocidade
Pelamis	Atenuador/Hidráulico	Indução	Constante
Searev	Ponto Absorvedor	PMSG ¹	Variável
Oyster	Oscilante de Translação das Ondas	Indução	Variável
Limpet	OWC e turbina Wells	Indução	Variável
Oceanlinx	OWC e turbina Denniss-Auld	Indução	Variável
Pico	OWC e turbinas Wells com palhetas guias	DFIG ²	Variável
Wave Dragon	Galgamento e turbina Kaplan	PMSG ¹	Variável
AWS	Acionamento Direto	LPMG ³	Variável

(1) Permanent Magnet Synchronous Generator; (2) Doubly-Fed Induction Generator; (3) Linear Permanent Magnet Generator

Fonte: Adaptado de Lagoun, Benalia e Benbouzid (2010, p. 641).

3.5 PARÂMETROS DE DESEMPENHO

Para se realizar a comparação entre diferentes WEC, é necessária a utilização de parâmetros capazes de medir o desempenho de cada um deles. São exemplos de parâmetros de desempenhos dos WEC: comprimento de captura, razão do comprimento de captura, fator de capacidade e potência elétrica normalizada.

3.5.1 Comprimento de Captura

De acordo com Babarit (2015, p. 610), o comprimento de captura (CW) foi introduzido pela primeira vez por Falnes (1975), e é definido como sendo a razão entre a potência absorvida da onda, P_{abs} (em kW), e a potência ondomotriz, P (em kW/m). A Equação 27 define o parâmetro.

$$CW = \frac{P_{abs}}{P} \quad (27)$$

Ele pode ser interpretado como sendo o comprimento da crista da onda que foi completamente capturado e absorvido pelo WEC (BABARIT, 2015, p. 611).

3.5.2 Razão do Comprimento de Captura

A razão de comprimento de captura (CWR) é uma medida do desempenho hidrodinâmico do WEC, que reflete a fração da potência da onda passando por ele que é absorvida. Ela pode ser calculada a partir da razão entre o comprimento de captura e uma dimensão característica, D , do conversor, como mostra a Equação 28 (BABARIT, 2015, p. 611).

$$CWR = \frac{CW}{D} = \frac{P_{abs}}{P \cdot D} \quad (28)$$

De uma maneira geral, a dimensão D utilizada para determinar CWR é o comprimento ativo do WEC. A exceção são os WEC que apresentam essencialmente translação vertical,

basicamente os do tipo absorvedor pontual e do tipo pressão diferencial submersa. Para esses casos, o comprimento característico será dado pela Equação 29 (BABARIT, 2015, p. 615-616).

$$D = \sqrt{\frac{4A_w}{\pi}} \quad (29)$$

onde A_w é a área máxima da seção transversal horizontal do dispositivo. Para cilindros verticais ou para hemisférios flutuantes, A_w é simplesmente igual ao diâmetro.

3.5.3 Fator de Capacidade

O fator de capacidade (C_f) é a razão entre a potência elétrica produzida por um WEC em um local específico, P_e , e a sua potência nominal, P_n (RUSU e ONEA, 2016, p. 701). A Equação 30 define esse parâmetro.

$$C_f = \frac{P_e}{P_n} \quad (30)$$

3.5.4 Potência Elétrica Normalizada

A potência elétrica normalizada, P_{en} , é a razão entre a potência elétrica produzida esperada, P_E , e a máxima potência elétrica produzida esperada correspondente ao mesmo WEC, mas entre todos os locais analisados e ao longo de todo o tempo analisado, $P_{e,MAX}$ (RUSU e ONEA, 2016, p. 696). Esse parâmetro pode ser determinado pela Equação 31.

$$P_{en} = \frac{P_e}{P_{e,MAX}} \quad (31)$$

3.6 IMPACTOS AMBIENTAIS

De acordo com Clément *et al.* (2002, p. 408), a energia das ondas é uma fonte que não envolve grandes emissões de CO₂, e que apresenta um impacto ambiental negativo limitado.

Entretanto, ainda de acordo com Clément *et al.* (2002, p. 408), a experiência limitada de utilização dessa fonte não permite uma imagem completa de todos os possíveis impactos ambientais que os WEC podem provocar. A Tabela 3 apresenta uma tentativa de sintetizar e qualificar o efeito dos possíveis impactos ambientais dessa tecnologia.

Tabela 3 - Impacto ambiental dos dispositivos de conversão ondomotriz

Efeito ambientais	Costeiro	Próximo à costa	Offshore
Uso da terra/esterilização	F	-	-
Construção/manutenção de sítios	F	-	-
Recreação	F	F	-
Erosão costeira	F	F-M	F-M
Padrão de fluxo sedimentar	-	F	F
Perigo à navegação	-	F	F
Peixes e biota marinho	F	F	F
Poluição acústica	F	-	-
Perdas de fluido de trabalho	-	F	F
Espécies ameaçadas de extinção	F	F	-
Danos provocados pelo dispositivo/ancoragem	-	F-M	F-M

F: Efeito fraco; M: Efeito mediano

Fonte: Adaptado de Clément *et al.* (2002, p. 409).

3.7 ASPECTOS ECONÔMICOS

Uma vez que praticamente todos os WEC pesquisados encontram-se em estágios de desenvolvimentos, informações completas dos custos de instalação ainda se encontram indisponíveis. Entretanto, algumas informações podem ser obtidas da literatura. Souza (2011 *apud* CALLAGHAN e BOUD, 2006), por exemplo, divide os custos de capital em: estrutura (27%), material mecânico elétrico (49%), instalação (13%), ancoragem (5%), conexão à rede (4%) e gerenciamento de projeto (2%). Além disso, apresenta alguns valores (em dólares canadenses referentes à 2006) para três WEC: Pelamis, Wave Dragon e AquaBuoy. Para cada um desses dispositivo, considerando um parque de 25 GW instalados, o custo de capital seria, respectivamente, de \$ 4155/kW, \$ 2803/kW e \$935/kW.

Com relação aos custos de operação e manutenção (O&M), Souza (2011) utiliza uma analogia com parques eólicos offshore para estimar como ele se divide. Dessa forma, a manutenção planejada seria responsável por 29% dos custos, a manutenção não-planejada por 28%, seguros por 14%, concertos por 24%, licenças por 1% e monitoramento por 4%. Além disso, ele estima os valores de O&M para os mesmos três dispositivos em \$0,047/kWh (Pelamis), \$ 0,020/kWk (Wave Dragon), e \$ 0,069/kWh (AquaBuoy).

3.7.1 Custo Normalizado de Energia

O custo normalizado de energia (LCOE) é uma avaliação econômica dos custos de um sistema de geração de energia ao longo da sua vida útil, que possibilita a comparação entre alternativas que envolvem diferentes montantes de capital (GARCIA, 2013, p. 28).

De acordo com Behrens *et al.* (2012, p. 214), o LCOE para a produção de energia de um WEC pode ser determinado pela Equação 32.

$$LCOE = O\&M + KC + TC \quad (32)$$

onde $O\&M$ representa o custo de operação e manutenção, KC representa o custo de capital e TC representa o custo de transmissão e distribuição.

Ainda de acordo com Behrens *et al.* (2012, p. 214), o componente de capital do custo de produção por unidade de energia produzida é determinado, a partir do custo de capital por unidade da capacidade de produção nominal, pela aplicação de um coeficiente de anuidade. Assim, o custo de capital pode ser determinado pela Equação 33.

$$KC = kc \times \frac{r(1+r)^{L_t}}{(1+r)^{L_t} - 1} \times \frac{1000}{8760.C_f} \quad (33)$$

onde L_t é o tempo de vida útil do WEC, r é a taxa de desconto e C_f é o fator de capacidade, que depende do local e do tipo de WEC escolhido.

4 ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO

Análise de Decisão Multicritério (*Multi-Criteria Decision Analysis – MCDA*) é uma abordagem que utiliza conceitos da matemática, do gerenciamento, da informática, da psicologia, das ciências sociais e da economia, visando resolver qualquer problema onde uma decisão significativa precisa ser tomada. Essas decisões podem ser de ordem tática ou estratégica, dependendo apenas da perspectiva temporal das suas consequências (ISHIZAKA e NEMERY, 2013, p. 2). Além disso, ela tem a capacidade de lidar com critérios tanto qualitativos, quanto quantitativos, e analisar conflitos em relação aos critérios e aos tomadores de decisão (TAHA e DAIM, 2013, p. 18).

As decisões que uma pessoa, ou uma empresa, estão sujeitas a terem que tomar diariamente foram classificadas por Roy (1981) em quatro tipos distintos:

- I. Problema de escolha (*choice problem*): Nesse tipo de decisão, o objetivo é selecionar a melhor opção ou reduzir o grupo de opções a um subgrupo de equivalente ou equiparáveis “boas” opções;
- II. Problema de classificação (*sorting problem*): As opções são classificadas em grupos ordenados e predefinidos, chamadas categorias. O objetivo desse tipo de problema é reagrupar as opções com padrões ou características semelhantes por razões descritivas, organizacionais ou preditivas. Baseado nessas classificações, as medidas necessárias podem ser tomadas;
- III. Problema de ordenamento (*ranking problem*): Opções são ordenadas do melhor para o pior por meio de pontuação ou comparações em pares. O ordenamento pode ser parcial se opções incomparáveis forem consideradas, ou completa;
- IV. Problema de descrição (*description problem*): O objetivo desse tipo de decisão é descrever opções e suas consequências. Ela é normalmente realizada como primeiro passo para se entender as características do problema de decisão.

A existência de alguns outros tipos de problemas foi proposta por diferentes autores posteriormente. Bana e Costa (1996), por exemplo, sugeriram a existência do problema de eliminação (*elimination problem*), que seria uma abordagem particular do problema de classificação. Outro exemplo é o problema de projeto (*design problem*), proposto por Keeney

(1992), cujo objetivo é identificar ou criar uma nova ação, a qual vai de encontro as metas e aspirações do tomador de decisão.

4.1 MÉTODOS DE MCDA

Dentro da abordagem MCDA existem diversos métodos, onde nenhum deles é perfeito ou aplicável a todos os problemas. Cada método tem suas próprias limitações, particularidades, hipóteses, premissas e perspectivas (ISHIZAKA e NEMERY, 2013, p. 6). É importante ressaltar ainda que, uma vez que haverá pontos de vista conflitantes entre os tomadores de decisão, a “melhor” opção resultante dos métodos de MCDA será a melhor solução negociada, e não explicitamente a otimizada (TAHA e DAIM, 2013, p. 20). A Tabela 4 apresenta alguns dos mais importantes métodos de MCDA e os tipos de problema a que eles se aplicam.

Tabela 4 - Métodos de MCDA e sua aplicabilidade aos tipos de decisão

MÉTODOS DE MULTI-CRITERIA DECISION ANALYSIS (MCDA)	PROBLEMA			
	ESCOLHA	CLASSIFICAÇÃO	ORDENAMENTO	DESCRIÇÃO
AHP	■	■	■	■
AHPSort	■	■	■	■
ANP	■	■	■	■
MAUT/UTA	■	■	■	■
UTADIS	■	■	■	■
MACBETH	■	■	■	■
PROMETHEE	■	■	■	■
FlowSort	■	■	■	■
GAIA	■	■	■	■
FS-GAIA	■	■	■	■
ELECTRE I	■	■	■	■
ELECTRE III	■	■	■	■
ELECTRE-Tri	■	■	■	■
TOPSIS	■	■	■	■
Programação de metas	■	■	■	■
DEA	■	■	■	■

Fonte: Adaptado de Ishizaka e Nemery (2013, p. 4).

Apesar da grande diversidade de métodos MCDA, de acordo com Ishizaka e Nemery (2013, p. 8-9), pode-se agrupá-los conforme sua abordagem em três grupos: abordagem de

agregação completa (ou escola americana); abordagem de nivelamento superior (ou escola francesa); e abordagem de metas, aspirações ou níveis de referência.

Na abordagem de agregação completa a pontuação é avaliada para cada critério e eles são então sintetizados em pontuações globais. Essa abordagem assume que as pontuações são compensáveis, isto é, uma pontuação ruim em um critério pode ser compensada por uma pontuação boa em outro critério. Exemplos de métodos que possuem essa abordagem são: AHP (*Analytic Hierachy Process*), ANP (*Analytic Network Process*), MAUT (*Multi–Attribute Utility Theory*) e MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*).

Por sua vez, na abordagem de nivelamento superior uma pontuação ruim não pode ser compensada por uma melhor. A ordem das opções deve ser parcial, uma vez que a noção de incomparabilidade é utilizada. Duas opções podem ter a mesma pontuação, mas seus comportamentos podem ser diferentes e incomparáveis. Exemplos de métodos que possuem essa abordagem são: PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enriched Evaluation*) e ELECTRE (*Elimination et Choix Traduisant la Réalité*).

Por fim, na abordagem de metas, aspirações ou níveis de referência, define-se uma meta em cada critério, e então identifica-se a opção mais próxima à meta utilizada ou nível de referência. Exemplos de métodos que possuem essa abordagem são: TOPSIS (*Technique of Order Preference Similarity to the Ideal Solution*), Programação de Metas e DEA (*Data Envelopment Analysis*).

Assim, diante da vasta gama de métodos, a escolha do mais indicado deve seguir alguns princípios. Uma maneira de escolher o método mais indicado é analisar a informação de entrada necessária, ou seja, os dados e parâmetros exigidos e conseqüentemente o esforço do modelo, assim como analisar as saídas e seu refinamento. O esforço do modelo normalmente define a qualidade da saída. As Tabela 5 e Tabela 6 apresentam um panorama dos dados de entrada e saída e do esforço de alguns dos métodos mais utilizados.

De maneira geral os métodos MCDA são estruturados em quatro passos (TAHA e DAIM, 2013, p. 19):

- I. Estruturação do processo de decisão, seleção das alternativas e formulação dos critérios;
- II. Apresentação da relação entre as alternativas e determinação dos pesos dos critérios;
- III. Aplicação de juízo de valor a respeito das relações aceitáveis e avaliação;
- IV. Cálculo final das prioridades e tomada de decisão.

Tabela 5 - Entradas para métodos de MCDA em problemas de escolha e ordenamento

	Entradas	Esforço de entrada	Método de MCDA	Saída
Problemas de escolha e ordenamento	Função de utilidade	Muito ALTO	MAUT	Ranking completo com pontuação
	Comparações aos pares em uma escala de razões e interdependências	↑ ↓	ANP	Ranking completo com pontuação
	Comparações aos pares em uma escala de intervalos		MACBETH	Ranking completo com pontuação
	Comparações aos pares em uma escala de razões		AHP	Ranking completo com pontuação
	Indiferença, preferência e limites de veto		ELECTRE	Ranking parcial e completo (grau de nivelamento por pares)
	Indiferença e limites de preferência		PROMETHEE	Ranking parcial e completo (grau de preferência por pares e pontuação)
	Opção ideal e restrições		Programação de Metas	Solução possível com grau de desvio
	Opções ideal e não ideal		TOPSIS	Ranking completo com pontuação aproximada
	Nenhuma entrada subjetiva necessária		Muito BAIXO	DEA

Fonte: Adaptado de Ishizaka e Nemery (2013, p. 7).

Tabela 6 - Entradas para métodos de MCDA em problemas de classificação

	Entradas	Esforço de entrada	Método de MCDA	Saída
Problemas de classificação	Função de utilidade	Muito ALTO	UTADIS	Classificação com pontuação
	Comparações aos pares em uma escala de razões	↑ ↓	AHPSort	Classificação com pontuação
	Indiferença, preferência e limites de veto		ELECTRE-Tri	Classificação com grau de nivelamento por pares
	Indiferença e limites de preferência		Muito BAIXO	FlowSort

Fonte: Adaptado de Ishizaka e Nemery (2013, p. 8).

4.1.1 AHP

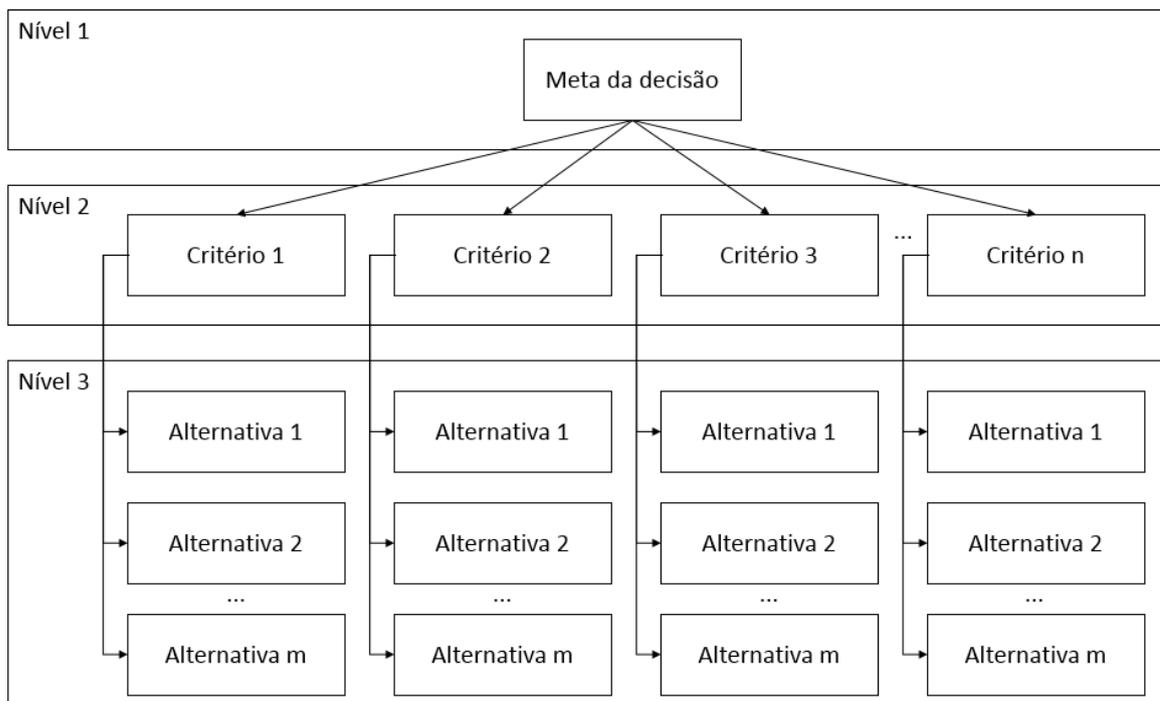
O método AHP, em português Método de Análise Hierárquica, foi desenvolvido por Saaty (1977, 1980), e é o método de multicritério mais utilizado e conhecido no apoio à tomada de decisão (MARINS, SOUZA e BARROS, 2009, p. 1779). Ele usa uma estrutura hierárquica para priorizar critérios através da solução de complexos processos de tomada de decisão (SAATY, 1977), e baseia-se em cálculos matemáticos que dependem de comparações entre pares, a fim de estimar os pesos dos critérios selecionados (LE *et al.*, 2015).

Esse método é baseado em quatro etapas: a estruturação do problema, o cálculo das prioridades, a checagem da consistência e a análise de sensibilidade.

4.1.1.1 Estruturação do Problema

A estruturação do problema ocorre no formato de uma hierarquia, onde o primeiro nível é a meta da decisão, o segundo nível representa os critérios escolhidos e o nível mais baixo representa as alternativas analisadas. Mais níveis podem existir quando se adotam subcritérios. A Figura 21 apresenta representação hierárquica básica utilizada nesse método.

Figura 21 - Representação hierárquica básica



Fonte: Autor.

A hierarquização do problema ajuda o tomador de decisão a compreender de forma global o problema e a relação de complexidade. Dessa forma, a avaliação da dimensão e conteúdo dos critérios através da comparação é facilitada (MARINS, SOUZA e BARROS, 2009, p. 1779). Além disso, uma vez que diferentes estruturas podem levar a resultados finais diferentes, a hierarquização dos elementos é de suma importância (ISHIZAKA e NEMERY, 2013, p. 27).

Com relação a utilização de subcritérios, alguns autores como Stillwell, von Winterfeldt e John (1987), Weber *et al.* (1988) e Pöyhöne, Hämäläinen e Salo (1997), observaram que critérios com um número grande de subcritérios tendem a receber maior peso que aqueles que são menos detalhados. A estruturação do problema, normalmente, passa por um processo de brainstorming, onde cada nível é priorizado em relação ao nível imediatamente superior.

Uma vez definida a estrutura hierárquica do problema, é determinada a prioridade de cada critério, tanto em relação aos outros, quanto em relação ao conjunto como um todo.

4.1.1.2 Cálculo da Prioridade dos Critérios e da Prioridade Local das Alternativas

Prioridade é uma pontuação que ranqueia a importância das alternativas ou critérios em relação à decisão a ser tomada (ISHIZAKA e NEMERY, 2013, p. 16). Nesse método, três tipos de prioridades devem ser calculados: a prioridade local das alternativas, a prioridade dos critérios e a prioridade global das alternativas.

A prioridade local das alternativas diz respeito a importância de cada uma delas em relação a um critério específico. A prioridade dos critérios é a importância de cada um deles em relação ao objetivo global. E a prioridade global das alternativas ranqueia as alternativas em relação a todos os critérios e, conseqüentemente, em relação à meta global (ISHIZAKA e NEMERY, 2013, p. 16).

No método AHP, tanto a prioridade local, quanto a prioridade dos critérios, são calculadas da mesma forma, utilizando-se uma comparação aos pares, a partir de uma escala. A escala mais utilizada é a desenvolvida por Saaty (1986), com variação de 1 a 9, e é apresentada com suas devidas definições na Tabela 7.

Tabela 7 - Escala numérica de Saaty

Escala Numérica	Escala Verbal	Explicação
1	Ambos elementos são de igual importância.	Ambos elementos contribuem com a propriedade de igual forma.
2	Valor intermediário entre as opiniões adjacentes.	Usado como valor de consenso entre as opiniões adjacentes.
3	Moderada importância de um elemento sobre o outro.	A experiência e a opinião favorecem um elemento sobre o outro.
4	Valor intermediário entre as opiniões adjacentes.	Usado como valor de consenso entre as opiniões adjacentes.
5	Forte importância de um elemento sobre o outro.	Um elemento é fortemente favorecido.
6	Valor intermediário entre as opiniões adjacentes.	Usado como valor de consenso entre as opiniões adjacentes.
7	Importância muito forte de um elemento sobre o outro.	Um elemento é muito fortemente favorecido sobre o outro.
8	Valor intermediário entre as opiniões adjacentes.	Usado como valor de consenso entre as opiniões adjacentes.
9	Extrema importância de um elemento sobre o outro.	Um elemento é favorecido pelo menos com uma ordem de magnitude de diferença.

Fonte: Adaptado de Marins, Souza e Barros (2009, p. 1780).

Assim, das análises aos pares realizadas é gerada uma matriz de comparação **A**, apresentada na Equação 34. Para cada critério deve ser construída uma matriz, a fim de se obter as prioridades locais, e deve-se também construir uma matriz com os critérios, a fim de se obter as prioridades destes. A quantidade de análises realizadas para cada matriz é $(n^2 - n)/2$, onde n é a quantidade de alternativas/critérios da hierarquia (ISHIZAKA e NEMERY, 2013, p. 17).

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} p_1/p_1 & \cdots & p_1/p_j & \cdots & p_1/p_n \\ \cdots & 1 & \cdots & \cdots & \cdots \\ p_i/p_1 & \cdots & 1 & \cdots & p_i/p_n \\ \cdots & \cdots & \cdots & 1 & \cdots \\ p_n/p_1 & \cdots & p_n/p_j & \cdots & p_n/p_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ \cdots & 1 & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{i1} & \cdots & 1 & \cdots & a_{in} \\ \cdots & \cdots & \cdots & 1 & \cdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nj} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (34)$$

onde p_i é a prioridade da alternativa i , e $p_i/p_j = a_{ij}$ é a comparação entre as alternativas i e j .

Para se determinar a prioridade a partir das comparações aos pares, vários métodos formam propostos, como por exemplo Lin (2007) e Cho e Wedley (2004). Porém, os mais utilizados são: o Método da Aproximação, o Método do Autovalor e o Método da Média Geométrica.

Dentre os três, o método da aproximação é o mais simples, e só utiliza somatórios e cálculos de médias para determinar o peso dos critérios. O método do autovalor, além de calcular o peso dos critérios, determina o grau de inconsistência do resultado. Já o método da média geométrica foi proposto com o objetivo de resolver um problema de inconsistência no ordenamento, que pode ocorrer no método do autovalor quando os elementos da matriz são substituídos pelos seus recíprocos. Todos os três métodos resultarão em iguais prioridades caso as matrizes sejam consistentes (ISHIZAKA e NEMERY, 2013, p. 33).

O Método da Aproximação é o mais simples e baseia-se no somatório dos elementos de uma linha (Equação 35), e na normalização dos somatórios (Equação 36) para se definir a prioridade dos critérios.

$$r_i = \sum_j a_{ij} \quad (35)$$

$$p_i = \frac{r_i}{\sum_j r_j} \quad (36)$$

No Método do Autovalor, um vetor de prioridades, \mathbf{p} , é calculado a partir da resolução da Equação 37.

$$\mathbf{A}\mathbf{p} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \cdots \\ p_n \end{bmatrix} = \lambda_{max} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \cdots \\ p_n \end{bmatrix} = \lambda_{max}\mathbf{p} \quad (37)$$

onde λ_{max} é o autovalor não trivial que satisfaz o sistema de equações, e $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_j, \dots, p_n)$. Caso $\lambda_{max} = n$, onde n é a dimensão de \mathbf{A} , diz-se que a matriz é consistente. Caso a igualdade não seja verdadeira, a diferença $\lambda_{max} - n$ é uma medida da inconsistência da matriz (ISHIZAKA e NEMERY, 2013, p. 35).

O principal problema desse método é a inconsistência no ordenamento que pode ocorrer quando matrizes inconsistentes de $n \geq 4$ tem seus elementos trocados pelos recíprocos. Em alguns casos, o ordenamento que deveria ser invertido não se concretiza (ISHIZAKA e NEMERY, 2013, p. 37).

Assim, o Método da Média Geométrica, a fim de evitar o problema de inconsistência no ordenamento, utiliza a Equação 38 para calcular as prioridades dos critérios.

$$P_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \quad (38)$$

onde $a_{ij} = (p_i/p_j)e_{ij}$ é a comparação entre a alternativa i e a j , e e_{ij} é o erro.

4.1.1.3 Cálculo da Prioridade Global das Alternativas

Para o cálculo da prioridade global faz-se uma síntese das prioridades locais ao longo de todos os critérios utilizando-se uma normalização de modo distributivo como mostra a Equação 39.

$$P_i = \sum_j w_j \cdot p_{ij} \quad (39)$$

onde P_i é a prioridade global da alternativa i , p_{ij} é a prioridade local em relação ao critério j , e w_j é a prioridade (ou peso) do critério j .

4.1.1.4 Checagem da Consistência

Após a matriz de comparação ser definida, uma checagem da consistência deve ser realizada para verificar se as comparações aos pares não se contradizem. Para que a matriz, preenchida com as comparações a_{ij} , seja considerada consistente, ela deve obedecer as regras da transitividade (Equação 40) e a regra da reciprocidade (Equação 41).

$$a_{ij} = a_{ik} \cdot a_{kj} \quad (40)$$

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad (41)$$

onde i, j , e k são quaisquer alternativas da matriz e a_{ij} é a comparação entre as alternativas i e j .

Entretanto, uma vez que o método AHP é baseado na opinião de especialistas, quanto maior a quantidade de critérios/alternativas, maior a chance dos julgamentos se contradizerem.

Assim, esse método utiliza a ideia de índice de consistência (IC), calculado a partir da Equação 42, para determinar a razão de consistência (RC) a partir da Equação 43. Caso $RC < 10\%$, diz-se que a matriz tem consistência aceitável.

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (42)$$

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (43)$$

onde IR é o índice randômico, obtido a partir da média de quinhentas matrizes preenchidas de forma randômica. A Tabela 8 mostra os IR calculados por Saaty (1977) para matrizes de n até 10.

Tabela 8 - Índices randômicos (IR) calculados por Saaty

n	3	4	5	6	7	8	9	10
IR	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: Ishizaka e Nemery (2013, p. 32).

4.1.1.5 Análise de Sensibilidade

A última etapa desse método é uma análise de sensibilidade, onde os dados de entrada são levemente modificados, e o impacto que essa mudança gera nos resultados é observado. Essa variação permite a geração de diferentes cenários, onde os ordenamentos podem variar. Em caso de mudança, diz-se que o resultado é sensível e discussões sobre o melhor cenário devem ser realizadas. Quando o ordenamento permanece o mesmo, diz-se que o resultado é robusto.

4.1.2 TOPSIS

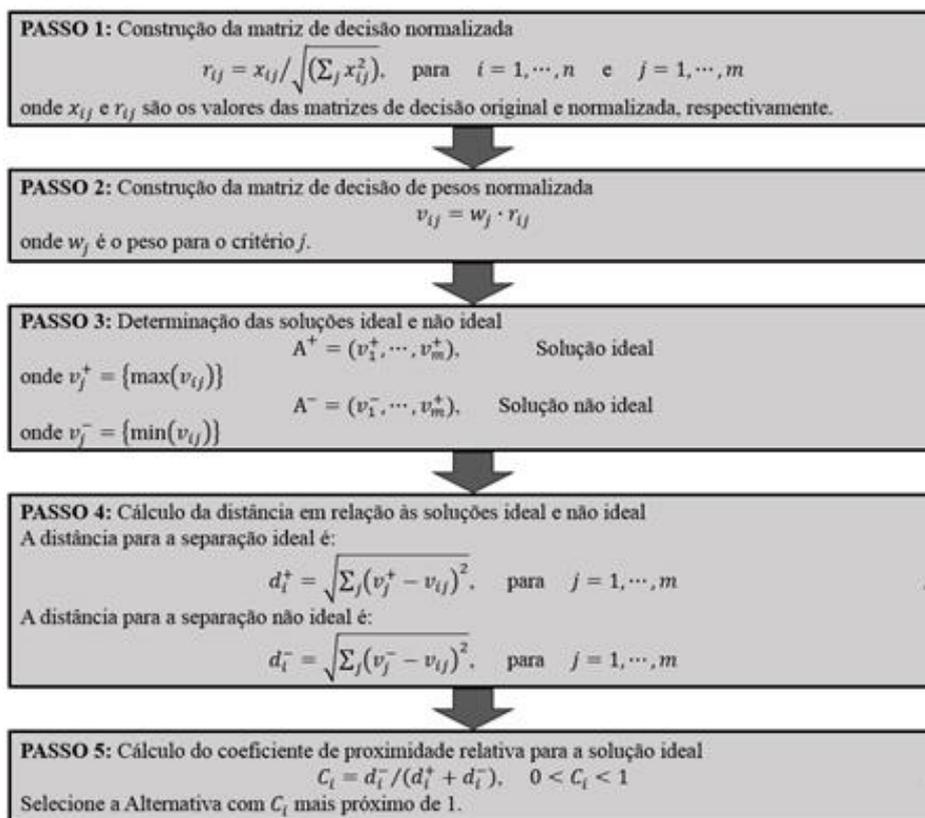
A ideia fundamental do método TOPSIS, ou Técnica para Avaliar o Desempenho de Alternativas Através de Similaridade com a Solução Ideal na sigla em inglês, de acordo com Yoon (1980), Hwang e Yoon (1981) e Lai, Liu e Hwang (1994), é que a melhor solução é aquela que apresenta a menor distância em relação à solução ideal (*Positive Ideal Solution* - PIS) e a maior distância em relação a solução não ideal (*Negative Ideal Solution* - NIS). A

solução ideal maximiza os critérios benéficos e minimiza os critérios de custos, enquanto que a solução não ideal maximiza os critérios de custos e minimiza os critérios benéficos (BEHZADIAN *et al.*, 2012, p. 13052).

Como características, o TOPSIS necessita apenas de um número mínimo de entradas, limitadas aos pesos associados a cada critério, e apresenta uma saída de dados de fácil compreensão (ISHIZAKA e NEMERY, 2013, p. 215).

Ele é baseado em cinco passos: construção da matriz de decisão normalizada; construção da matriz de decisão de pesos normalizada; determinação das soluções ideal e não ideal; cálculo da distância em relação às soluções ideal e não ideal; e cálculo do coeficiente de proximidade relativa para a solução ideal. A Figura 22 apresenta de forma resumida os cinco passos da metodologia.

Figura 22 - Etapas processuais da metodologia TOPSIS



Fonte: Adaptado de Behzadian *et al.* (2012, p. 13052).

4.1.2.1 Construção da Matriz de Decisão Normalizada

Nessa primeira etapa as performances de n alternativas i com relação à m critérios j são coletadas em uma matriz de decisão $\mathbf{X} = (x_{ij})$, onde $i = 1, \dots, n$ e $j = 1, \dots, m$.

A normalização da matriz de decisão tem por objetivo tornar possível a comparação das medições em diferentes unidades. Existem diversos métodos com essa finalidade, entre eles o Método da Normalização Distributiva e o Método da Normalização Ideal.

No Método da Normalização Distributiva, as performances são divididas pela raiz do somatório de cada elemento em uma coluna ao quadrado, conforme mostra a Equação 44.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}}, \quad \text{para } i = 1, \dots, n \text{ e } j = 1, \dots, m. \quad (44)$$

No Método da Normalização Ideal, cada performance é dividida pelo maior valor de cada coluna caso deseje-se maximizar o critério, como mostra a Equação 45. Caso se deseje minimizar o critério, cada performance é dividida pela menor pontuação em cada coluna, conforme a Equação 46.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{u_j^+}, \quad \text{para } i = 1, \dots, n \text{ e } j = 1, \dots, m. \quad (45)$$

onde $u_j^+ = \max(x_{ij})$ para $j = 1, \dots, m$.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{u_j^-}, \quad \text{para } i = 1, \dots, n \text{ e } j = 1, \dots, m. \quad (46)$$

onde $u_j^- = \min(x_{ij})$ para $j = 1, \dots, m$.

4.1.2.2 Construção da Matriz de Decisão de Pesos Normalizados

Uma vez normalizadas as performances, uma matriz de pesos normalizados é construída através da multiplicação dos valores das performances normalizadas pelos pesos dos critérios correspondentes w_j , conforme a Equação 47.

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij} \quad (47)$$

4.1.2.3 Determinação das Soluções Ideal e Não Ideal

O primeiro passo para se calcular a distância em relação às soluções ideal (ou zênite) e não ideal (ou nadir, ou negativo ideal) é definir quais são essas soluções. Para isso existem três diferentes maneiras, de acordo com Ishizaka e Nemery (2013, p. 218).

A primeira alternativa é a seleção da melhor e da pior performance de cada critério da matriz de decisão de pesos normalizados para, respectivamente, soluções ideal, $A^+ = (v_1^+, \dots, v_m^+)$, e não ideal, $A^- = (v_1^-, \dots, v_m^-)$.

A segunda alternativa é assumir valores absolutos para a solução ideal, $A^+ = (1, \dots, 1)$, e para a solução não ideal, $A^- = (0, \dots, 0)$, os quais são definidos sem levar em consideração as ações do problema de decisão.

A terceira alternativa, por fim, é a definição pelo tomador de decisão de valores para as soluções ideal e não ideal. Esse último método é o menos utilizado.

4.1.2.4 Cálculo da Distância em Relação às Soluções Ideal e Não Ideal

Uma vez definidas as soluções, a distância entre cada critério e elas pode ser obtido através da Equação 48, para a solução ideal, e através da Equação 49, para a solução não ideal.

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_j (v_j^+ - v_{ij})^2}, \quad j = 1, \dots, m \quad (48)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_j (v_j^- - v_{ij})^2}, \quad j = 1, \dots, m \quad (49)$$

4.1.2.5 Cálculo do Coeficiente de Proximidade Relativa para a Solução Ideal

A última etapa do método TOPSIS é o cálculo do coeficiente de proximidade relativa a partir da razão entre as distâncias utilizando a Equação 50. O coeficiente de proximidade relativa é sempre um valor entre 0 e 1, onde 1 é a ação preferencial.

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (50)$$

4.2 MÉTODOS MCDA APLICADOS ÀS ENERGIAS RENOVÁVEIS

Tradicionalmente, a seleção de energias alternativas tem focado apenas na minimização dos custos. Porém, atualmente, já se reconhece que ela é uma decisão muito mais complexa que envolve muitos fatores e agentes. Assim, o principal objetivo de se utilizar os métodos MCDA é para tornar mais racional e eficiente as escolhas, e para garantir que valores públicos se reflitam nas decisões (TAHA e DAIM, 2013, p. 20).

Dentro do campo das energias renováveis, Taha e Daim (2013) dividem a aplicação dos métodos MCDA em quatro categorias: Planejamento Energético e suas Políticas; Avaliação Energética; Seleção de Projetos e Tecnologia; e Meio Ambiente. A Tabela 9 apresenta uma seleção dentro dos diversos trabalhos levantados por Taha e Daim (2013) que se enquadram nessas quatro categorias e os respectivos métodos utilizados.

A categoria Planejamento Energético e suas Políticas refere-se a estudos que apreciam planos energéticos viáveis e/ou a difusão de diferentes opções de energias renováveis. Já a Avaliação Energética refere-se à análise de diferentes energias alternativas ou diferentes tecnologias a fim de encontrar a que melhor se adequa a um sistema. Por sua vez a Seleção de Projetos e Tecnologia refere-se a decisões relacionadas à escolha do local, seleção da tecnologia, e decisão de poio em projetos de aproveitamento de energia renovável. E por fim, a categoria Meio Ambiente diz respeito a estudos que buscam a melhor alternativa de um ponto de vista ambiental e da questão climática.

Pohekar e Ramachandran (2004), Wang *et al.* (2009) e Taha e Daim (2013) em seus trabalhos realizam uma vasta revisão do estado da arte de aplicações dos métodos de MCDA na área das energias renováveis. A revisão realizada por Wang *et al.* (2009) mostra que existem quatro categorias de critérios utilizados na avaliação de fontes energéticas e na seleção de locais: técnico, econômico, ambiental, e social. A Tabela 10 lista os principais indicadores de cada um desse critérios.

Taha e Daim (2013) concluem que, apesar do número vasto de métodos, nenhum deles pode ser considerado o melhor para todos os tipos de situação. Porém, constatam que o método AHP é o mais utilizado, possivelmente devido à estrutura simples e à habilidade de reavaliar os resultados até se obter consistência nos resultados.

Tabela 9 - Literatura selecionada sobre métodos MCDA aplicada às energias renováveis

Área de Aplicação	AHP/ANP	ELECTRE	PROMETHEE	Outros
Planejamento Energético e suas Políticas	(HÄMÄLÄINEN e KARJALAINEN, 1992); (KABLAN, 2004); (KÖNE e BÜKE, 2007); (LEE, YOON e KIM, 2007); (LEE, MOGI e KIM, 2008); (ÖNÜT, TUZKAYA e SAADET, 2008); (ULUTAŞ, 2005).	(BECCALI, CELLURA e ARDENTE, 1998); (GEORGOPOULOU, LALAS e PAPAGIANNAKIS, 1997).	(KOWALSKI <i>et al.</i> , 2009); (TOPCU e ULENGIN, 2004).	(AFGAN e CARVALHO, 2002); (SAN CRISTÓBAL, 2011); (CHU <i>et al.</i> , 2007); (AFGAN, VEZIROGLU e CARVALHO, 2007); (DIAKOULAKI <i>et al.</i> , 1999).
Avaliação Energética	(CHATZIMOURATIDIS e PILAVACHI, 2009a, 2009b); (NIGIM, MUNIER e GREEN, 2004); (PILAVACHI <i>et al.</i> , 2009); (TZENG, LIN e OPRICOVIC, 2005).	(BECCALI, CELLURA e MISTRETTA, 2003); (SISKOS e HUBERT, 1983).	(OBERSCHMIDT <i>et al.</i> , 2010); (HARALAMBOPOULOS e POLATIDIS, 2003).	(AFGAN e CARVALHO, 2008); (AFGAN, PILAVACHI e CARVALHO, 2007); (BURTON e HUBACEK, 2007); (CAVALLARO e CIRAOLO, 2005).
Seleção de Projetos e Tecnologia	(ARAS, ERDOĞMUŞ e KOÇ, 2004); (CHENG e LI, 2005); (ARAGONÉS-BELTRÁN <i>et al.</i> , 2010); (KAYA e KAHRAMAN, 2010); (LEE, CHEN e KANG, 2009); (MEADE e PRESLEY, 2005).	(CAVALLARO, 2010); (GOLETSIS, PSARRAS e SAMOUILIDIS, 2003).	(CAVALLARO, 2009); (GOLETSIS, PSARRAS e SAMOUILIDIS, 2003); (GOURMAS e LYGEROU, 2000); (SAFAEI MOHAMADABADI, TICHKOWSKY e KUMAR, 2009).	(BEGIĆ e AFGAN, 2007); (CHERNI <i>et al.</i> , 2007); (ESPIE <i>et al.</i> , 2003); (GOURMAS, LYGEROU e PAPAYANNAKIS, 1999); (IVANOVA, VOROPAI e HANDSCHIN, 2005).
Meio Ambiente	(CHATZIMOURATIDIS e PILAVACHI, 2007); (ZHAO, YANG e CHEN, 2009).	(SALMINEN, HOKKANEN e LAHDELMA, 1998).	(SALMINEN, HOKKANEN e LAHDELMA, 1998)	(ZHOU, ANG e POH, 2006); (GREENING e BERNOW, 2004); (LAHDELMA, SALMINEN e HOKKANEN, 2000); (LINKOV <i>et al.</i> , 2006).

¹Outros inclui: VIKOR, TOPSIS, SWA, SIMUS, UTADIS, árvores de valores.

Fonte: Adaptado de Taha e Daim (2013, p. 20).

Tabela 10 - Critérios de seleção para planejamento energético sustentável

Critério	Indicadores
Técnico	Eficiência, eficiência exergética, taxa de energia primária, segurança, confiabilidade, maturidade, outros.
Econômico	Custo de investimento, custo de operação e manutenção, custo de combustível, custo elétrico, presença de rede, valor, período de retorno de investimento, tempo útil de serviço, custo anual equivalente, outros
Ambiental	Emissões de NO _x , emissões de CO ₂ , emissões de CO, emissões de SO ₂ , emissão de partículas, compostos orgânicos voláteis não-metano, uso da terra, ruído, outros.
Social	Aceitação social, criação de empregos, benefícios sociais, outros.

Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2009).

Behzadian *et al.* (2012) apresentam uma vasta revisão da literatura das aplicações da técnica TOPSIS, classificando 266 artigos publicados em 103 revistas internacionais desde o ano 2000. Nessa classificação foram distinguidas nove áreas de aplicação desta técnica: Gerenciamento e Logística da Cadeia de Suprimentos (*Supply Chain Management and Logistics*); Sistemas de Manufatura, Projeto e Engenharia (*Design, Engineering and Manufacturing Systems*); Gerenciamento de Negócios e Marketing (*Business and Marketing Management*); Gerenciamento da Saúde, da Segurança e do Ambiente (*Health, Safety and Environment Management*); Gerenciamento de Recursos Humanos (*Human Resources Management*); Gerenciamento Energético (*Energy Management*); Engenharia Química (*Chemical Engineering*); Gerenciamento de Recursos Hídricos (*Water Resources Management*); Outros Tópicos (*Other Topics*). Na área Gerenciamento Energético foram encontrados 14 artigos que representaram 5,2% do total. A grande maioria destes se concentravam na avaliação e seleção de métodos e técnicas de geração de energia, assim como na performance de sistemas de energia.

Wimmler *et al.* (2015) faz uma revisão do estado da arte dos métodos de suporte à análise multi-critério aplicados à energia renovável e às tecnologias de armazenamento, com o objetivo de analisar o foco de cada um deles, e avaliar os aspectos chaves que podem ser utilizados para planejamentos energéticos direcionados para ilhas. Como resultado ele identifica que para ilhas remotas, o uso de tecnologias renováveis associado com dispositivos de armazenagem são soluções desejadas do ponto de vista do desenvolvimento sustentável.

Com relação a trabalhos que envolvam diretamente energia ondomotriz, Le *et al.* (2015) aplicam uma metodologia combinando duas técnicas MCDA (AHP e TOPSIS) e Sistema de Informações Geográficas (SIG) para selecionar locais adequados para instalação de conversores de energia ondomotriz. No trabalho, a Tasmânia foi utilizada como estudo de caso. A ideia da

metodologia é que o local ideal para instalação não depende apenas da potência da onda existente no local, mas também deve ser viável para instalação e suprimento elétrico da demanda. Assim, diversos critérios que se dividiram em Usos do Mar, Condições Oceânicas e Instalações foram levantados. O peso de cada um destes critérios foi levantado utilizando-se o método AHP e uma matriz de decisão com pesos padrões foi construída. Em seguida, utilizando-se o método TOPSIS, os PIS e NIS foram determinados. Duas metodologias para determinar o local de instalação dos WEC foram utilizadas, aplicando-se pesos diferentes aos critérios. Em um caso foi considerado que os critérios de Usos do Mar eram mais importantes, e no outro os critérios de Condições Oceânicas. Dessa forma, utilizando o SIG conjuntamente, foram construídos mapas que apresentavam áreas otimizadas para a instalação.

Outro trabalho que vale a pena ser mencionado é Nobre *et al.* (2009). Nele uma análise multi-critério foi realizada em parte da costa de Portugal, utilizando como ferramenta auxiliar um software SIG. Na análise realizada foram considerados diversos fatores como por exemplo: a distância em relação à costa; a distância em relação à portos; a distância em relação à rede elétrica; o tipo de fundo oceânico; e a climatologia das ondas. Além disso, os seguintes fatores foram considerados como impeditivos para instalação de um WEC: áreas de exercícios militares; áreas de proteção marinha; 500 metros em torno de cabos subaquáticos; área de “sombra de onda” (áreas onde, devido a geometria da costa, a energia das ondas é bastante minimizada); entrada de portos e canais de navegação; e áreas com profundidades inferiores a 30 m e superiores a 200 m. Assim, foram determinados pesos para cada um dos fatores e foram excluídos os locais com restrições, gerando um mapa de locais com potencial para aproveitamento ondomotriz.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e a metodologia utilizada para o mapeamento dos locais com potencial para geração de energia ondomotriz na costa do Brasil. Buscou-se utilizar materiais de fácil acesso, sendo a sua maioria disponíveis gratuitamente via *Internet*. Esse fato, entretanto, não impede que sejam utilizados materiais de outras fontes, desde que apresentem a mesma funcionalidade.

5.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo deste trabalho é a região do Oceano Atlântico Sul entre as latitudes 8°N – 37°S e as longitudes 28°O – 59° O, com foco na ZEE do Brasil.

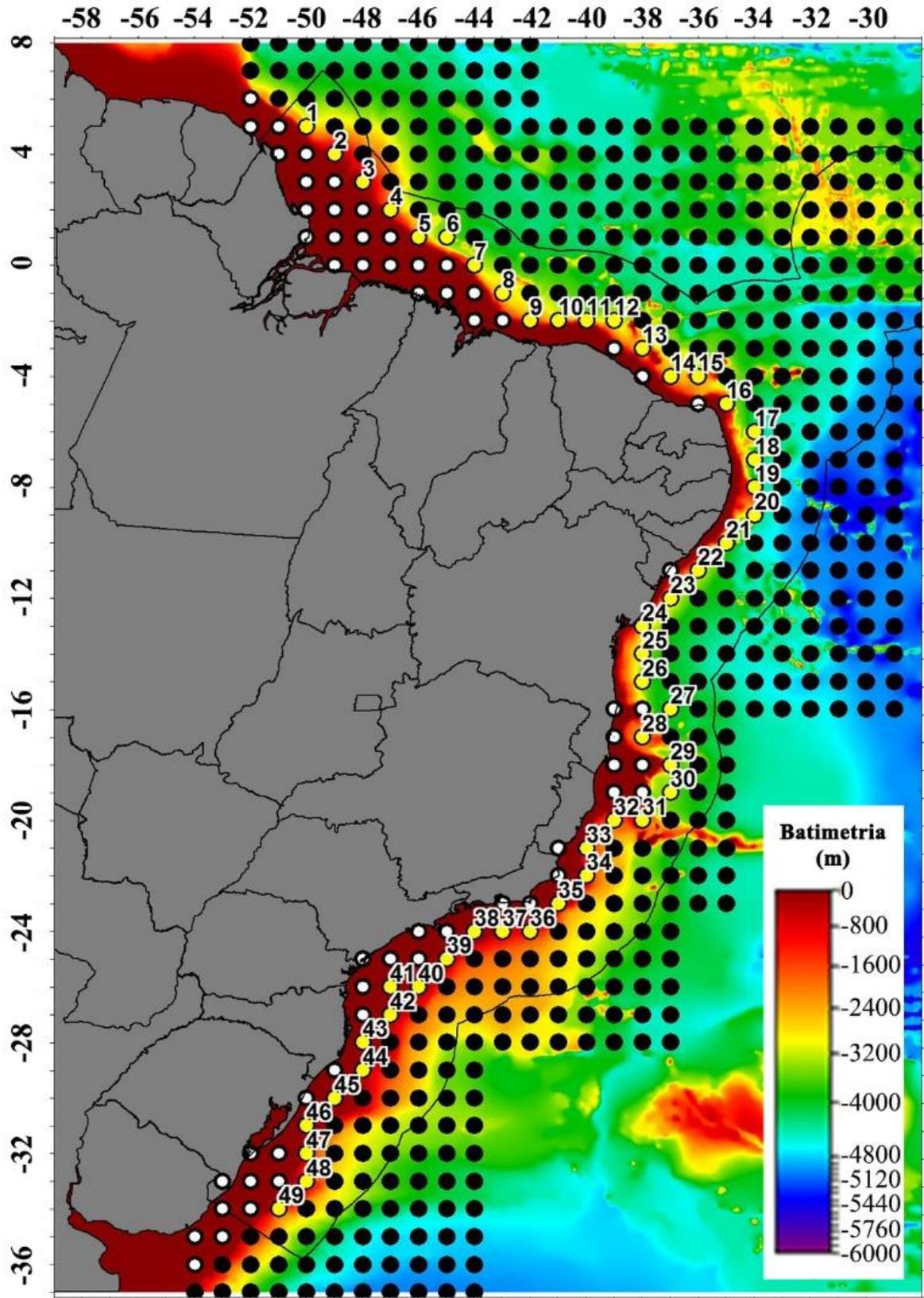
O Brasil tem uma costa extensa, com mais de 7.000 km, e é composto por 26 Estados e um Distrito Federal, dos quais 17 estão localizados na linha costeira. A Figura 23 apresenta a área de estudo com a batimetria obtida a partir da base de dados do GEBCO.

Um total de 546 pontos foram utilizados para qualitativamente mapear toda a ZEE do Brasil, onde 74 desses pontos estão localizados em batimetria inferior a 100 m. Dos outros 472 pontos restantes, 49 foram selecionados para serem utilizados na caracterização do clima de ondas. O Apêndice F apresenta a localização, a profundidade e a distância em relação à costa dos 49 pontos selecionados. A distância em relação à costa são valores aproximados.

Garrison e Ellis (2016, p. 287) aponta como comprimento típico das ondas oceânicas valores entre 60 e 150 m. Assim, uma onda seria considerada de águas profundas e não sofreria perda de energia devido ao atrito com o fundo em locais com batimetrias entre 30 e 75 m. Para garantir a confiabilidade dos cálculos da potência da onda (Equação 26), optou-se por utilizar um valor mais conservador (100 m) para a profundidade mínima dos pontos selecionados, mesmo que a maioria dos WEC sejam projetados para funcionarem em batimetrias inferiores a esse valor de 100 m (IGLESIAS e CARBALLO, 2010a).

Além da validade da Equação 26, outro fator determinante para a escolha dos pontos foi a resolução espacial de 1°x1° dos dados do ERA-Interim utilizado neste trabalho. A grande distância entre os pontos da grade (de até 100 km próximo ao Equador) significa que nos locais onde a plataforma continental é mais estreita só havia disponível dados em locais com grande batimetria.

Figura 23 - Batimetria da costa brasileira com a localização dos 49 pontos analisados



Ponto branco: locais com batimetria inferior a 100 m; Ponto amarelo: locais selecionados para caracterização do clima. Ponto preto: locais utilizados no mapeamento qualitativo. A linha contínua indica o limite da ZEE. Fonte: Autor.

5.1.1 Margem Continental

A margem continental é a região que se situa entre o continente e as bacias oceânicas, e que pode ser dividida, de acordo com Coutinho (2005 *apud* HEEZEN e MENARD, 1966), em plataforma, talude e sopé. Dessas três regiões da margem continental, a plataforma é a mais próxima ao continente e a que apresenta menores profundidades. Ela é quase horizontal, com um gradiente muito baixo (1:1000), possui relevo normalmente inferior a 20 m, e é a região da margem que apresenta maior importância estratégica e comercial.

A margem continental brasileira é do tipo “Atlântica” e sua morfologia é apresentada no Anexo B. Ela apresenta costas relativamente baixas e de relevo moderado, é tectonicamente estável, e apresenta províncias fisiográficas da margem continental e bacia oceanográfica, até a cordilheira mesoatlântica, bem desenvolvidas (COUTINHO, 2005). Neste trabalho, para a descrição das características da margem continental brasileira foi adotada a compartimentação de Coutinho (2005 *apud* MARTINS e COUTINHO, 1981), que a divide nas seguintes seis regiões:

- Cabo Orange – Delta do Parnaíba;
- Delta do Parnaíba – Cabo Calcanhar;
- Cabo Calcanhar – Belmonte;
- Belmonte – Cabo Frio;
- Cabo Frio – Cabo Santa Marta;
- Cabo Santa Marta – Chuí.

A Tabela 11 apresenta a distribuição dos 49 pontos, apresentados na Figura 23 e utilizados na caracterização do clima, entre as seis regiões, e a nomenclatura simplificada para cada região que foi adotada neste trabalho.

Tabela 11 - Compartimentação da margem continental brasileira

Região	Nomenclatura da Região	Sigla	Pontos
Cabo Orange – Delta do Parnaíba	Norte	N	P1 – P9
Delta do Parnaíba – Cabo Calcanhar	Nordeste	NE	P10 – P16
Cabo Calcanhar - Belmonte	Leste	L	P17 – P26
Belmonte – Cabo Frio	Leste-Sudeste	LSE	P27 – P34
Cabo Frio – Cabo Santa Marta	Sudeste	SE	P35 – P42
Cabo Santa Marta - Chuí	Sul	S	P43 – P49

Fonte: Autor.

5.1.1.1 Região Norte

Essa região da margem continental é a que apresenta maior largura da plataforma continental. Sua largura varia entre 100 km na foz do Rio Parnaíba até 330 km na região da ilha de Marajó. Quanto mais larga a plataforma, menor a sua declividade, com a profundidade da quebra ocorrendo entre 80 m no extremo leste da região e 120 m ao longo da foz do Rio Amazonas (COUTINHO, 2005).

5.1.1.2 Região Nordeste

Nessa região a plataforma continental é influenciada por processos eólicos e pelas correntes litorâneas. Ela é considerada estreita, apresenta largura de 50 km no Cabo Calcanhar e largura média entre 40-50 km na Costa Nordeste. A quebra da plataforma ocorre a profundidade de 80 m (COUTINHO, 2005).

5.1.1.3 Região Leste

A Região Leste é a que apresenta plataforma continental com menor largura. A largura máxima é de 42 km e ocorre em Maceió (AL), enquanto que a menor largura é de 8 km e ocorre em frente ao Canyon de Salvador. Ela apresenta um alargamento progressivo desde Cabedelo (PB) até Maceió (AL), diminuindo em seguida até o Canyon Salvador e depois aumentando, novamente, até 20 km no extremo sul da área. A profundidade da plataforma é de no máximo 60 m (COUTINHO, 2005).

5.1.1.4 Região Leste-Sudeste

Nessa região, a plataforma continental apresenta uma grande variação, alargando-se desde Belmonte (BA) até o máximo de 246 km ao largo de Caravelas (BA). Após Regência (ES) ela decresce até o mínimo de 48 km e volta a se alargar em direção ao Cabo de São Tomé

(RJ). Em toda a sua extensão, a profundidade raramente ultrapassa os 60 m (COUTINHO, 2005).

5.1.1.5 Região Sudeste

A largura da plataforma continental nessa região varia entre 50 km no setor Cabo de São Tomé – Cabo Frio e 230 km no Embaiamento de São Paulo, próximo a Santos (SP). A profundidade, por sua vez, varia entre 40 e 180 m, predominando o intervalo entre 140 e 160 m (COUTINHO, 2005).

5.1.1.6 Região Sul

Na Região Sul da margem continental a largura média da plataforma é de 125 km, com relevo suave e monótono. Na porção interna da plataforma, até a cota de 30 m, existe uma série de altos e depressões, circulares e alongados. Já na porção média, nas profundidades de 60 e 110 m existem escarpas que acompanham as curvas batimétricas (COUTINHO, 2005).

5.1.2 Sistemas Meteorológicos

Os principais sistemas meteorológicos que influenciam o clima de ondas no litoral do Brasil são: a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT); o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS); ciclones extratropicais; e sistemas frontais caracterizados pelas altas polares (PALMEIRA, CAMARGO e PALMEIRA, 2012).

As ondas que incidem sobre as costas das Regiões Norte e Nordeste do Brasil são formadas, principalmente, pelos ventos alísios de nordeste e sudeste (CARVALHO, 2010), e são influenciadas pela posição da ZCIT (PALMEIRA, CAMARGO e PALMEIRA, 2012).

A ZCIT é uma região de baixa pressão formada pela confluência dos ventos de alísios de nordeste, originários do Anticiclone Subtropical do Atlântico Norte e pelos alísios de sudeste, originários do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (CARVALHO, 2010). A

posição da ZCIT em relação à latitude varia ao longo do ano, desde valores próximos ao Equador entre março e maio, até 10-15° N no mês de agosto (VELEDA, 2008).

Nas Regiões Sul e Sudeste, as ondas são formadas principalmente pelos ventos do ASAS, sendo estes frequentemente alterados pelos ciclones extratropicais e sistemas frontais (CAVALCANTI *et al.*, 2009).

O ASAS, pela sua característica semi-permanente atua na frequência da formação das ondas, o que provoca que elas sejam menos energéticas, enquanto que ciclones extratropicais e sistemas frontais estão relacionados a eventos extremos. Os ciclones promovem a geração de ondas maiores, enquanto que os sistemas frontais atuam para manter a persistência e a extensão da pista de vento (PALMEIRA, CAMARGO e PALMEIRA, 2012).

Os sistemas frontais, de acordo com Carvalho (2010 *apud* LEMOS e CALBETE, 1996), possuem média mensal de ocorrência de 4 a 6 vezes entre os meses de abril a dezembro na Região Sul e Sudeste. Dependendo de fatores como intensidade da baixa pressão, gradiente de pressão sobre o Brasil e do anticiclone pós-frontal, os sistemas frontais podem chegar até o Nordeste.

Assim como a ZCIT, o ASAS também possui uma variação meridional ao longo do ano. Entre os meses de dezembro e fevereiro (verão no Hemisfério Sul) ele está localizado mais ao sul e para o leste do Oceano Atlântico Sul. Já entre os meses de junho e agosto (inverno no Hemisfério Sul) ele está mais ao norte e oeste, próximo à costa do Brasil (CARVALHO, 2010).

Além dos já mencionados, Carvalho (2010 *apud* INNOCENTINI *et al.*, 2001) e Branco (2005) citam como sistemas que podem influenciar o clima de ondas no Brasil: ciclones extratropicais originários no Hemisfério Norte que contribuem para a formação de *swells* na Região Norte e Nordeste; além de tempestades extratropicais provenientes do Pacífico e Índico, porém, estas atuam com muito menos energia do que os sistemas citados anteriormente.

5.2 MATERIAIS

Para a realização das análises descritas na metodologia a seguir, foram utilizados os seguintes materiais: a base de dados de reanálise ERA-Interim, a base de dados do satélite de altimetria Jason-2/OSTM; os softwares *MATLAB*[®] e *Climate Data Operators* (CDO); além de dados provenientes de diversas fontes que são mencionadas ao longo do texto, e apresentados no Apêndice F.

5.2.1 Projeto ERA-Interim

O ERA-Interim é uma reanálise atmosférica global produzida pelo ECMWF. Seu período de cobertura se inicia em 1979 e continua até o presente momento. Os produtos dessa reanálise são dados em uma malha retangular que incluem uma larga variedade de parâmetros de superfície, que descrevem o clima, as ondas oceânicas e as condições da superfície terrestre. Incluem também parâmetros aéreos que cobrem a troposfera e a atmosfera (DEE *et al.*, 2011).

O modelo de ondas utilizado para produzir alguns dos dados da reanálise do ERA-Interim é baseado no modelo espectral de onda de 3ª geração WAM acoplado com um modelo atmosférico, e inclui uma série de melhorias tanto nos aspectos físicos, quanto numéricos, em relação ao projeto anterior, o ERA-40. Dentre as melhorias apresentadas, as mais significativas para aplicações climáticas são a introdução de uma solução para tratar efeitos batimétricos não resolvidos e a reformulação do termo de fonte de dissipação (DEE *et al.*, 2011).

Observações de altura da onda por altímetros são assimiladas ao modelo de onda desde o fim de 1991. A validação dos dados do ERA-Interim é realizada comparando-os com observações *in situ* dos parâmetros de onda obtidos por boias, plataformas, e/ou navios climáticos (DEE *et al.*, 2011).

A base de dados do ERA-Interim utilizada nesse trabalho está disponível gratuitamente e apresenta uma resolução espacial de $1^\circ \times 1^\circ$, o que equivale uma distância horizontal máxima de aproximadamente 110 km, e apresenta intervalos de 6h (00h, 06h, 12h, 18h UTC). Os parâmetros utilizados foram a altura significativa da onda, H_s , o período de energia, T_e , e a direção média da onda (*MWD*).

5.2.2 Satélite Altimétrico Jason-2/OSTM

O satélite altimétrico Jason-2/OSTM, lançado em 2008, é uma cooperação entre as agências *Centre National d'Études Spatiales* (CNES), *European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites* (EUMETSAT), *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Ele possui um altímetro que opera em duas frequências, 13,6 Ghz (Banda Ku) e 5,3 GHz (Banda C), com o objetivo de medir o nível oceânico, a altura da onda e a velocidade do vento. A altitude da órbita do Jason-2 é de 1.336 km, a mesma dos seus antecessores, o que reduz as

interações dele com a atmosfera e com a gravidade terrestre a valores mínimos, tornando a determinação da órbita mais fácil e precisa. Além da altitude, sua órbita apresenta como característica uma inclinação de 66° no sentido norte-sul, o que possibilita uma cobertura de 90% das regiões não congeladas dos oceanos. Outra característica importante é o tempo de ciclo, que é de aproximadamente 10 dias. Esse valor permite a obtenção de dados com boa resolução tanto espacial quanto temporal.

5.2.3 MATLAB®

O MATLAB é um software comercial voltado para a solução de problemas matemáticos, científicos e tecnológicos. Ele foi desenvolvido no fim dos anos 1970 por Clive Moler, e atualmente, é reconhecido mundialmente como uma das melhores ferramentas computacionais da sua área de atuação.

5.2.4 Climate Data Operators

O CDO é uma ferramenta computacional composta por diversos comandos utilizados para processar dados de modelos climáticos. Dentre os mais de 700 operadores que compõem o CDO, pode-se citar funções estáticas, funções aritméticas, ferramentas de seleção de dados, ferramentas de redução de amostra, e ferramentas de interpolação espacial. Uma das principais características do CDO é a baixa utilização de memória, e a capacidade de processar grandes arquivos, maiores que a memória física do computador, de forma rápida e eficiente (SCHULZWEIDA, 2016).

5.2.5 SAGA

O software SAGA, acrônimo de *System for Automated Geoscientific Analyses*, é um programa SIG de código aberto desenvolvido pelo departamento de Geografia Física de Göttingen na Alemanha. Atualmente, o seu centro de desenvolvimento está localizado em Hamburgo (SAGA GIS BRASIL, 2017).

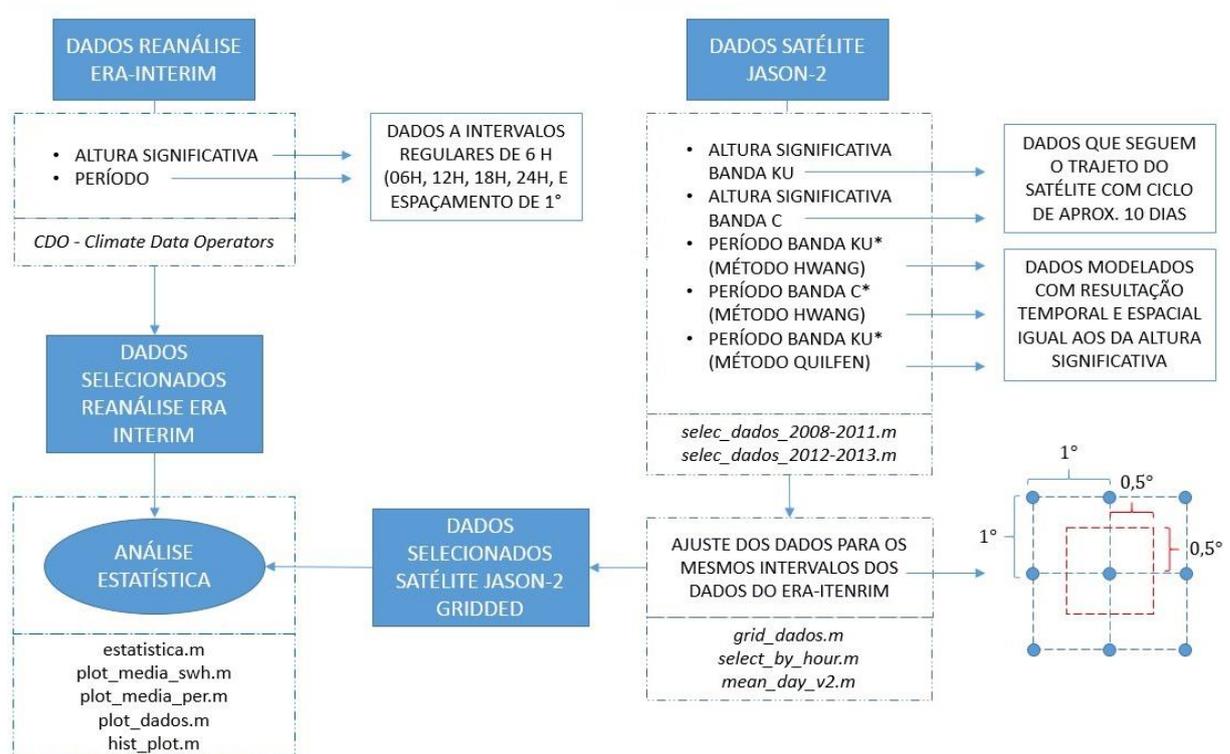
5.3 MÉTODOS

Para atingir os objetivos propostos por este trabalho, foram realizadas quatro etapas: validação dos dados do ERA-Interim; caracterização do clima de ondas; análise de desempenho de dispositivos ondomotriz; e análise multi-critério. A seguir são descritas as metodologias empregadas em cada uma dessas etapas.

5.3.1 Metodologia da Validação

Para realizar a validação, dados de reanálise do ERA-Interim foram comparados estatisticamente com os do satélite de altimetria Jason-2/OSTM. A Figura 24 apresenta um fluxograma da metodologia utilizada na validação.

Figura 24 - Fluxograma da validação dos dados do ERA-Interim



Fonte: Autor.

A metodologia, como pode ser vista na Figura 24, segue basicamente três etapas: aquisição de dados, ajuste dos dados e análise estatística.

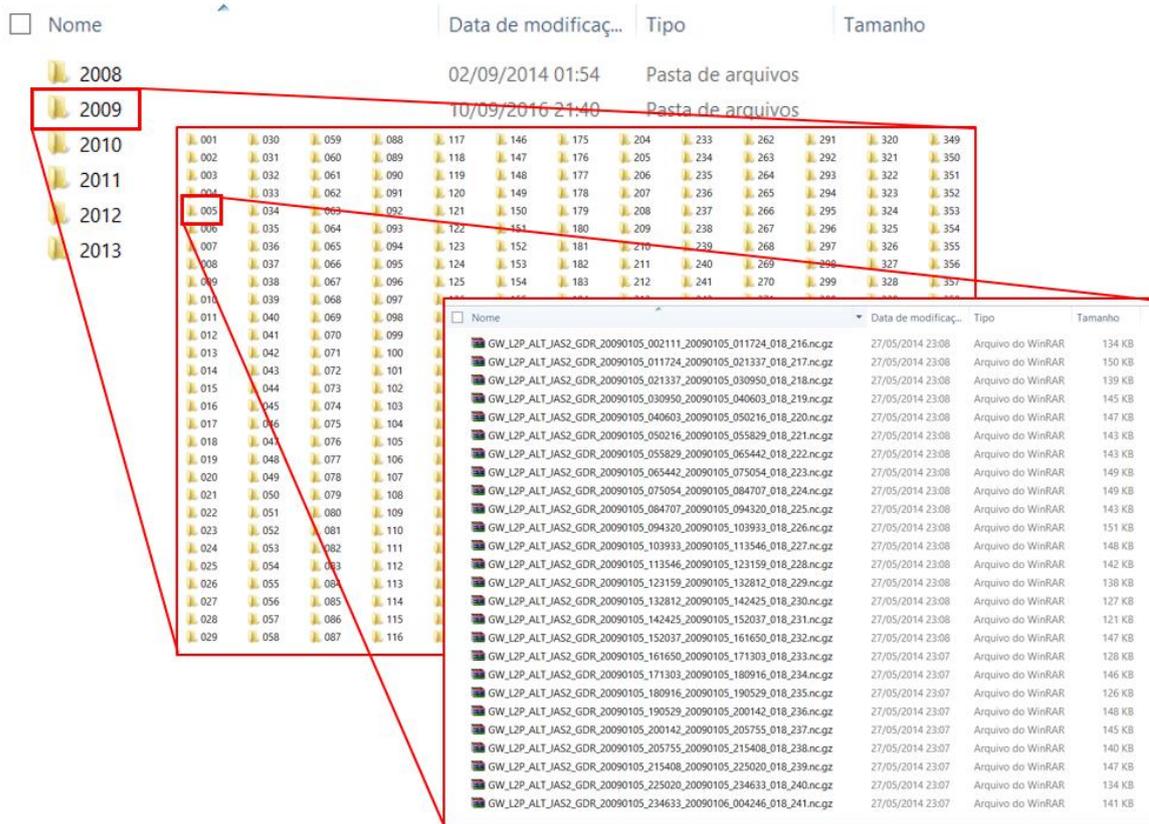
5.3.1.1 Aquisição de Dados

A validação dos dados de reanálise do ERA-Interim foi realizada a partir de uma comparação estatística com dados de medição indireta obtidos pelo satélite de altimetria Jason-2/OSTM.

Os dados do Jason-2/OSTM foram obtidos juntos a agência AVISO⁺ (<http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/windwave-products.html>) e estavam divididos em pastas anuais, com subpastas diárias, cada uma delas contendo aproximadamente 26 arquivos do tipo NetCDF. A Figura 25 mostra a organização dos dados do Jason-2/OSTM.

Foram obtidos dados entre 01/07/2008 e 31/11/2013. Esses arquivos foram em seguida reorganizados em pastas anuais com subpastas mensais, ao invés de pastas diárias.

Figura 25 - Organização dos dados do Jason-2/OSTM

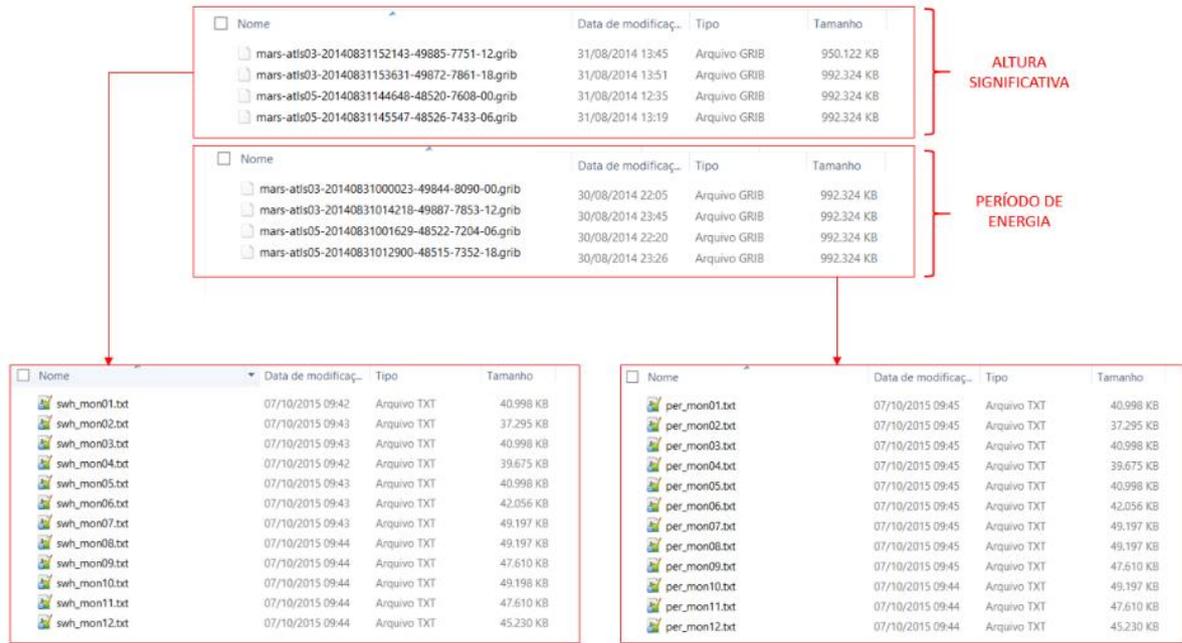


Fonte: Autor.

Os dados do ERA-Interim foram obtidos junto a agência ECMWF (<http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>) e estavam divididos em quatro arquivos horários (00h, 06h, 12h e 18h) do tipo GRIB para cada um dos parâmetros de interesse (H_s e T_e), contendo informações que cobriam o mesmo período dos dados do Jason-

2/OSTM. Em seguida, utilizando a ferramenta CDO, os dados foram divididos em arquivos mensais para cada uma das variáveis, totalizando 24 arquivos de dados, conforme mostra a Figura 26.

Figura 26 - Organização dos dados do ERA-Interim



Fonte: Autor.

5.3.1.2 Ajuste dos Dados

Durante a aquisição dos dados do Jason-2/OSTM não foi realizada nenhuma pré-seleção da região. Assim, os dados obtidos englobavam a trajetória do satélite ao redor de todo o planeta. Como consequência, a primeira etapa realizada no ajuste foi a separação dos dados relativos a região de estudo definida anteriormente. Para a leitura e automatização dos procedimentos, foi utilizado o software comercial MATLAB[®] e a ferramenta MEXCDF.

A etapa seguinte foi a separação dos parâmetros de interesse dentre os vários disponíveis nos dados do Jason-2/OSTM. Nesta etapa, qualquer valor que estivesse marcado como de qualidade duvidosa foi descartado. Para maiores informações sobre os parâmetros disponíveis, recomenda-se a leitura do *User Manual* do satélite (DUMONT *et al.*, 2015). A título de exemplo dos parâmetros disponíveis, pode-se citar: temperatura do oceano, umidade do ar na superfície oceânica, pressão do ar na superfície oceânica, velocidade do vento, dentre outras. Porém,

dentre os vários parâmetros fornecidos não consta nem o período da onda, nem a direção, devido aos princípios físicos envolvidos na aquisição de dados pelos satélites de altimetria.

Entretanto, ao menos no que diz respeito ao período da onda, diversos estudos já foram realizados com o objetivo de empiricamente determinar e validar esse parâmetro. Dentre os estudos podemos citar Challenor e Srokosz (1984), Hwang *et al.* (1998), Davies, Challenor e Cotton (2001), Gommenginger *et al.* (2003), Quilfen *et al.* (2004), Govidan *et al.* (2011) e Zhao, Li e Song (2012).

Assim, dentre os diversos parâmetros disponíveis, foram selecionados os seguintes:

- Altura significativa na banda Ku, $H_{s,jas-ku}$;
- Altura significativa da banda C, $H_{s,jas-c}$;
- Velocidade do vento, U ;
- Coeficiente de backscatter da banda Ku, σ_{ku} .

A partir desses parâmetros selecionadas, foram determinados três períodos da onda utilizando as metodologias propostas por Hwang *et al.* (1998) e Quilfen *et al.* (2004).

A metodologia proposta por Hwang *et al.* (1998) é uma relação empírica entre o período de pico do campo de onda, T_p , a velocidade do vento a 10 m acima da superfície oceânica, U_{10} , e a altura da onda, H , que se sintetiza na Equação 51.

$$\frac{U_{10}}{gT_p} = 0,048 \left(\frac{U_{10}^2}{gH} \right)^{0,67} \quad (51)$$

onde g é a gravidade local. Neste trabalho, o período de pico foi considerado como sendo igual ao período de energia.

Já a metodologia desenvolvida por Quilfen *et al.* (2004) utiliza uma abordagem diferente, baseada em redes-neurais utilizando $H_{s,jas-ku}$ e σ_{ku} , conforme a Equação 52.

$$T = \exp(-17,1642A + 13,5844) \quad (52)$$

onde A é definido pela Equação 53.

$$A = \frac{1}{1 + \exp(0,6573H_{s,jas-ku}^{0,1084} \sigma_{ku}^{0,2962} - 2,2377)} \quad (53)$$

Há ainda uma metodologia complementar proposta por Quilfen *et al.* (2004) que utiliza os coeficientes de backscatter de ambas as bandas de frequência do satélite, porém decidiu-se não a utilizar na análise realizada neste trabalho.

Assim, a partir da Equação 51, foram calculados o período de energia utilizando a altura significativa na banda Ku, $T_{e,hwa-ku}$, e o período de energia utilizando a altura significativa na banda C, $T_{e,hwa-c}$. E, utilizando as Equações 52 e 53, foi calculado o período de energia, $T_{e,qui}$.

Uma vez separado os dados da altimetria correspondentes à região de estudo, eles foram ajustados espacial e temporalmente para coincidir com os dados de reanálise. De acordo com Monaldo (1988), um par altímetro-boia, aqui estendido para altímetro-modelo, deve obedecer aos critérios de distância horizontal menor que 50 km e intervalo temporal entre as medições menor que 0,5 h. Assim, o ajuste espacial foi realizado selecionando-se dados do Jason-2/OSTM localizados dentro de um quadrado imaginário de $1^\circ \times 1^\circ$ centrado no ponto analisado. Para a resolução temporal o ajuste foi feito selecionando os dados do satélite com $\pm 0,5$ h em relação aos dados da reanálise. Qualquer dado do ERA-Interim marcado como de baixa qualidade foi descartado no processo. Além disso, cada passagem do satélite pela região do ponto produz entre 10 e 14 observações individuais. Como sugerido por Durrant, Greenslade e Simmonds (2009), um controle de qualidade foi realizado removendo-se todas as observações fora do intervalo de até duas vezes o desvio padrão em relação à média da passagem.

Devido a distância equatorial de 90 km entre duas órbitas adjacentes do satélite, é recomendado o uso de uma base de dados formada por várias missões, cujos altímetros tenham diferentes inclinações e/ou diferentes ciclos, de forma a aumentar a cobertura espacial e temporal.

5.3.1.3 Análise Estatística

A análise estatística foi baseada nos parâmetros: *bias* (ou viés); raiz quadrada do erro médio (*RMSE*); razão entre os desvios padrões ($\sigma_{rea}/\sigma_{sat}$), coeficiente de correlação de Pearson (*R*); e índice de dispersão (*SI*).

O *bias*, calculado pela Equação 54, é um parâmetro que quantifica a diferença média entre dois conjuntos de dados. Apesar de fornecer uma ideia da tendência ou do erro sistemático, como os valores negativos se anulam com os valores positivos na somatória, ele geralmente leva a uma subestimação do erro.

$$bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i) \quad (54)$$

onde x_i e y_i são os dados de reanálise e de satélite, respectivamente, e n é o total de dados de cada variável.

Outro parâmetro estatístico calculado utilizando a Equação 55 é o *RMSE*, que relaciona a diferença entre duas variáveis, porém, sem o problema descrito anteriormente para o bias. Para esse parâmetro, quanto mais próximo de zero, mais similares serão as médias dos dois conjuntos de dados.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (55)$$

O desvio padrão de cada conjunto fornece a informação da dispersão dos dados em relação à média. Assim, a razão entre os desvios padrão, calculada pela Equação 56, é uma medida da diferença entre o comportamento de dispersão das duas amostras. Os valores de razão serão positivos, com valores próximos a 1 indicando comportamento semelhante.

$$\frac{\sigma_{rea}}{\sigma_{sat}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (56)$$

onde \bar{x} e \bar{y} são, respectivamente, as médias dos dados de reanálise e de satélite, e σ_{rea} e σ_{sat} são, respectivamente, os desvios padrão dos dados de reanálise e de satélite.

O coeficiente de correlação de Pearson, calculado pela Equação 57, mede o grau da correlação entre duas variáveis de escala métrica, assumindo valores entre -1 e 1, onde um valor igual a 1 significa correlação perfeita e positiva entre as duas variáveis. De forma semelhante, um valor igual a -1 significa correlação perfeita, porém negativa, ou seja, enquanto uma variável aumenta a outra diminui. Por sua vez, um valor igual a 0 significa nenhuma dependência linear entre as duas variáveis.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (57)$$

Por fim, o índice de dispersão, calculado pela Equação 58, é uma medida normalizada do erro que leva em consideração as observações do satélite. Ele é uma medida padrão para comparação entre modelos de onda. Assim, valores pequenos de SI indicam um modelo robusto, que emula com boa precisão a realidade.

$$SI = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x}) - (y_i - \bar{y})]^2}}{\bar{y}} \quad (58)$$

5.3.2 Metodologia da Caracterização da Onda

A caracterização do clima de ondas foi realizada para os 49 locais indicados na Figura 23, usando aproximadamente 35 anos de dados de reanálise do ERA-Interim. O período de estudo foi entre 01/01/1979 e 30/09/2015. Na caracterização, a altura significativa da onda, H_s e o período de energia, T_e , foram anualmente e sazonalmente analisados estatisticamente. A sazonalidade adotada foi trimestral, adotando os períodos: dezembro, janeiro e fevereiro (DJF); março, abril e maio (MAM); junho, julho e agosto (JJA); setembro, outubro e novembro (SON).

Usando a base de dados do ERA-Interim, uma visão geral de H_s e T_e na área de estudo foi realizada através da construção de mapas de ambos os parâmetros. Para o mapeamento utilizou-se o software SAGA[®] de acordo com o procedimento descrito no Apêndice B. Mais informações sobre o software podem ser obtidas no seu *User's Manual* (CIMMERY, 2010). A função do mapeamento apresentado é apenas qualitativa.

A caracterização de H_s foi feita em termos dos parâmetros estatísticos: média, máximo, 95 percentil (95%) e desvio padrão (σ). Adicionalmente, foi calculada a frequência de ocorrência de ondas acima de 2 m. O T_e não apresentou nenhuma variação significativa, portanto foi caracterizado apenas em termos da média. Também foi estimada a distribuição direcional e a frequência de ocorrência bivariável em função de H_s e T_e . A distribuição direcional foi discretizada utilizando-se bins de 30°. O Apêndice D apresenta o mapeamento qualitativo de vários desses parâmetros.

A partir dos valores de H_s e T_e , a potência offshore das ondas foi calculado utilizando-se a Equação 26. Assim como para H_s e T_e , uma análise anual e outra sazonal foi realizada para a potência ondomotriz, com a adição de uma análise mensal. Os mesmos parâmetros de média, máximo, 95% e σ foram calculados. Adicionalmente, três coeficientes de variabilidade

temporal definido por Cornett (2008) foram calculados. Eles são: o coeficiente de variação (*COV*), o índice de variabilidade sazonal (*SV*) e o índice de variabilidade mensal (*MV*), respectivamente calculados pelas Equações 59 a 61.

$$COV = \frac{\sigma}{\bar{P}} \quad (59)$$

onde σ é o desvio padrão da série da potência ondomotriz, e \bar{P} é a potência ondomotriz média.

$$SV = \frac{P_{S1} - P_{S4}}{P_{ano}} \quad (60)$$

onde P_{S1} é a potência média do trimestre mais energético, P_{S4} é a potência média do trimestre menos energético, e P_{ano} é a potência ondomotriz média anual.

$$MV = \frac{P_{M1} - P_{M12}}{P_{ano}} \quad (61)$$

onde P_{M1} é a potência média do mês mais energético e P_{M12} é a potência ondomotriz do mês menos energético.

5.3.3 Metodologia das Análises de Desempenho dos WEC

Para a análise de desempenho foram selecionados três WEC com características diferentes entre si, e cujo local indicado de instalação seja na região offshore: o Pelamis, o AquaBuoy, e o Wave Dragon, respectivamente dispositivos do tipo, atenuador, ponto absorvedor, e galgamento (e exterminador).

Para cada um dos dispositivos apresentados foi identificada na literatura a sua matriz de potência, ou seja, o quanto de energia o WEC consegue converter para um determinado estado de mar caracterizado pela altura significativa e o período de energia. Essas matrizes são apresentadas no Apêndice C.

A avaliação do desempenho dos WEC foi dividida em três análises: a análise global de desempenho, a análise da dependência direcional, e a análise de escala.

5.3.3.1 Metodologia da Análise Global de Desempenho

Utilizando a matriz de potência de cada um dos dispositivos selecionados (Apêndice C) e a frequência de ocorrência de estados de mar (H_s e T_e) em toda a área de estudo, foi estimada: a potência elétrica média, utilizando a Equação 62; a produção elétrica anual, utilizando a Equação 63; e o fator de capacidade, utilizando a Equação 64. O fator de capacidade é definido como a razão entre a potência elétrica média e a potência elétrica máxima convertida pelo WEC, denominada potência nominal.

$$P_e = \sum_{i=1}^{n_T} \sum_{j=1}^{n_H} f_{ij} P_{ij} \quad (62)$$

onde f_{ij} é a frequência de ocorrência de um estado de mar correspondendo a coluna j e a linha i da matriz de potência, P_{ij} é a potência elétrica convertida pelo WEC para esse mesmo estado de mar.

$$PEA = \left(\sum_{i=1}^{n_T} \sum_{j=1}^{n_H} f_{ij} P_{ij} \right) \cdot 8760 \quad (63)$$

onde 8760 indica a quantidade de horas de um ano.

$$C_f = \frac{P_e}{P_n} \quad (64)$$

onde P_e é a potência elétrica média convertida pelo WEC e P_n é a potência nominal do WEC.

Com os resultados obtidos, e utilizando o software SAGA[®], o mapeamento qualitativo de cada um desses parâmetros foi realizado, conforme consta no Apêndice E.

Em seguida, foi analisado a variação da potência elétrica média, da produção elétrica anual e do fator de capacidade ao longo da costa utilizando os 49 pontos selecionados. Em seguida foi realizada a comparação entre os dispositivos.

Adicionalmente, uma comparação dos resultados obtidos com o de outros trabalhos realizados para diferentes locais ao redor do mundo foi feita.

5.3.3.2 Metodologia da Análise da Dependência Direcional

Nessa análise, os WEC selecionados foram considerados sem controle direcional e instalados de forma que a sua direção ótima de captura esteja alinhada com a direção média das ondas incidentes no local.

A direção ótima de captura depende do dispositivo. Para os atenuadores (como o Pelamis) ela é paralela ao eixo principal. Para os dispositivos exterminadores (como o Wave Dragon), a direção ótima considerada é perpendicular ao eixo principal. Para o Wave Dragon, especificamente, o eixo principal foi considerado paralelo à frente da rampa do dispositivo. Finalmente, os pontos absorvedores (como o AquaBuoy), em geral, são independentes da direção. Assim, apenas o Pelamis e o Wave Dragon foram considerados.

Na análise, o intervalo de direção da onda incidente que o WEC consegue aproveitar para converter em energia elétrica foi aumentado em 10° a cada vez até atingir os 360°. Assim, utilizando a Equação 64 o fator de capacidade para cada intervalo de direção dos WEC foi calculado.

5.3.3.3 Metodologia da Análise de Escala

Nessa análise, foi realizada uma redução de escala nos WEC de forma a otimizar o dispositivo para as condições de onda apresentadas pela área de estudo. A metodologia utilizada segue a proposta por Bozzi, Archetti e Passoni (2014), que utiliza a similaridade do número de Froude entre protótipo e modelo para realizar a redução de escala.

O número de Froude é um adimensional que relaciona forças inerciais e forças gravitacionais e que é significativo para escoamentos com efeito de superfície livre, como é o caso das ondas sob os WEC. O número de Froude é definido pela Equação 65.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL_c}} \quad (65)$$

onde V é a velocidade da onda (m/s), g é a força gravitacional (m/s^2) e L_c é uma medida de comprimento característico (m).

Assim, para que haja similaridade entre modelo e protótipo, os respectivos números de Froude tem que ser iguais (Equação 66). Substituindo o valor de cada um temos que a igualdade

entre eles é dada pela Equação 67. Rearranjando a Equação 67 conforme apresentado na Equação 68, podemos definir a relação entre comprimentos como λ . O termo λ também é conhecido por fator de escala.

$$Fr_P = Fr_M \quad (66)$$

$$\frac{V_P}{\sqrt{gL_P}} = \frac{V_M}{\sqrt{gL_M}} \quad (67)$$

$$\left(\frac{V_M}{V_P}\right)^2 = \frac{L_M}{L_P} = \lambda \quad (68)$$

A partir da Equação 68 pode-se definir a relação de similaridade entre qualquer outra medida.

Considerando que velocidade é uma medida da razão entre comprimento e tempo ($V = L/T$), temos que a relação de similaridade entre os períodos de protótipo e modelo é dada pela Equação 69.

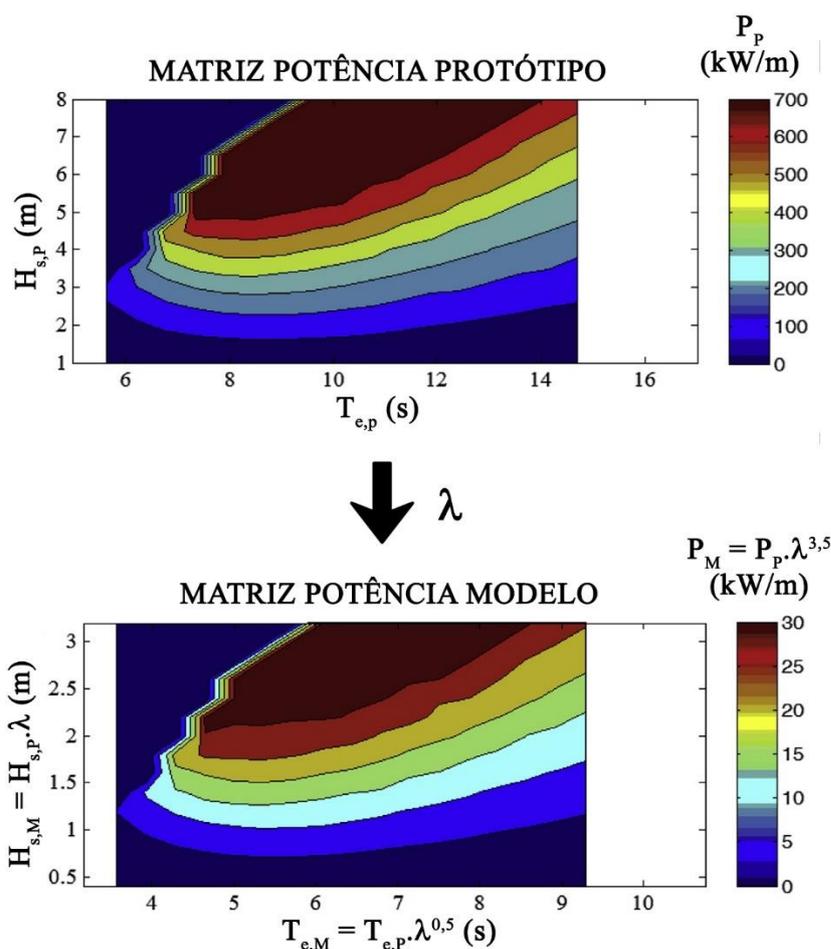
$$\frac{T_M}{T_P} = \sqrt{\lambda} \quad (69)$$

De forma semelhante, considerando que a potência é uma relação entre trabalho, τ , e tempo, T , ($P = \tau/T = F.L/T = M.L^2/T^3$), e que a relação entre as massas é dada pela razão entre as massas específicas do fluido escoando (ρ_P/ρ_M), e que para modelo e protótipo a massa específica é a mesma, no caso a da água, tem-se que a similaridade entre a potência de protótipo e modelo pode ser dada pela Equação 70.

$$\frac{P_M}{P_P} = \lambda^{3,5} \quad (70)$$

Portanto, a metodologia utilizada por Bozzi, Archetti e Passoni (2014) propõe que ao se reduzir a escala do WEC, a matriz de potência dele também será escalonada, no caso, com os valores de altura significativa e período de energia dos bins, e da potência elétrica convertida sendo reduzidos de acordo com as Equações 68 a 70. A Figura 27 ilustra esse processo.

Figura 27 - Escalonamento da matriz de potência do WEC



Fonte: Adaptado de Bozzi, Archetti e Passoni (2014).

Seguindo a metodologia, a escala dos WEC foi reduzida em intervalos de $\lambda = 0,01$ desde λ igual a 1,00 até λ igual a 0,01. Para cada nova escala foram calculados os valores de P_e , PEA e C_f . Em seguida, a escala em que o fator de capacidade foi máximo foi identificada.

5.3.4 Metodologia da Análise Multi-Critério

Nesta última etapa da metodologia foi realizada uma análise multi-critério a fim de definir os locais com maior potencial para aproveitamento do recurso das ondas. A análise multi-critério utilizada foi baseada nas técnicas AHP e TOPSIS. O método AHP foi escolhido por ser o mais utilizado dentre os métodos multi-critério (MARINS, SOUZA e BARROS, 2009, p. 1779). Já o método TOPSIS foi escolhido por necessitar apenas dos pesos associados a cada critério como entrada de dados, e por apresentar uma saída de dados de fácil compreensão (ISHIZAKA e NEMERY, 2013, p. 215). Essa mesma combinação de técnicas foi utilizada por

Le *et al.* (2015) para analisar os locais mais adequados para o aproveitamento dessa fonte de energia na Tasmânia, Austrália.

Tendo como área de estudo o Brasil, podemos citar o trabalho de Souza (2011) que utilizou a técnica AHP para analisar, dentro do projeto EONDAS, uma parceria entre a Petrobras e a FURG, qual seria o WEC mais adequado para instalação no litoral do Rio Grande do Sul. Nesse trabalho foram analisados quatro dispositivos, para dois cenários diferentes, utilizando sete critérios. Em cada um dos cenários, os critérios eram os mesmos, o que mudava era a ordem de prioridade. Os critérios foram: adaptabilidade, viabilidade da empresa, manutenibilidade, segurança, desempenho socioambiental, eficiência da área ocupada, transferência tecnológica.

Alguns aspectos diferem do trabalho de Souza (2011) deste daqui. Primeiro pode ser citado o foco. Souza (2011) busca muito mais definir os equipamentos mais adequados a um local do que definir locais com potencial para aproveitamento. Assim, critérios como batimetria, potência do local, variabilidade temporal e outras características físicas do local não são consideradas. Além disso, neste trabalho a técnica TOPSIS é utilizada para definir os coeficientes de proximidade relativa à solução ideal, enquanto que a técnica AHP fica responsável por definir o peso de cada critério.

Com relação ao trabalho de Le *et al.* (2015), a grande diferença está nos critérios. Enquanto que ele só considera como importante as características físicas do local, a potência das ondas, a batimetria e a topografia do fundo oceânica, neste trabalho além da potência ondomotriz, é utilizado com um dos critérios a variabilidade temporal do clima de ondas. E além disso, é incorporado um critério relativo ao desempenho dos dispositivos naquele determinado local, no caso, o fator de capacidade definido pela Equação 64.

Assim, baseados nos trabalhos citados foram definidos sete critérios a serem analisados, onde a ordem de importância adotada é a que segue:

- Fator de capacidade;
- Potência ondomotriz local;
- Coeficiente de variabilidade temporal;
- Batimetria
- Área de proteção ambiental;
- Distância do local em relação ao porto mais próximo;
- Distância do local em relação à costa.

Para a construção das matrizes de comparação par a par utilizadas no método AHP para definir os pesos dos critérios, foram utilizadas duas situações. Na primeira situação os critérios tiveram prioridades diferentes entre si seguindo a seguinte ordem crescente: fator de capacidade; potência ondomotriz; coeficiente de variabilidade temporal; batimetria; área de proteção ambiental; distância ao porto mais próximo; e distância em relação à costa. Na segunda situação definiu-se dois grupos de critérios onde os elementos de cada grupo apresentavam prioridades iguais, enquanto que primeiro grupo apresentava uma prioridade maior que o segundo. O primeiro grupo era composto pelos critérios relacionados ao aproveitamento da onda: potência ondomotriz, coeficiente temporal e fator de capacidade. Já o segundo grupo continha critérios relacionados à logística do local: distância à costa, distância do porto mais próximo, batimetria e área de proteção ambiental.

Na primeira situação, o primeiro critério (fator de capacidade) foi considerado como tendo importância igual a 2 na escala de Saaty (Tabela 8) em relação ao segundo critério (potência ondomotriz), importância 3 em relação ao terceiro critério (coeficiente temporal), e assim por diante. O segundo critério (potência ondomotriz) foi considerado como tendo importância $\frac{1}{2}$ em relação ao primeiro critério (fator de capacidade), importância 2 em relação ao terceiro critério (coeficiente temporal), importância 3 em relação ao quarto critério (batimetria), e assim por diante. A mesma lógica foi utilizada para os demais critérios. Dessa forma, a matriz de prioridades com todos os critérios tendo prioridades diferentes em si foi construída através da comparação par a par, conforme apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 - Matriz de prioridades com pesos diferentes

	Potência ondomotriz	Distância à costa	Distância de porto	Coeficiente temporal	Fator de capacidade	Batimetria	Proteção Ambiental
Potência ondomotriz	1	6	5	2	1/2	3	4
Distância à costa	1/6	1	1/2	1/5	1/7	1/4	1/3
Distância de porto	1/5	2	1	1/4	1/6	1/3	1/2
Coeficiente temporal	1/2	5	4	1	1/3	2	3
Fator de capacidade	2	7	6	3	1	4	5
Batimetria	1/3	4	3	1/2	1/4	1	2
Proteção ambiental	1/4	3	2	1/3	1/5	1/2	1

Fonte: Autor.

Com relação à segunda situação, os critérios fator de capacidade, potência ondomotriz e coeficiente temporal foram considerados como tendo a mesma prioridade entre si, mas tendo importância forte com relação aos demais critérios. Assim, optou-se por utilizar o valor 6 na escala de Saaty para definir a comparação entre os dois grupos de critério. Assim, a matriz de comparação par a par na segunda situação foi construída conforme mostra a Tabela 13.

Tabela 13 - Matriz de prioridades com pesos iguais

	Potência ondomotriz	Distância à costa	Distância de porto	Coeficiente temporal	Fator de capacidade	Batimetria	Proteção ambiental
Potência ondomotriz	1	6	6	1	1	6	6
Distância à costa	1/6	1	1	1/6	1/6	1	1
Distância de porto	1/6	1	1	1/6	1/6	1	1
Coeficiente temporal	1	6	6	1	1	6	6
Fator de capacidade	1	6	6	1	1	6	6
Batimetria	1/6	1	1	1/6	1/6	1	1
Proteção ambiental	1/6	1	1	1/6	1/6	1	1

Fonte: Autor.

Uma vez construída a matriz de prioridade para cada uma das duas situações utilizou-se o método do autovalor para calcular o peso de cada um dos sete critérios. Nesse método, o peso dos critérios é o vetor necessário para satisfazer a igualdade mostrada na Equação 37. Ou seja, é o vetor que quando multiplicado pela matriz de prioridades, e quando multiplicado pelo autovalor da matriz de prioridades, satisfaz uma igualdade.

Após calcular o vetor peso dos critérios, foi realizada a checagem da consistência da matriz de prioridades utilizando as Equações 42 e 43.

Uma vez que os pesos foram definidos, foi aplicada a técnica TOPSIS para cada um dos 49 pontos selecionados ao longo da costa. Aqui, nove cenários foram avaliados, pois foram analisados três WEC (AquaBuoy, Pelamis e Wave Dragon), além de três coeficientes de variabilidade temporal diferentes (*COV*, *SV* e *MV*). A Tabela 14 ilustra os nove cenários.

A primeira etapa da técnica TOPSIS foi a construção da matriz de decisão normalizada. Neste trabalho utilizou-se o método da normalização ideal, definido pela Equação 45, para esse fim. Dessa forma, para cada critério, os valores dos 49 pontos analisados foram divididos pelo maior valor dentro de cada critério.

Tabela 14 - Cenários analisados pela técnica TOPSIS

Critério	Cenário								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Potência ondomotriz local									
Coeficiente Temporal - COV									
Coeficiente Temporal - SV									
Coeficiente Temporal - MV									
Fator de Capacidade - AquaBuoy									
Fator de Capacidade - Pelamis									
Fator de Capacidade - Wave Dragon									
Distância relativa à costa									
Distância ao porto mais próximo									
Batimetria									
Área de proteção ambiental									

As hachuras indicam os sete critérios utilizados em cada cenário. Fonte: Autor.

Em seguida, para a construção da matriz de pesos normalizados, definida pela Equação 47, os valores da matriz normalizada foram multiplicados pelos pesos dos critérios calculados anteriormente no método AHP.

Em seguida, para cada critério foram definidas as soluções ideal (PIS) e não ideal (NIS). Esses valores foram definidos em relação aos valores máximos ou mínimos da matriz de decisão de pesos normalizada. A Tabela 15 indica os valores adotados como PIS e NIS.

Tabela 15 - Valor de PIS e NIS para cada critério

Critério	PIS	NIS
Potência ondomotriz	Maior valor	Menor valor
Distância à costa	Menor valor	Maior valor
Distância de porto	Menor valor	Maior valor
Fator de capacidade	Maior valor	Menor valor
Coeficiente temporal	Menor valor	Maior valor
Batimetria	Menor valor	Maior valor
Proteção ambiental	Maior valor	Menor valor

Fonte: Autor.

Definidos os valores de PIS e NIS, foi calculada para cada critério a distância deles em relação aos valores de PIS e NIS utilizando as Equações 48 e 49, respectivamente. Por fim, utilizando a Equação 50 foi calculado o coeficiente de proximidade relativa para a solução ideal. Os maiores valores desse parâmetro indicam os locais que mais se adequam aos critérios adotados, e conseqüentemente, são mais adequados para o aproveitamento da energia ondomotriz.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta sessão são apresentados os resultados obtidos seguindo a metodologia. Ele está estruturado em quatro tópicos visando uma melhor organização da apresentação do conteúdo. São eles: validação dos dados de reanálise; caracterização do clima de ondas; análise de desempenho dos WEC; aplicação da análise multicritério.

6.1 VALIDAÇÃO DOS DADOS DE REANÁLISE

Os modelos de onda normalmente são validados em relação a dados de boias, como pode ser observado em Gallagher *et al.* (2016) e Emmanouil *et al.* (2016), os quais avaliaram o potencial das ondas, respectivamente, da Irlanda usando o modelo WW3 e da Grécia usando o modelo WAM. Entretanto, devido à falta de dados de medição de ondas in situ, principalmente fora da Europa e da costa dos Estados Unidos, alguns trabalhos estão usando dados de altimetria para validar esses modelos. Zhou *et al.* (2015), por exemplo, usa dados do altímetro Jason (não especificado se o 1 ou o 2) para validar um modelo SWAN usado para avaliar o potencial do Golfo de Beibu, China. Dimitrova, Kortcheva e Galabov (2013) validou um modelo WW3 para o Mar Negro usando dados do altímetro Jason-2. E Portilla, Sosa e Cavaleri (2013) usou dados de várias missões altimétricas (ENVISAT, Jason-1 e Jason-2) para validar os dados de reanálise do ERA-Interim em dois pontos: um no Oceano Atlântico Norte e outro no Oceano Pacífico Equatorial.

Neste trabalho, dados de reanálise do ERA-Interim entre 01/07/2008 e 31/11/2013 foram comparados estatisticamente com dados do altímetro Jason-2/OSTM. A comparação estatística foi baseada nos parâmetros: bias, RMSE, razão entre os desvios padrão ($\sigma_{rea}/\sigma_{sat}$), coeficiente de correlação de Pearson (R), e índice de espalhamento (SI). Os dados utilizados foram obtidos junto às agências ECMWF (<http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>) e AVISO⁺ (<http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/windwave-products.html>).

Os dados de altimetria passaram antes por um pré-processamento, a fim de igualar temporalmente e espacialmente a resolução com os dados de reanálise, conforme descrito na metodologia. Em seguida, a comparação entre ERA-Interim e Jason-2/OSTM foi realizada para oito dos quarenta e nove pontos identificados na Figura 23. A Tabela 16 apresenta os valores

médios anuais de altura significativa da onda ($H_{s,era}$) e do período de energia da onda ($T_{e,era}$) calculados usando os dados do ERA-Interim. Apresenta também os valores médios anuais dos dados do Jason-2/OSTM de altura significativa da onda na banda Ku ($H_{s,jas-ku}$) e na banda C ($H_{s,jas-c}$), e dos períodos de energia da onda $T_{e,hwa-ku}$ e $T_{e,hwa-c}$ derivados a partir da metodologia de Hwang *et al.* (1998), e $T_{e,qui}$, calculado a partir de Quilfen *et al.* (2004).

Tabela 16 - Características médias anuais da onda para oito locais da área de estudo

	Localização		$H_{s,era}$ (m)	$H_{s,jas-ku}$ (m)	$H_{s,jas-c}$ (m)	$T_{e,era}$ (s)	$T_{e,hwa-ku}$ (s)	$T_{e,hwa-c}$ (s)	$T_{e,qui}$ (s)	n
	Latitude	Longitude								
P4	2° N	47° W	1,60	1,55	1,55	7,40	7,22	7,24	7,49	59
P9	2° S	42° W	1,63	1,59	1,59	7,13	6,75	6,73	7,12	62
P11	2° S	40° W	1,72	1,72	1,70	7,41	7,07	7,02	7,41	67
P20	9° S	34° W	1,75	1,77	1,74	8,14	7,70	7,61	7,95	61
P27	16° S	37° W	1,62	1,62	1,64	8,09	7,56	7,57	7,78	64
P36	24° S	42° W	1,87	1,88	1,92	8,43	8,39	8,55	8,59	60
P42	27° S	47° W	1,90	2,02	2,02	8,29	8,29	8,33	8,52	57
P48	33° S	50° W	1,92	2,12	2,16	7,94	8,15	8,27	8,36	55

Os valores apresentados foram calculados a partir dos dados de reanálise do ERA-Interim e dos dados do altímetro Jason-2/OSTM, para o período entre 01/07/2008 e 31/11/2013. Fonte: Autor.

Como pode ser observado, o valor de $H_{s,era}$ é sistematicamente inferior em comparação ao de $H_{s,jas-ku}$ e ao de $H_{s,jas-c}$. Apenas nos pontos da parte norte (P4 e P9) os valores dos dados e altimetria foram maiores que os de reanálises. *A priori*, isso indica uma pequena subestimação dos dados de altura significativa do ERA-Interim em relação aos de medição indireta para a maior parte da costa do Brasil. O inverso ocorre para os períodos de energia, com a reanálise sendo normalmente maior que os dados de altimetria. Entretanto, esse fato pode ser devido aos erros envolvidos no cálculo dos períodos de energia presente neste trabalho.

Os resultados da comparação estatística são apresentados na Tabela 17 para os mesmos oito pontos.

Tabela 17 - Análise estatística anual entre a reanálise ERA-Interim e o altímetro Jason-2

Parâmetros Estatísticos	Ponto P4			Ponto P9			Ponto P11			Ponto P20		
	H_s (m)	$T_{e,hwa}$ (s)	$T_{e,qui}$ (s)									
Bias	0,05	0,18	-0,09	0,04	0,38	0,01	0,01	0,33	-0,01	-0,02	0,44	0,19
RMSE	0,17	0,74	0,71	0,24	1,01	0,92	0,21	0,88	0,81	0,19	0,97	0,87
$\sigma_{rea}/\sigma_{sat}$	1,17	0,82	0,80	1,10	0,73	0,63	1,10	0,70	0,60	1,00	0,87	0,80
R	0,87	0,57	0,59	0,67	0,34	0,32	0,75	0,57	0,57	0,78	0,50	0,50
SI	0,10	0,10	0,09	0,15	0,14	0,13	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11
Parâmetros Estatísticos	Ponto P27			Ponto P36			Ponto P42			Ponto P48		
	H_s (m)	$T_{e,hwa}$ (s)	$T_{e,qui}$ (s)									
Bias	-0,01	0,53	0,31	-0,01	0,04	-0,16	-0,12	0,00	-0,23	-0,20	-0,22	-0,43
RMSE	0,32	1,18	1,10	0,37	1,56	1,41	0,37	1,43	1,36	0,47	1,47	1,46
$\sigma_{rea}/\sigma_{sat}$	1,11	0,84	0,75	1,22	1,31	1,17	1,11	1,22	1,15	1,22	1,12	1,06
R	0,80	0,48	0,44	0,84	0,57	0,60	0,83	0,50	0,53	0,77	0,35	0,37
SI	0,17	0,14	0,14	0,18	0,19	0,16	0,17	0,17	0,16	0,20	0,18	0,17

Os dados apresentados correspondem a oito pontos selecionados localizados na área de estudo, para o período de 01/07/2008 e de 31/11/2013. Fonte: Autor.

Pode-se notar que existe uma correlação aceitável entre as duas bases de dados, particularmente em relação à altura significativa. Para todos os oito pontos, o *bias* de H_s é inferior a $|0,20|$ m e R é próximo ou superior à 0,70. Os outros parâmetros também indicam resultados aceitáveis, com *SI* abaixo de 0,20, *RMSE* menor que 0,47 e razão de desvio padrão próximo a 1. Além disso, os valores negativos de *bias* indicam que os valores de altura significativa da onda são menores que os dados de altímetro. Assim, enquanto na parte norte (P4, P9 e P11) da área de estudo os dados de reanálise parecem estar levemente superestimados, no restante da área (P20, P27, P36, P42 e P48) a altura significativa está subestimada, com a diferença entre as bases de dados aumentando na direção sul.

Uma subestimação da altura significativa da onda influencia diretamente a potência da onda offshore disponível, uma vez que, conforme apresentado na Equação 26, a potência depende do quadrado da altura significativa. Valores de potência da onda subestimados são preferíveis à valores superestimados, isso porque, ocorre perda de energia na onda quando da mudança da região offshore para regiões de águas intermediárias/rasas. Assim, a potência da onda offshore disponível subestimada apresentará valor mais próximo ao real em águas mais rasas do que se ela fosse superestimada.

Os resultados apresentados na Tabela 17 são um pouco maiores que os obtidos por Portilla, Sosa e Cavaleri (2013) para os oceanos Atlântico Norte e Pacífico Equatorial, utilizando comparação similar entre os dados de altímetro e de reanálise do ERA-Interim. A diferença encontrada provavelmente está relacionada ao número de dados utilizados para estimar os parâmetros estatísticos. Como pode ser observado na Tabela 16, o número de dados usados é muito pequeno para ser conclusivo. Além disso, o intervalo de cinco anos é pequeno em relação aos 35 anos que foram usados na caracterização da onda.

Portanto, apesar dos resultados indicarem uma correlação aceitável entre os dados de reanálise e altimetria, uma validação mais robusta é necessária. O uso de um intervalo maior e o uso de mais satélites pode minimizar os erros introduzidos. Parte desses erros ocorrem pelo fato do Jason-2/OSTM ser um dos dados assimilados no modelo de onda do ECMWF. Assim, medições *in situ* são fortemente recomendadas em trabalhos futuros na área, uma vez que elas são fontes de dados completamente independentes daqueles assimilados pelo modelo de onda.

Entretanto, de acordo com Rusu e Onea (2016), o ERA-Interim é uma das bases de dados de maior credibilidade, apesar dos vários erros inerentes presentes. Ele é o produto de vários anos de pesquisa científica de ponta e é utilizado diretamente, ou como dados de entrada, em várias pesquisas sobre energia das ondas ao redor do mundo. Contestabile, Ferrante e

Vicinanza (2015), por exemplo, utilizaram os dados do ERA-Interim para estimar a potência das ondas na região Sul do Brasil.

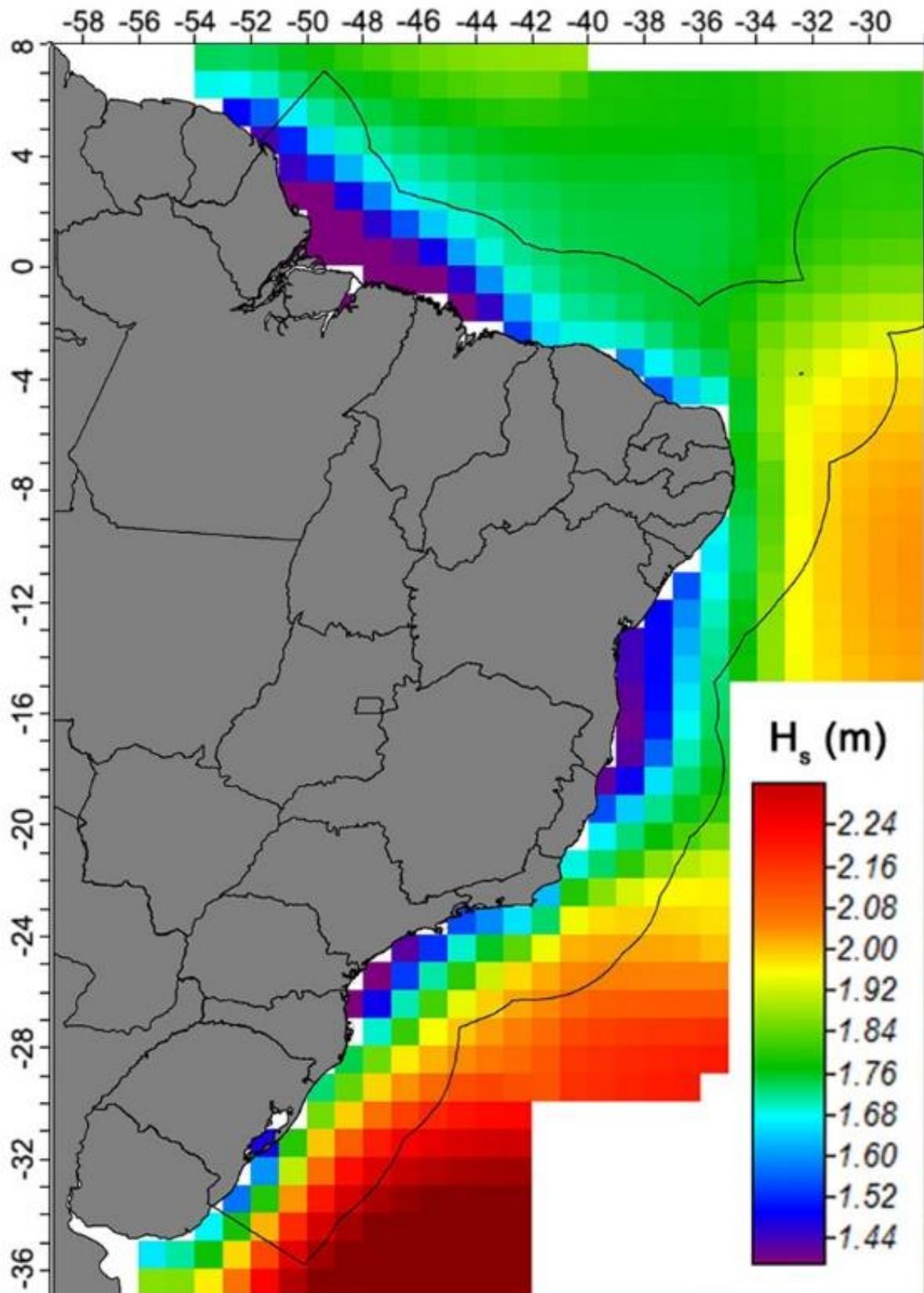
6.2 ANÁLISE DO CLIMA DE ONDAS

As Figura 28 a 31 apresentam, respectivamente, o mapeamento da média anual de H_s , média anual de T_e e média anual do recurso ondomotriz na área de estudo, produzidos utilizando os dados do ERA-Interim de todos os 546 pontos mostrados na Figura 23, e o software SAGA[®]. O mapeamento foi realizado utilizando-se uma interpolação ponderada com o inverso do quadrado da distância.

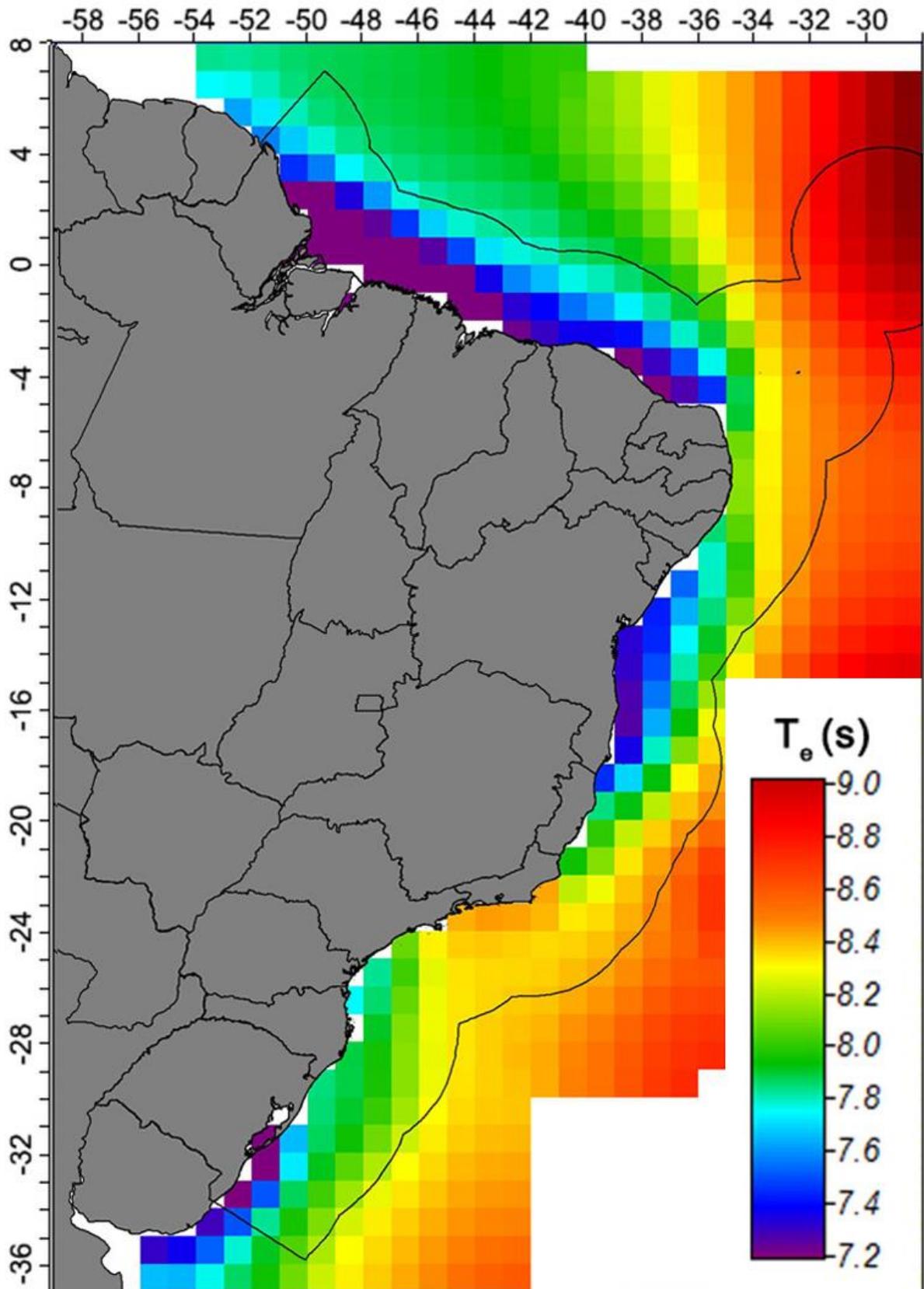
Analisando os mapas, pode-se observar um aumento dos valores médios relacionados com o afastamento em relação à costa. Isso acontece principalmente devido ao aumento da batimetria. Na região Leste, a plataforma continental é mais estreita do que no restante da costa, como pode ser observado na Figura 23. Conseqüentemente, o valor da média anual de H_s é maior do que o das áreas adjacentes onde a plataforma continental é mais larga. Além disso, soma-se o fato dessa região sofrer a influência dos ventos alísios de sudeste durante o ano inteiro, enquanto que a parte sul da região Leste que envolve parte da Bahia, por estar numa área de transição entre os efeitos da ZCIT e do ASAS, apresenta valores de H_s menores.

É importante enfatizar que a Equação 26 foi utilizada também para a determinação do recurso ondomotriz em pontos com batimetria inferior a 100 m, como pode ser observado na Figura 23. Isso introduz uma certa incerteza nos valores desses pontos. Da mesma forma, a interpolação utilizada introduz certos erros. Porém, como informação qualitativa, essas incertezas não comprometem o entendimento do comportamento desses parâmetros na área de estudo. O Apêndice D apresenta mapeamentos semelhantes para todos os parâmetros citados nessa seção.

Os dados de H_s e T_e utilizados para a construção dos mapas mostrados na Figura 28 e na Figura 29, além de outros como direção média da onda, são derivados do espectro de onda bidimensional para cada local. O espectro de onda é a forma mais importante em que as ondas podem ser descritas (HOLTHUIJSEN, 2007). Como mencionado por Neill e Hashemi (2013), o correto conhecimento do espectro de ondas local é um fator importante para a seleção do tipo de WEC mais apropriado para um determinado local.

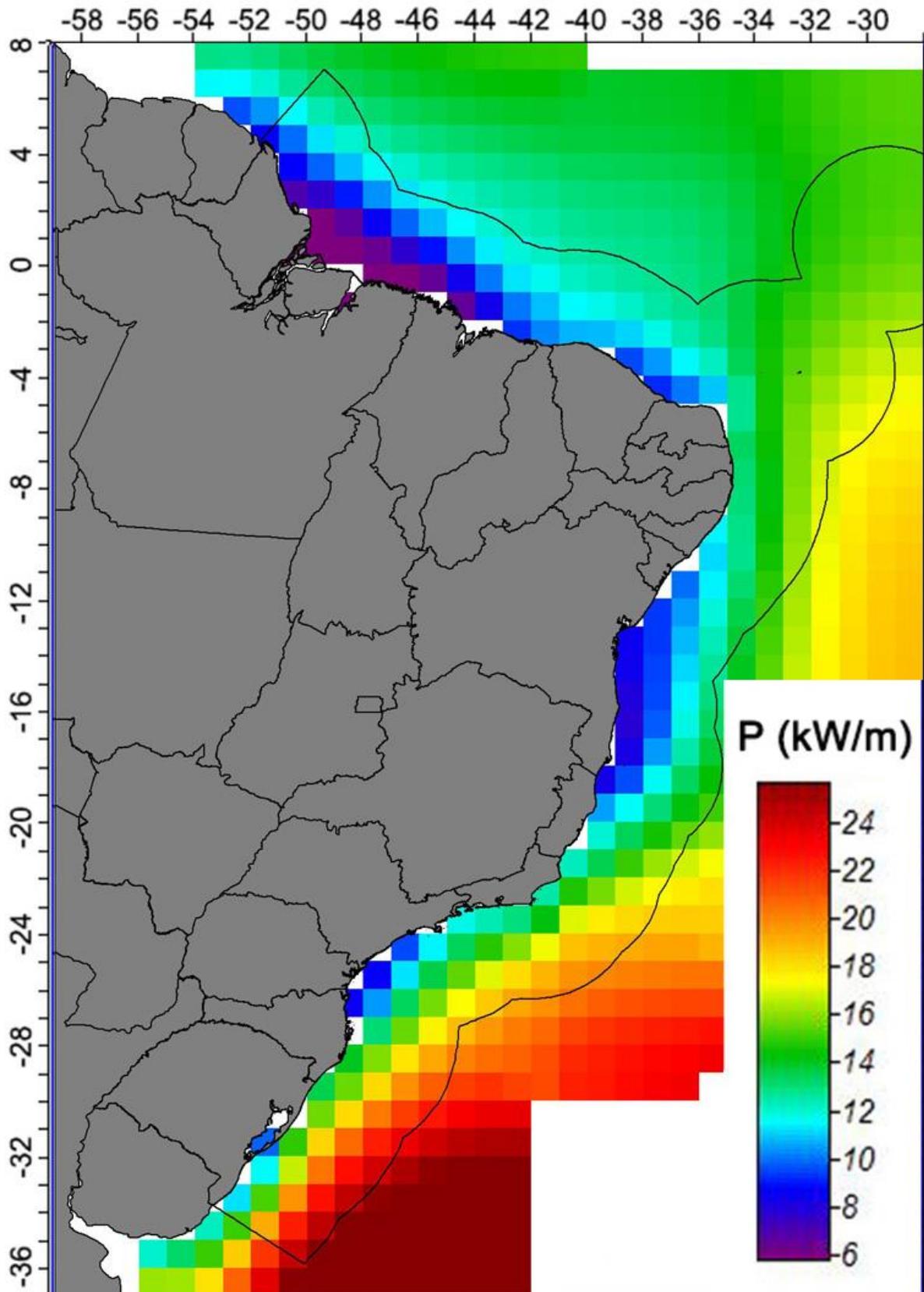
Figura 28 - Mapeamento dos dados de H_s do ERA-Interim

Média anual da altura significativa da onda. A linha preta indica o limite da ZEE. Fonte: Autor.

Figura 29 - Mapeamento dos dados de T_e do ERA-Interim

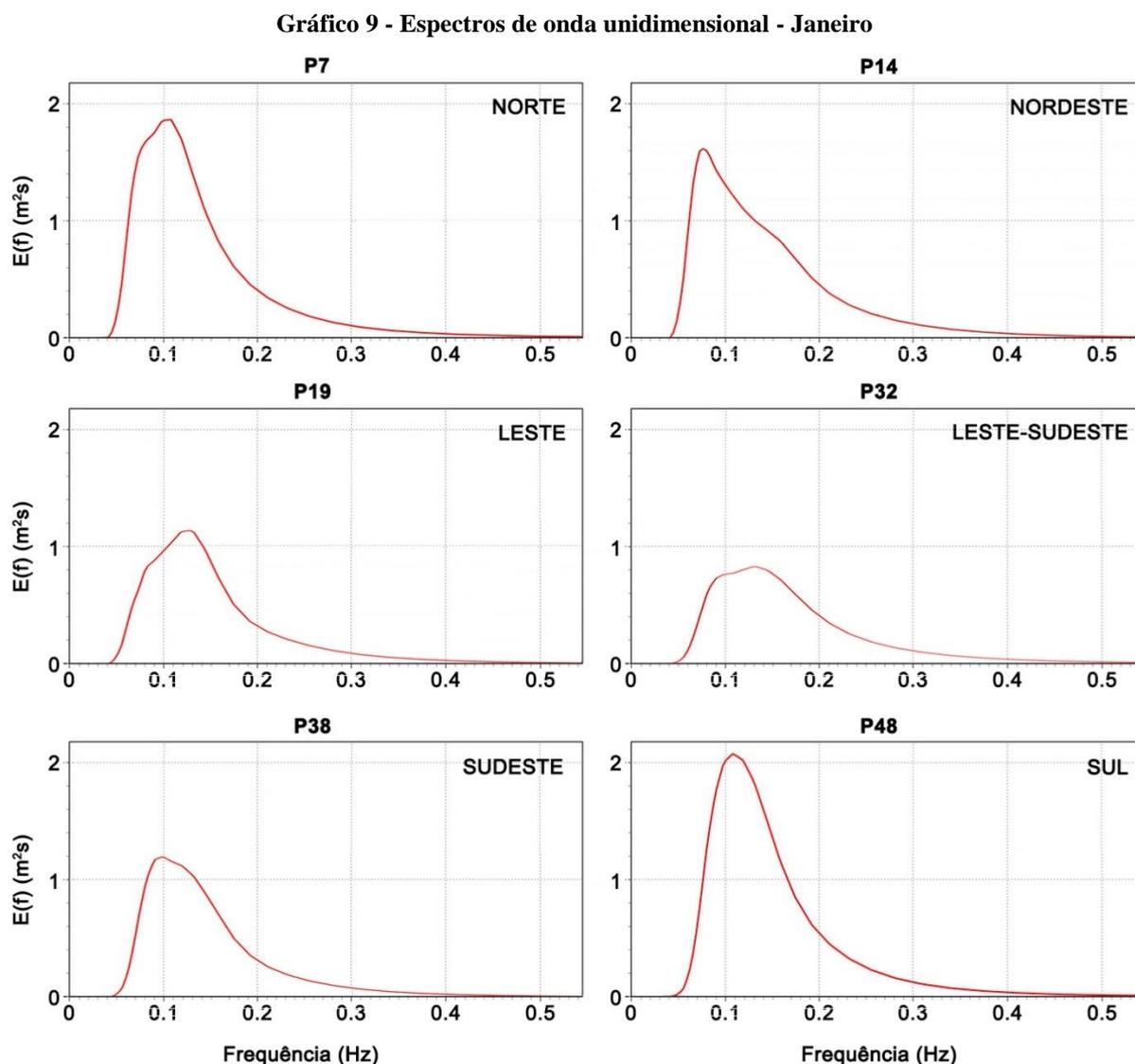
Média anual do período de energia da onda. A linha preta indica o limite da ZEE. Fonte: Autor.

Figura 30 - Mapeamento dos dados de P do ERA-Interim



Média anual da potência ondomotriz. A linha preta indica o limite da ZEE. Fonte: Autor.

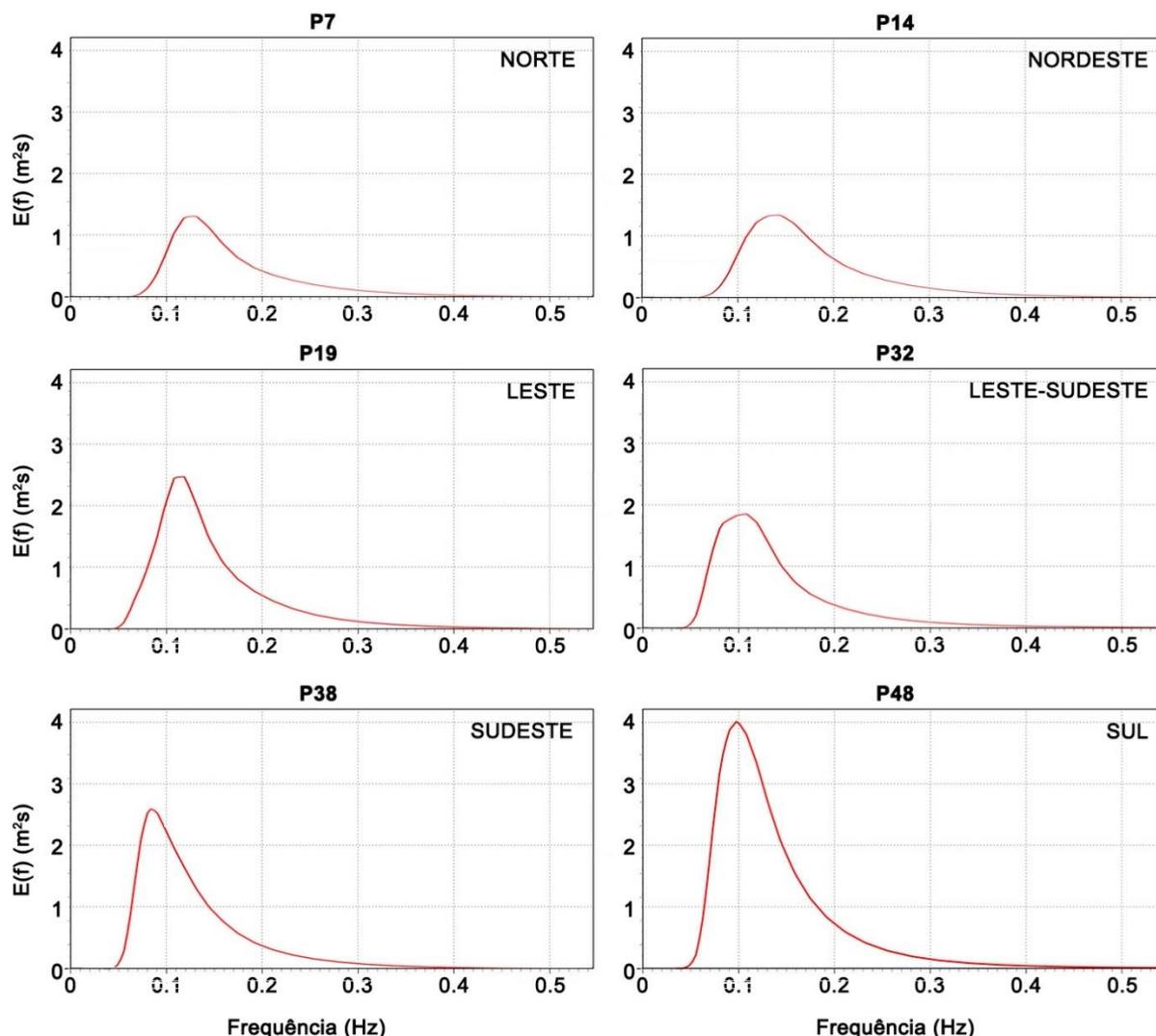
O Gráfico 9 mostra os espectros de ondas unidimensional (1D) médio do mês janeiro entre os anos de 1979 e 2015 para um ponto em cada uma das seis regiões definidas. Pode-se observar que os maiores valores ocorrem nos pontos P7 e P48, respectivamente nas regiões Norte e Sul.



No mês de janeiro (verão no Hemisfério Sul) a ZCIT está mais próxima ao Equador e a ASAS encontra-se mais ao Sul e afastada da costa. Dessa forma percebe-se um máximo na região Norte e uma diminuição dos valores para regiões mais ao sul (região Nordeste, Leste e Leste-Sudeste) devido ao enfraquecimento da influência da ZCIT. A partir do ponto P38 (região Sudeste) os valores aumentam novamente até atingir os máximos valores da costa brasileira na região Sul devido à atuação da ASAS, que apesar de se encontrar afastado da costa ainda consegue gerar ondas mais energéticas que as geradas pelos alísios no Norte e Nordeste.

O Gráfico 10, por sua vez, mostra os espectros de ondas 1D para o mês de julho nos mesmos pontos utilizados no Gráfico 9.

Gráfico 10 - Espectros de onda unidimensional - Julho



Espectros de onda 1D média para o mês de julho entre os anos de 1979 e 2015 para cada uma das regiões selecionados. Fonte: Autor.

No mês de julho (inverno no Hemisfério Sul) a ZCIT está posicionada mais ao norte. O ASAS também se encontra mais ao norte e próxima à costa brasileira. Assim, têm-se um aumento da energia das ondas em todas as regiões, com exceção da região Norte que apresenta uma diminuição. A Região Sul é a que apresenta ondas mais energéticas, com valores quase que o dobro das outras regiões. Essa intensificação das ondas tem relação com os ciclones extratropicais e os sistemas frontais que também atuam nessa área nesse período.

Observando-se os Gráfico 9 e Gráfico 10 pode-se identificar uma uniformidade energética, entre os meses de janeiro e julho para a região Nordeste. Fato esse justificado pela regularidade dos ventos alísios que atuam na região.

Os Gráfico 11 a 16 apresentam os espectros de onda bidimensional (2D) médio para os mesmos 6 pontos e para os mesmos meses usados anteriormente no espectro 1D. O espectro de onda 2D descreve a forma na qual a energia da onda é distribuída ao longo da frequência e da direção. Para praticamente todos os pontos apresentados o espectro de onda apresenta características bi-modais, com mais de um sistema de ondas sendo responsável pela energia total da onda.

De acordo com Araújo *et al.* (2003), sistemas bimodais são representados principalmente pela sobreposição de *wind-seas* estáveis com um sistema de *swell*, ou pela ocorrência de campos de *swell* próximos, ou pela ocorrência de sistemas de ondas de dois estágios relacionados com a passagem de uma frente fria.

Pode-se observar que nas regiões Norte e Nordeste no mês de janeiro há uma clara distinção entre dois sistemas de ondas. Um mais energético proveniente da direção Norte-Nordeste e um menos energético de Leste-Sudeste. Como no mês de janeiro a ZCIT está mais próxima do Equador, o sistema de ondas de Norte-Nordeste atuante nessas duas regiões é gerado pelos alísios de Nordeste, associado com ondas oriundas dos ciclones extratropicais que se intensificam no Hemisfério Norte nesse período (SILVA, 2013). Já os sistemas de ondas de Leste-Sudeste estão associados com os alísios de Sudeste.

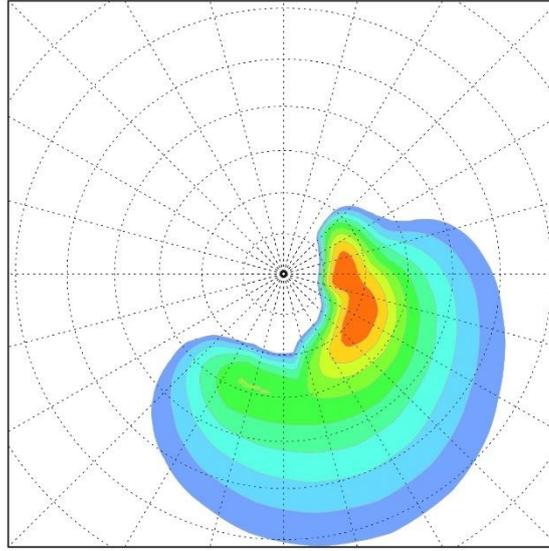
A região Leste no mês de janeiro também recebe ondas tanto de Norte-Nordeste quanto de Leste-Sudeste. A diferença em relação às regiões Norte e Nordeste é que a intensidade das ondas nas duas direções é praticamente a mesma. Além desses dois sistemas de onda, pode-se notar um de menor energia na direção Sul, possivelmente *swells* provenientes dos ventos do ASAS. Para a parte mais ao sul da região Leste a influência das ondas de Norte-Nordeste diminui devido ao aumento da latitude e pela própria geografia da costa, que deixa de ser voltada para o leste e se torna voltada para sudeste.

No mês de julho a ZCIT está mais ao norte e com isso a influência dos ventos do Hemisfério Norte diminuem. Assim, para as regiões Norte, Nordeste e Leste os sistemas de ondas formados pelos ventos alísios de Nordeste perdem força, enquanto que as ondas provenientes dos ventos alísios de Sudeste se intensificam devido à mudança de posição do ASAS.

Para a região Leste-Sudeste, Sudeste e Sul, o sistema atmosférico que mais atua no mês de janeiro é o ASAS com ventos de Nordeste. Sistemas frontais e ciclones extratropicais também atuam na região, mas ocorrem com menos frequência nessa época do ano (CAVALCANTI *et al.*, 2009).

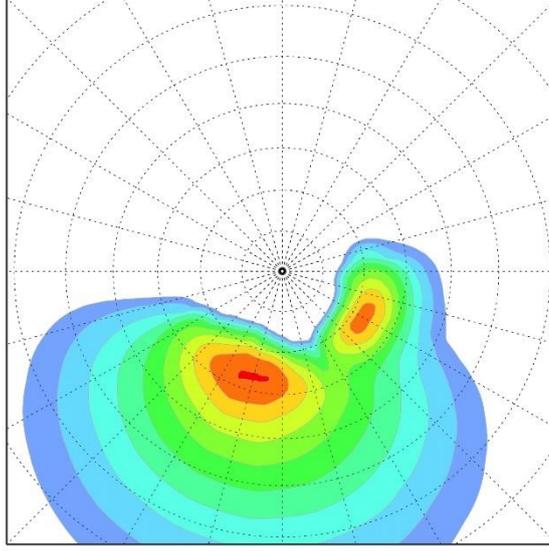
Gráfico 11 - Espectros de onda bidimensional para a região Norte

NORMALISED MEAN 2-D SPECTRUM from ERA-Interim
 January 1979-2015
 at (0.00N , -44.00E)
 Hs= 1.81 m, Tm= 8.76 s, Tp= 9.23 s
 Peakedness Qp = 0.74, Directional Spread = 0.56
 MWD = 206 degrees PWD = 180 degrees
 Propagation direction is with respect to North
 North is pointing upwards
 Concentric circles are every 0.05 Hz



P7

NORMALISED MEAN 2-D SPECTRUM from ERA-Interim
 July 1979-2015
 at (0.00N , -44.00E)
 Hs= 1.47 m, Tm= 6.62 s, Tp= 7.63 s
 Peakedness Qp = 0.81, Directional Spread = 0.65
 MWD = 261 degrees PWD = 270 degrees
 Propagation direction is with respect to North
 North is pointing upwards
 Concentric circles are every 0.05 Hz



P7

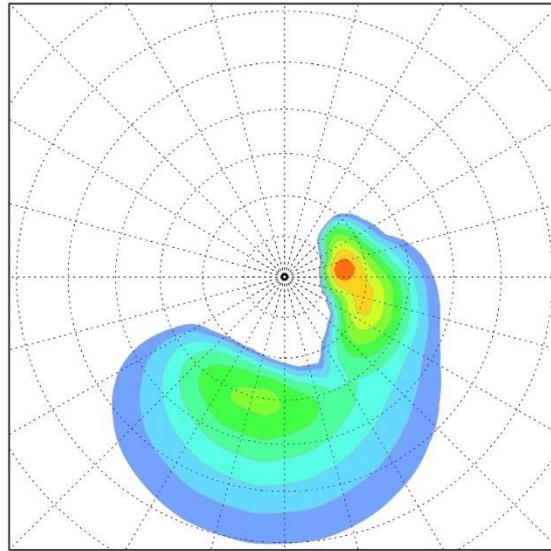
JANEIRO

JULHO

Espectros de onda 2D média para os meses de janeiro e julho entre os anos de 1979 e 2015. Fonte: Autor.

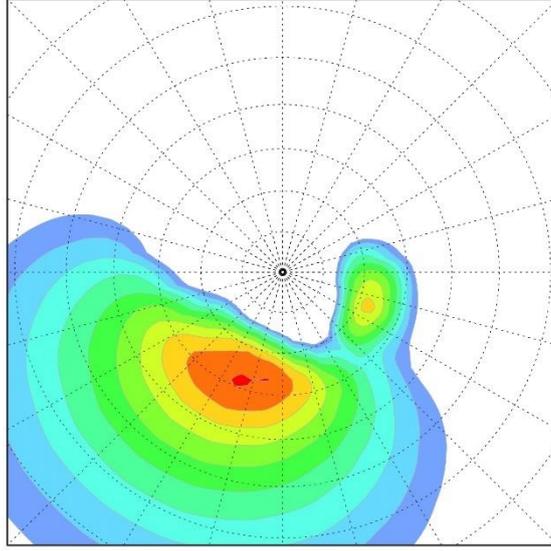
Gráfico 12 - Espectros de onda bidimensional para a região Nordeste

NORMALISED MEAN 2-D SPECTRUM from ERA-Interim
 January 1979-2015
 at (-4.00N , -37.00E)
 Hs= 1.72 m, Tm= 8.60 s, Tp= 13.51 s
 Peakedness Qp = 0.70, Directional Spread = 0.59
 MWD = 213 degrees PWD = 165 degrees
 Propagation direction is with respect to North
 North is pointing upwards
 Concentric circles are every 0.05 Hz



P14

NORMALISED MEAN 2-D SPECTRUM from ERA-Interim
 July 1979-2015
 at (-4.00N , -37.00E)
 Hs= 1.62 m, Tm= 6.35 s, Tp= 6.93 s
 Peakedness Qp = 0.81, Directional Spread = 0.64
 MWD = 281 degrees PWD = 285 degrees
 Propagation direction is with respect to North
 North is pointing upwards
 Concentric circles are every 0.05 Hz



P14

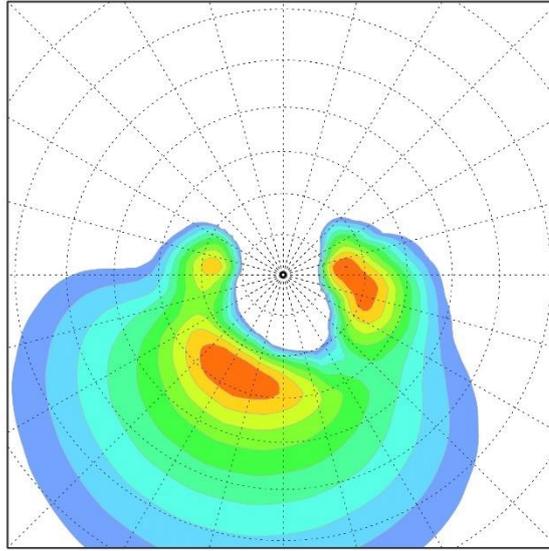
JANEIRO

JULHO

Espectros de onda 2D média para os meses de janeiro e julho entre os anos de 1979 e 2015. Fonte: Autor.

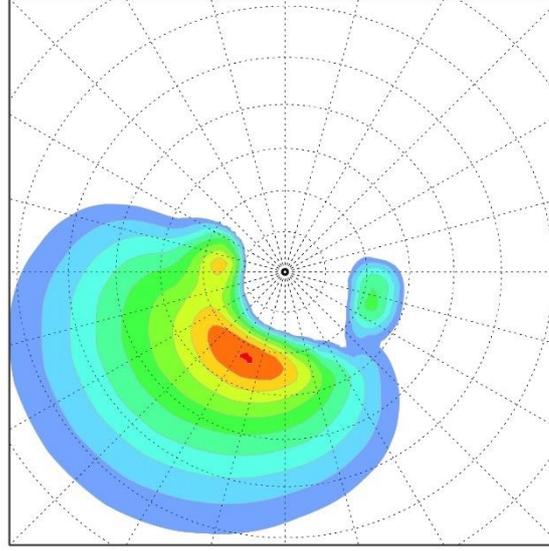
Gráfico 13 - Espectros de onda bidimensional para a região Leste

NORMALISED MEAN 2-D SPECTRUM from ERA-Interim
 January 1979-2015
 at (-8.00N , -34.00E)
 Hs= 1.47 m, Tm= 7.83 s, Tp= 7.63 s
 Peakedness Qp = 0.59, Directional Spread = 0.88
 MWD = 263 degrees PWD = 165 degrees
 Propagation direction is with respect to North
 North is pointing upwards
 Concentric circles are every 0.05 Hz



P19

NORMALISED MEAN 2-D SPECTRUM from ERA-Interim
 July 1979-2015
 at (-8.00N , -34.00E)
 Hs= 1.91 m, Tm= 7.76 s, Tp= 8.39 s
 Peakedness Qp = 0.74, Directional Spread = 0.63
 MWD = 302 degrees PWD = 285 degrees
 Propagation direction is with respect to North
 North is pointing upwards
 Concentric circles are every 0.05 Hz



P19

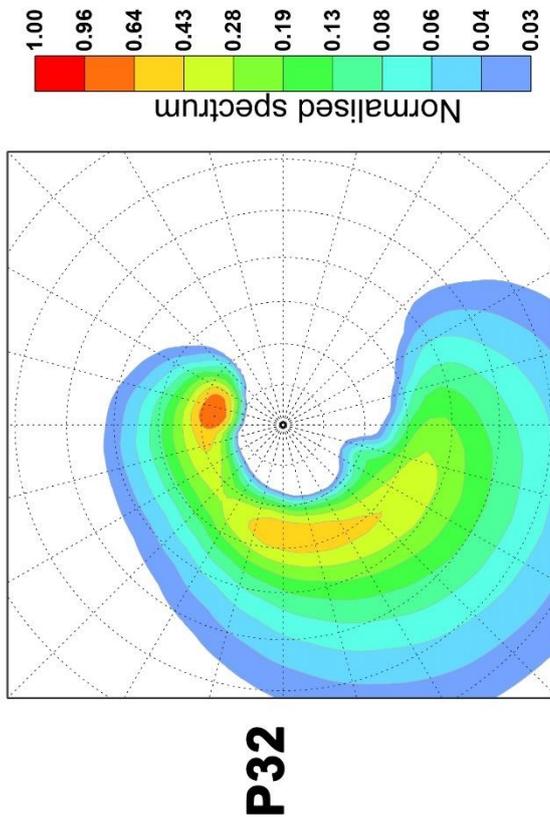
JANEIRO

JULHO

Espectros de onda 2D média para os meses de janeiro e julho entre os anos de 1979 e 2015. Fonte: Autor.

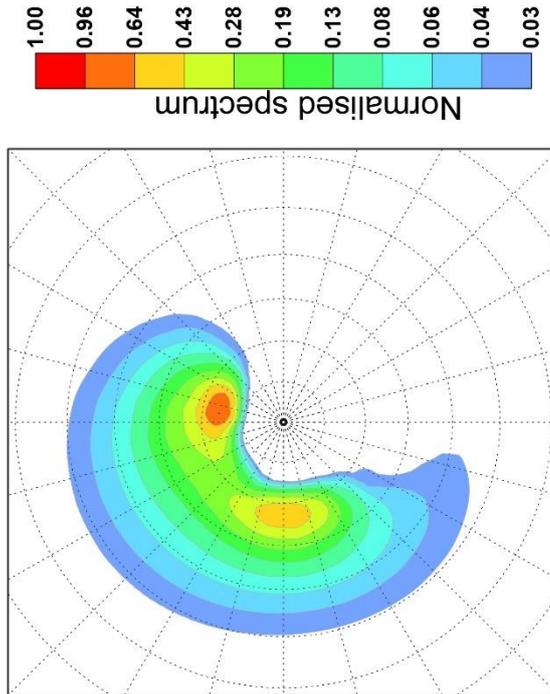
Gráfico 14 - Espectros de onda bidimensional para a região Leste-Sudeste

NORMALISED MEAN 2-D SPECTRUM from ERA-Interim
 January 1979-2015
 at (-20.00N , -39.00E)
 Hs= 1.39 m, Tm= 7.14 s, Tp= 7.63 s
 Peakedness Qp = 0.49, Directional Spread = 0.77
 MWD = 262 degrees PWD = 0 degrees
 Propagation direction is with respect to North
 North is pointing upwards
 Concentric circles are every 0.05 Hz



P32

NORMALISED MEAN 2-D SPECTRUM from ERA-Interim
 July 1979-2015
 at (-20.00N , -39.00E)
 Hs= 1.75 m, Tm= 8.58 s, Tp= 9.23 s
 Peakedness Qp = 0.56, Directional Spread = 0.82
 MWD = 314 degrees PWD = 0 degrees
 Propagation direction is with respect to North
 North is pointing upwards
 Concentric circles are every 0.05 Hz



P32

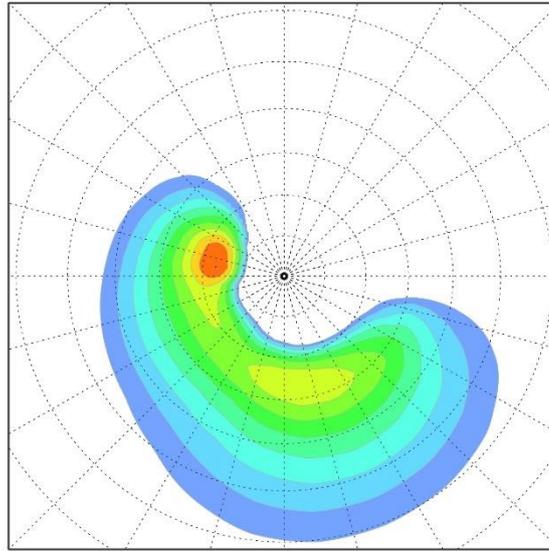
JANEIRO

JULHO

Espectros de onda 2D média para os meses de janeiro e julho entre os anos de 1979 e 2015. Fonte: Autor.

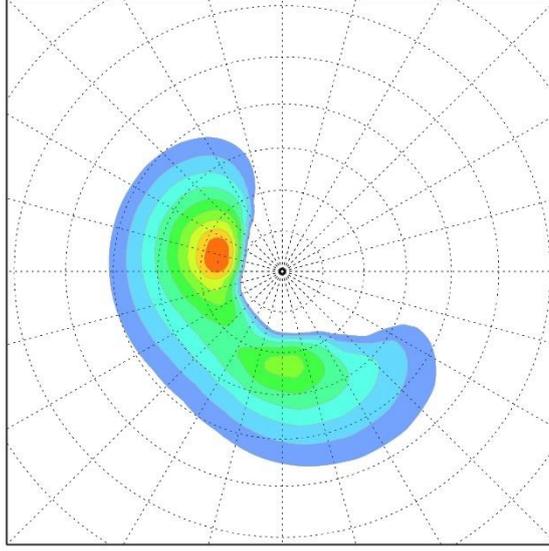
Gráfico 15 - Espectros de onda bidimensional para a região Sudeste

NORMALISED MEAN 2-D SPECTRUM from ERA-Interim
 January 1979-2015
 at (-24.00N , -44.00E)
 Hs= 1.48 m, Tm= 8.04 s, Tp= 10.15 s
 Peakedness Qp = 0.58, Directional Spread = 0.78
 MWD = 304 degrees PWD = 0 degrees
 Propagation direction is with respect to North
 North is pointing upwards
 Concentric circles are every 0.05 Hz

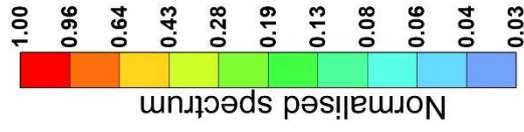


P38

NORMALISED MEAN 2-D SPECTRUM from ERA-Interim
 July 1979-2015
 at (-24.00N , -44.00E)
 Hs= 1.88 m, Tm= 9.11 s, Tp= 12.29 s
 Peakedness Qp = 0.69, Directional Spread = 0.85
 MWD = 337 degrees PWD = 0 degrees
 Propagation direction is with respect to North
 North is pointing upwards
 Concentric circles are every 0.05 Hz



P38



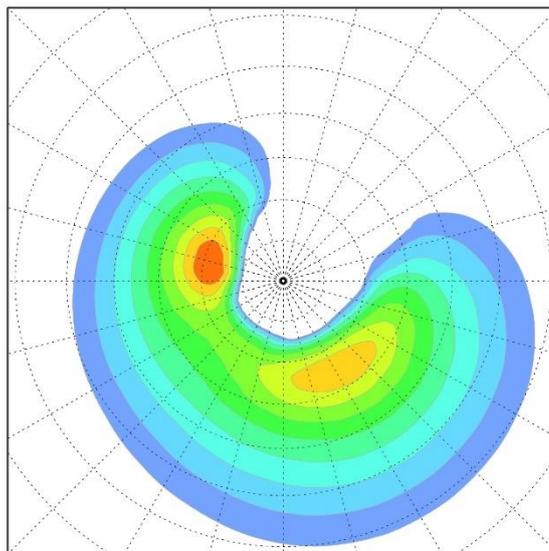
JANEIRO

JULHO

Espectros de onda 2D média para os meses de janeiro e julho entre os anos de 1979 e 2015. Fonte: Autor.

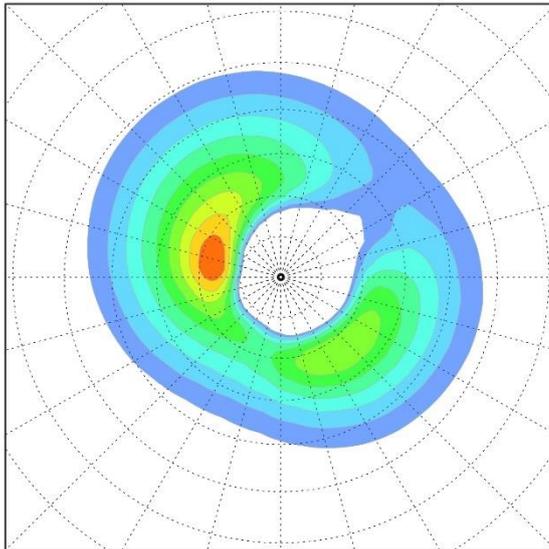
Gráfico 16 - Espectros de onda bidimensional para a região Sul

NORMALISED MEAN 2-D SPECTRUM from ERA-Interim
 January 1979-2015
 at (-33.00N , -50.00E)
 Hs= 1.89 m, Tm= 7.79 s, Tp= 9.23 s
 Peakedness Qp = 0.44, Directional Spread = 1.02
 MWD = 293 degrees PWD = 0 degrees
 Propagation direction is with respect to North
 North is pointing upwards
 Concentric circles are every 0.05 Hz



P48

NORMALISED MEAN 2-D SPECTRUM from ERA-Interim
 July 1979-2015
 at (-33.00N , -50.00E)
 Hs= 2.44 m, Tm= 8.54 s, Tp= 10.15 s
 Peakedness Qp = 0.44, Directional Spread = 1.15
 MWD = 4 degrees PWD = 0 degrees
 Propagation direction is with respect to North
 North is pointing upwards
 Concentric circles are every 0.05 Hz



P48

JANEIRO

Espectros de onda 2D média para os meses de janeiro e julho entre os anos de 1979 e 2015. Fonte: Autor.

JULHO

Os ventos de Nordeste originados pelo ASAS, associados com os sistemas ciclônicos que se deslocam de Oeste para Leste são responsáveis pelas ondas na direção Leste, que podem ser vistas nos espectros bidirecionais das regiões Leste-Sudeste e Sudeste. Já o sistema de ondas na direção Sul que atua nas duas regiões pode ser explicado por ondas que se propagam desde as latitudes 30° a 50° e que possuem grande energia (SILVA, 2013).

No mês de julho, com o reposicionamento do ASAS mais ao norte, o aumento nas ocorrências de sistemas frontais, e a formação de ciclones bem mais próximos da costa sul do Brasil, ocorre um aumento na velocidade dos ventos nas Regiões Leste-Sudeste, Sudeste e Sul. Essa intensificação dos sistemas atmosféricos se reflete em um aumento da energia das ondas, principalmente as provenientes da direção Sul.

Além da distribuição de energia mostrada pelo espectro de onda, nos Gráfico 11 a Gráfico 16, são apresentados os valores de altura significativa da onda (H_s) do período médio (T_m) e do período de pico da onda (T_p), da direção média (MWD) e da direção de pico da onda (PWD), todos derivados a partir do espectro bidimensional.

Uma vez que o espectro de ondas apresenta comportamento bimodal, o MWD será um valor médio entre as direções dos dois ou mais sistemas climáticos atuantes no local. O Ponto P32 (Região Leste-Sudeste) mostrado no Gráfico 14, por exemplo, mostra claramente um sistema mais energético na direção norte e um menos energético na direção oeste. Nesse caso, o PWD foi de 0° , enquanto o MWD foi de 314° , uma direção intermediária aos dois sistemas (nas direções Norte e Leste), onde a energia da onda é baixa. Assim, o uso do MWD sozinho pode ser um problema.

Um exemplo de problema da utilização do MWD como único fator é o comissionamento de um WEC. Caso a posição de instalação dele seja definido apenas baseado no MWD pode haver um baixo rendimento caso ele seja dependente da direção, uma vez que a direção escolhida pode não representar a de maior energia. Para evitar esse tipo de problema, uma análise mais detalhada do espectro de ondas 2D e o uso de outros parâmetros, tais como o espalhamento direcional, são importantes para um completo entendimento do clima de ondas local.

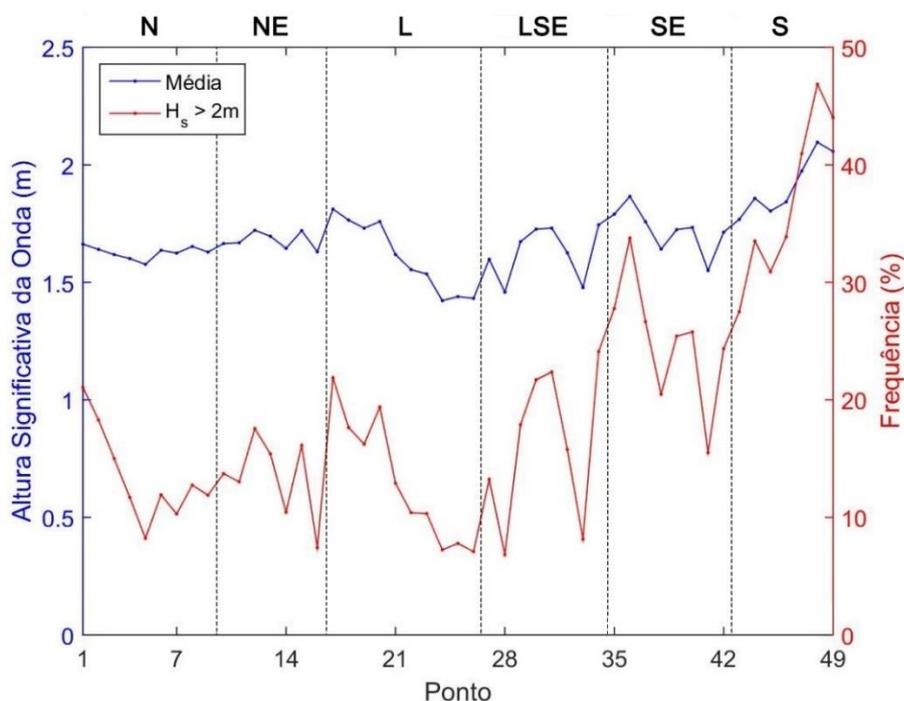
O espalhamento direcional é uma medida da dispersão ao redor do MWD similar ao desvio padrão. Analisando os valores normalizados do espalhamento direcional nos 6 pontos apresentados, pode ser observado que, no mês de janeiro, especialmente, há um aumento desse parâmetro de 0,56 no ponto P7 (Região Norte) até 1,02 no ponto P48 (Região Sul). Em julho, ocorre praticamente uma uniformidade entre os pontos P7 (Região Norte) e P19 (Região Leste), com valores entre 0,65 e 0,63. Já entre os pontos P32 (Região Leste-Sudeste) e P48 (Região

Sul) ocorre um aumento do espalhamento direcional, desde um valor de 0,82 até 1,15. A ocorrência de valores maiores na Região Sul está relacionada a ocorrência de ciclones na região, principalmente no mês de julho, onde há uma intensificação desse fenômeno.

6.2.1 Caracterização Anual de H_s e T_e

A partir dos dados do ERA-Interim foi feita a análise estatística anual de H_s para os 49 pontos divididos nas seis regiões definidas. O Gráfico 17 apresenta a análise do valor médio de H_s . Nele pode-se observar que os maiores valores acontecem na Região Sul, principalmente na área mais ao sul, onde o valor médio é acima de 1,80 m, com os dois últimos pontos apresentando valores superiores aos 2 m (P48 com 2,10 m e P49 com 2,06 m). Porém, em todas as seis regiões os valores médios de H_s são superiores a 1,50 m. A diferença entre o maior e o menor valor médio anual de H_s dentre os pontos analisados é de apenas 0,68 m.

Gráfico 17 - Média anual de H_s e frequência de ocorrência de H_s acima de 2 m



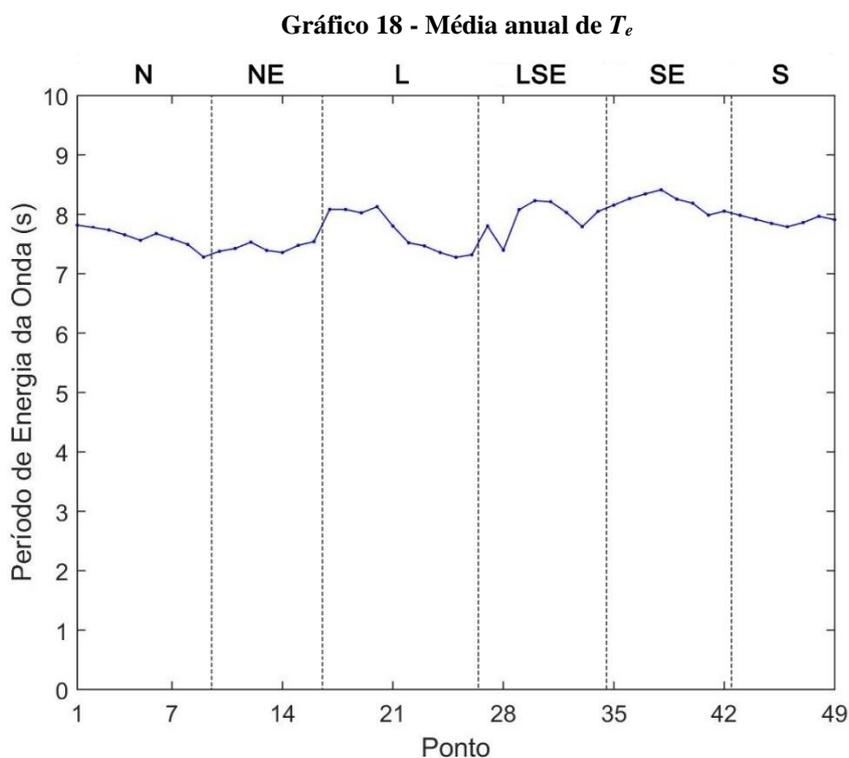
As siglas N, NE, L, LSE, SE e S indicam a região da margem continental em que os pontos estão localizados na área de estudo. Fonte: Autor.

Nas Regiões Norte e Nordeste percebe-se uma uniformidade entre os valores encontrados em decorrência da atuação dos alísios na formação das ondas ao longo do ano, principalmente nos meses entre dezembro e fevereiro.

A Região Leste apresenta dois comportamentos. Na parte norte da região (P17 a P20) o comportamento é similar ao das regiões mais acima, com uma leve intensificação dos valores de H_s (em geral acima de 1,70 m) em decorrência da atuação constante dos ventos alísios ao longo do ano. Já a parte mais ao sul (P21 a P26) apresenta uma diminuição significativa dos valores médios anuais de H_s com o aumento da latitude. O ponto P24 é o que apresenta menor valor médio de H_s dentre todos os 49 pontos, com apenas 1,42 m. Essa diminuição é justificada pela diminuição da influência dos ventos, e pela menor influência do ASAS durante o verão.

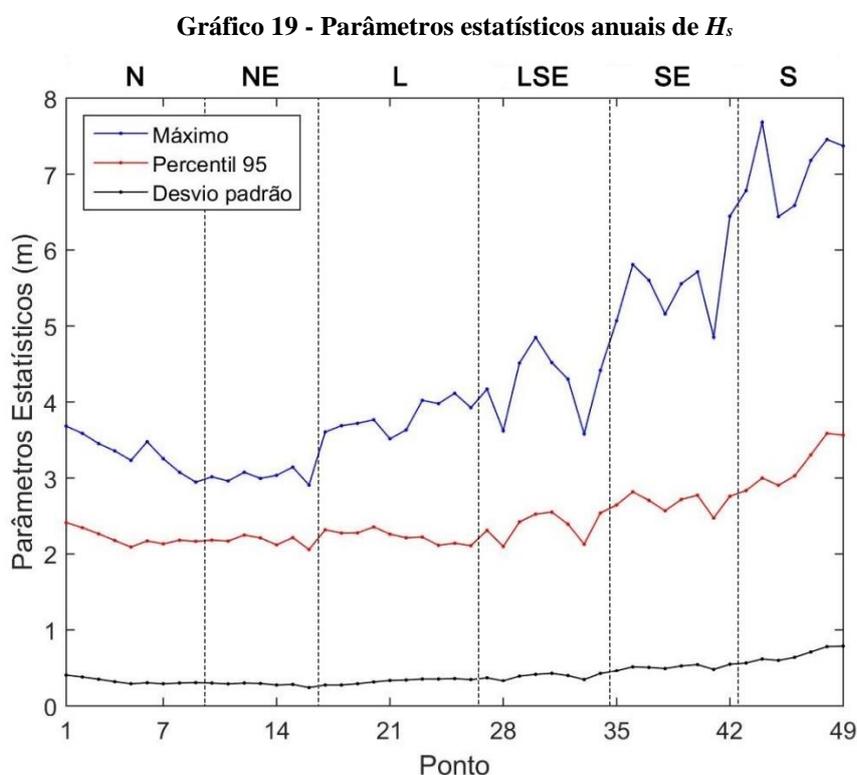
A partir da Região Leste-Sudeste até a Região Sul há um aumento dos valores médios anuais de H_s em decorrência da atuação cada vez mais forte do ASAS, dos ciclones extratropicais e dos sistemas frontais na formação das ondas nessas regiões. Essa intensificação dos sistemas atmosféricos se reflete numa maior ocorrência de ondas acima de 2 m, principalmente na Região Sul entre os pontos P47 e P49, com frequência maior que 40%.

O período de energia médio anual das ondas, T_e , não apresenta uma tendência de crescimento com relação à latitude, como pode ser observado no Gráfico 18. Além disso, os valores encontrados não mostram uma variação significativa entre os pontos, uma vez que o menor valor de T_e na área de estudo é 7,28 s (P25) e o maior valor é 8,41 s (P38), uma diferença de apenas 1,13 s. O Apêndice D apresenta os mapeamentos qualitativos dos parâmetros estatísticos anuais de T_e .



As siglas N, NE, L, LSE, SE e S indicam a região da margem continental em que os pontos estão localizados na área de estudo. Fonte: Autor.

O Gráfico 19 apresenta os resultados obtidos para os demais parâmetros estatísticos analisados: máximo ($H_{s,MAX}$); 95 percentil ($H_{s,95\%}$); desvio padrão ($H_{s,\sigma}$).



As siglas N, NE, L, LSE, SE e S indicam a região da margem continental em que os pontos estão localizados na área de estudo. Fonte: Autor.

Os maiores valores de $H_{s,MAX}$ ocorrem na Região Sul com o ponto P44 apresentando o valor máximo de 7,68 m. Já os menores valores ocorrem na região Nordeste, com o ponto P16 apresentando $H_{s,MAX}$ igual a 2,91 m.

Um exame dos valores de $H_{s,95\%}$ mostra comportamento similar ao de $H_{s,MAX}$, apresentando tendência de crescimento da região Norte para a região Sul da área de estudo, com os maiores valores ocorrendo no ponto P48 (3,59 m). Além do ponto P48, os pontos P46, P47 e P49 apresentam valores de $H_{s,95\%}$ acima de 3 m.

A baixa variação de $H_{s,95\%}$, associado com os valores pequenos de $H_{s,\sigma}$ encontrados, cujo menor e maior valor são respectivamente 0,24 m (P16) e 0,79 m (P49), e a proximidade maior com a média do que com os valores de máximo, indicam uma baixa variabilidade de H_s nos pontos analisados.

Analisando o Gráfico 19, pode-se identificar a maior ocorrência de eventos extremos na Região Sul, principalmente em decorrência da atuação dos sistemas frontais e dos ciclones extratropicais na região.

6.2.2 Caracterização Sazonal de H_s

Foi realizada uma análise sazonal com o objetivo de observar a variabilidade temporal da onda ao longo do ano. Gráfico 20 apresenta os valores de média de H_s para as quatro estações.

Na Região Norte, entre os pontos P1 a P7, os maiores valores médios de H_s acontecem no período DJF, enquanto que os menores acontecem no período JJA. A explicação para isso é que durante DJF os ventos alísios vindos do Hemisfério Norte são mais intensos do que os vindos do Hemisfério Sul, provocando ondas mais intensas na costa brasileira voltada para o Hemisfério Norte (SEMEDO *et al.*, 2011). Adicionalmente, o posicionamento mais ao sul da ZCIT nesse período é outro fator contributivo (CAVALCANTI *et al.*, 2009). Por outro lado, no período de JJA a ZCIT está mais ao norte, assim os pontos P1 a P7 sofrem menos influência dos sistemas que agem no Hemisfério Norte (SILVA, 2013).

Os pontos mais ao sul da Região Norte (P8 e P9) e toda a Região Nordeste apresentam os maiores valores de H_s média no período de SON e os menores valores de média no período de MAM. Entretanto, a diferença entre os trimestres nesses locais é muita pequena, praticamente não havendo variação nos valores encontrados. Isso acontece porque nessa região os alísios atuam de forma praticamente constante durante o ano inteiro. O mesmo pode ser dito da parte norte da Região Leste (P17 a P20).

As Regiões Leste (P21 a P26), Leste-Sudeste, Sudeste e Sul apresentam comportamento similar entre si. Para essas regiões, os maiores valores de média ocorrem principalmente no período JJA, e os menores valores de média em DJF. Em alguns pontos, como em P41 e P46, o maior valor médio de H_s ocorre em SON. De acordo com Cavalcanti *et al.* (2009), o clima de ondas na costa sudeste do Brasil é fortemente influenciado pelos ventos do ASAS, pela passagem de sistemas frontais e ciclones extratropicais, como mencionado. Os últimos dois fatores ocorrem menos frequentemente no período de DJF, e se intensificam no período de JJA, o que explica o comportamento apresentado pelas Regiões Leste-Sudeste, Sudeste e Sul.

O mesmo padrão apresentado pela média sazonal de H_s foi observado para os valores de $H_{s,MAX}$, $H_{s,95\%}$, $H_{s,\sigma}$ e da frequência de ocorrência de valores de H_s acima de 2m.

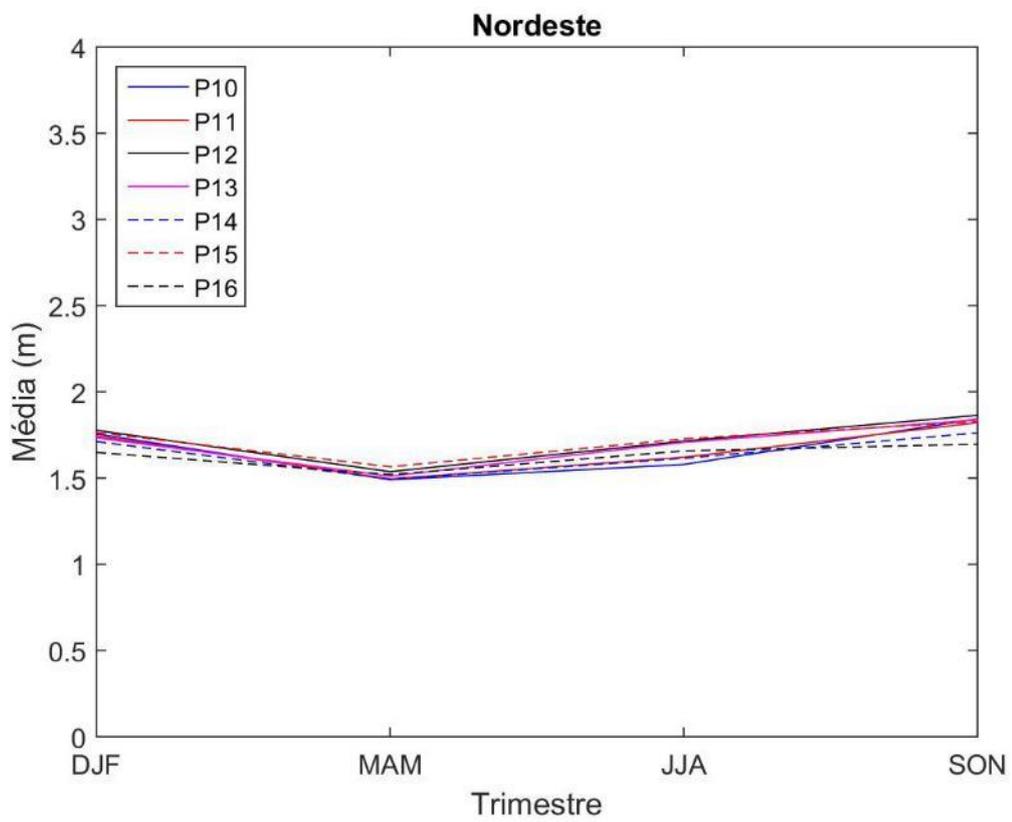
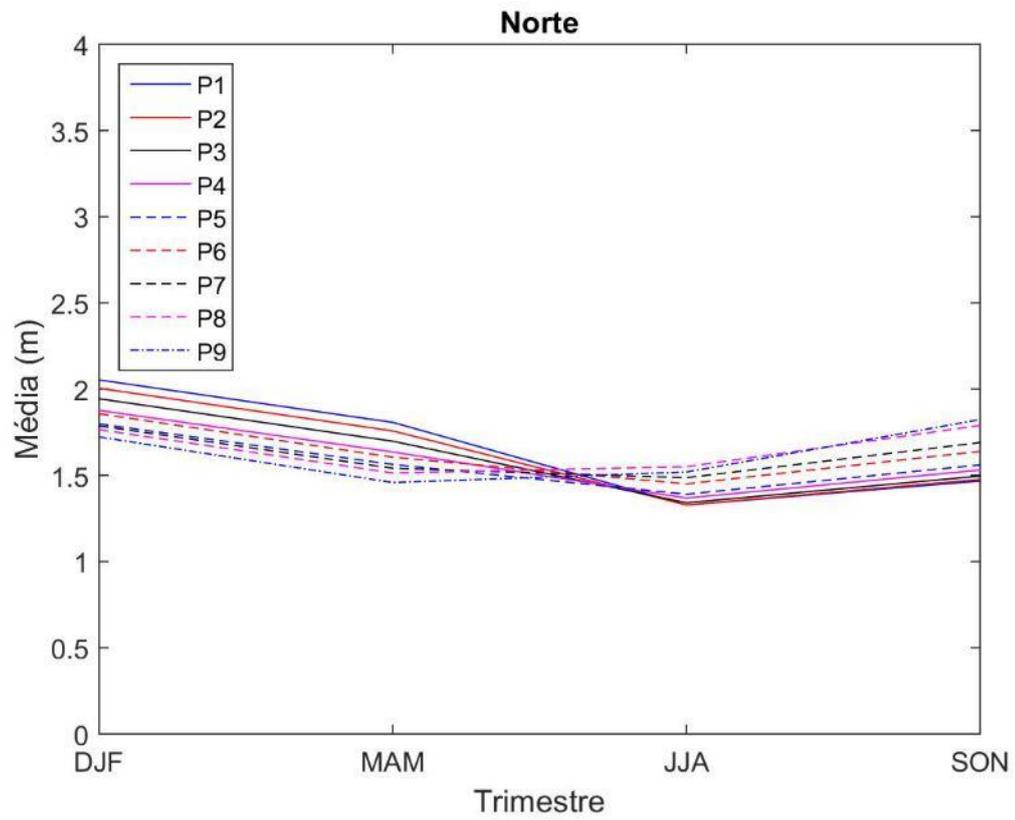
Gráfico 20 - Média sazonal de H_s por região da margem continental (continua)

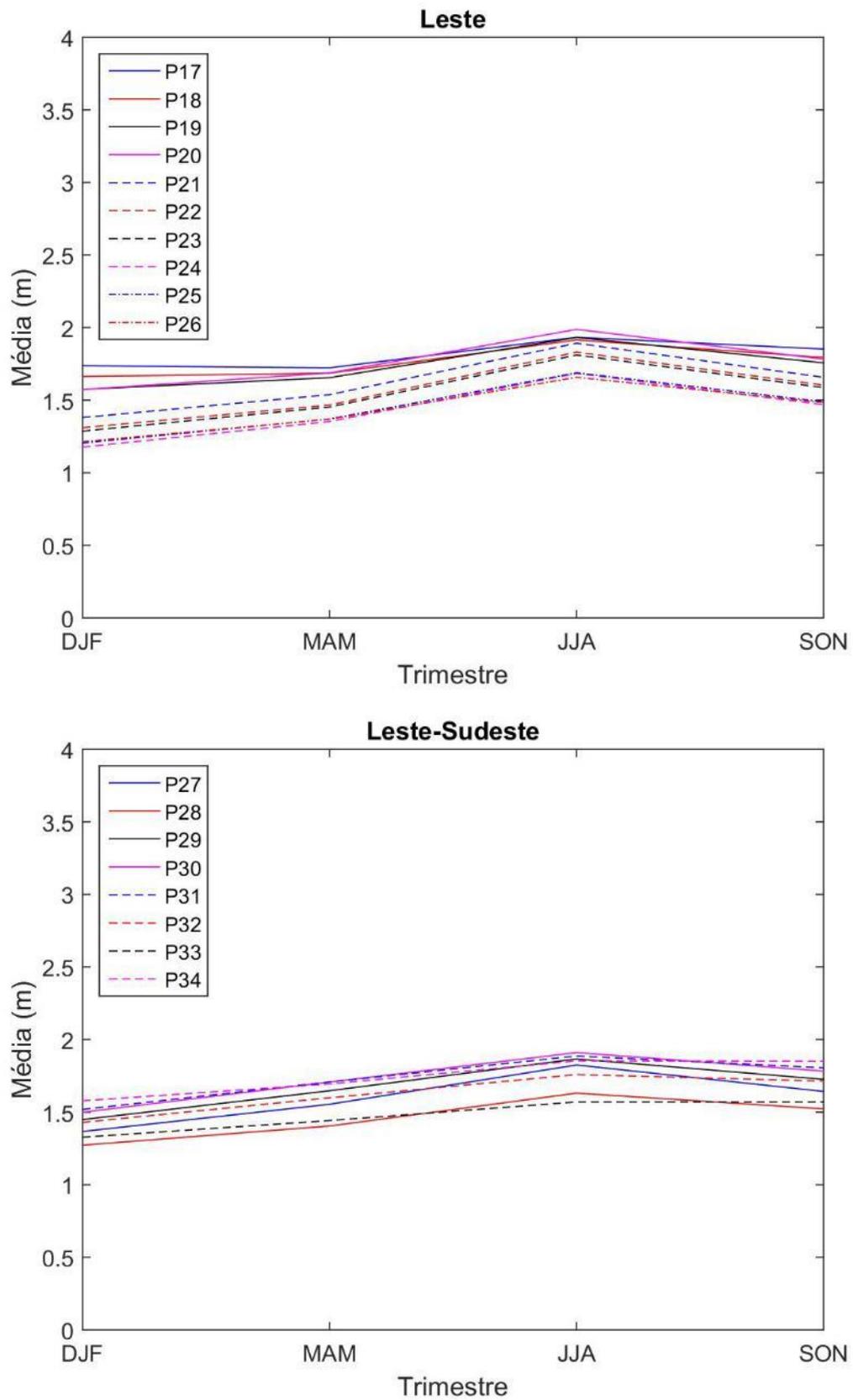
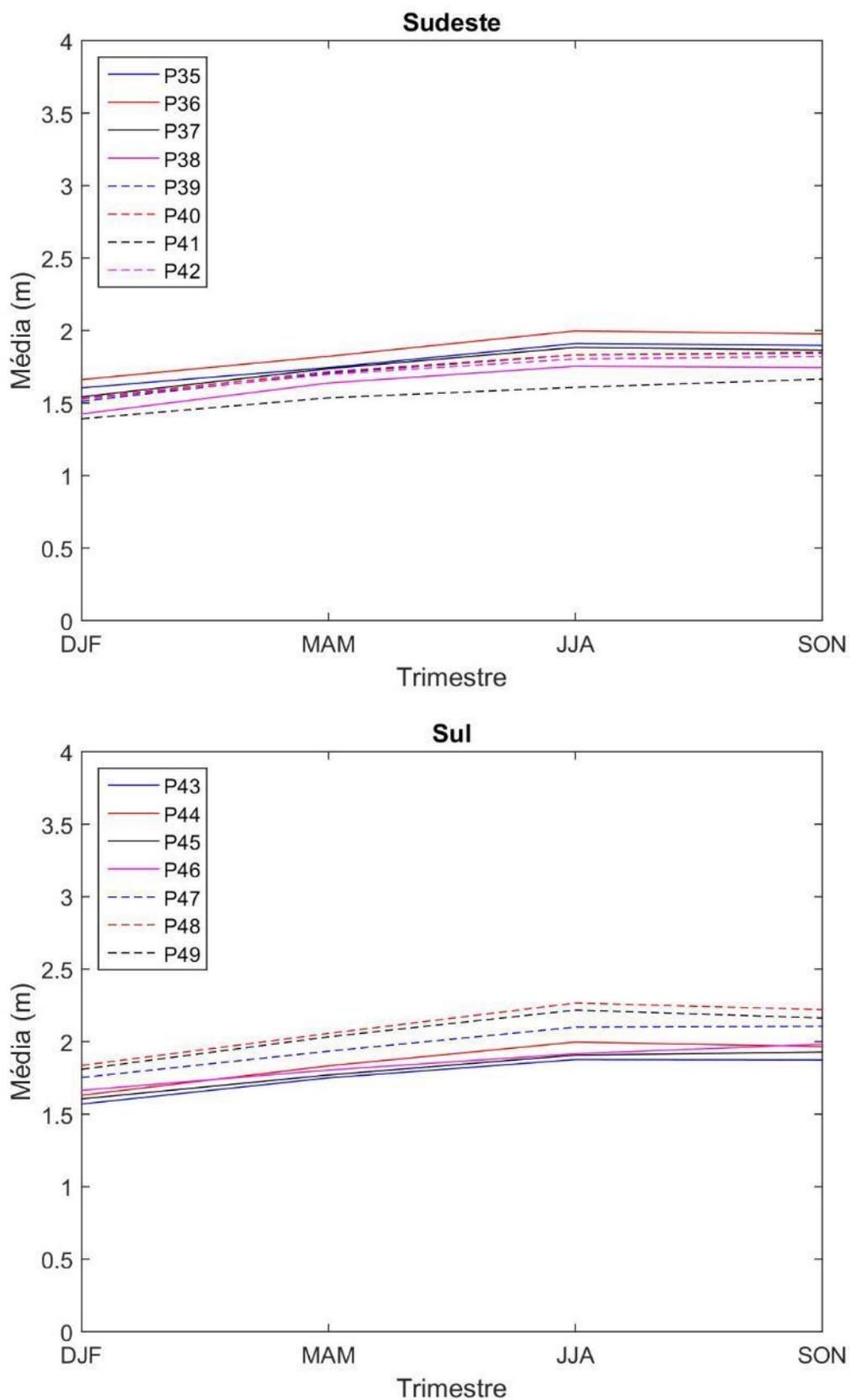
Gráfico 20 - Média sazonal de H_s por região da margem continental (continuação)

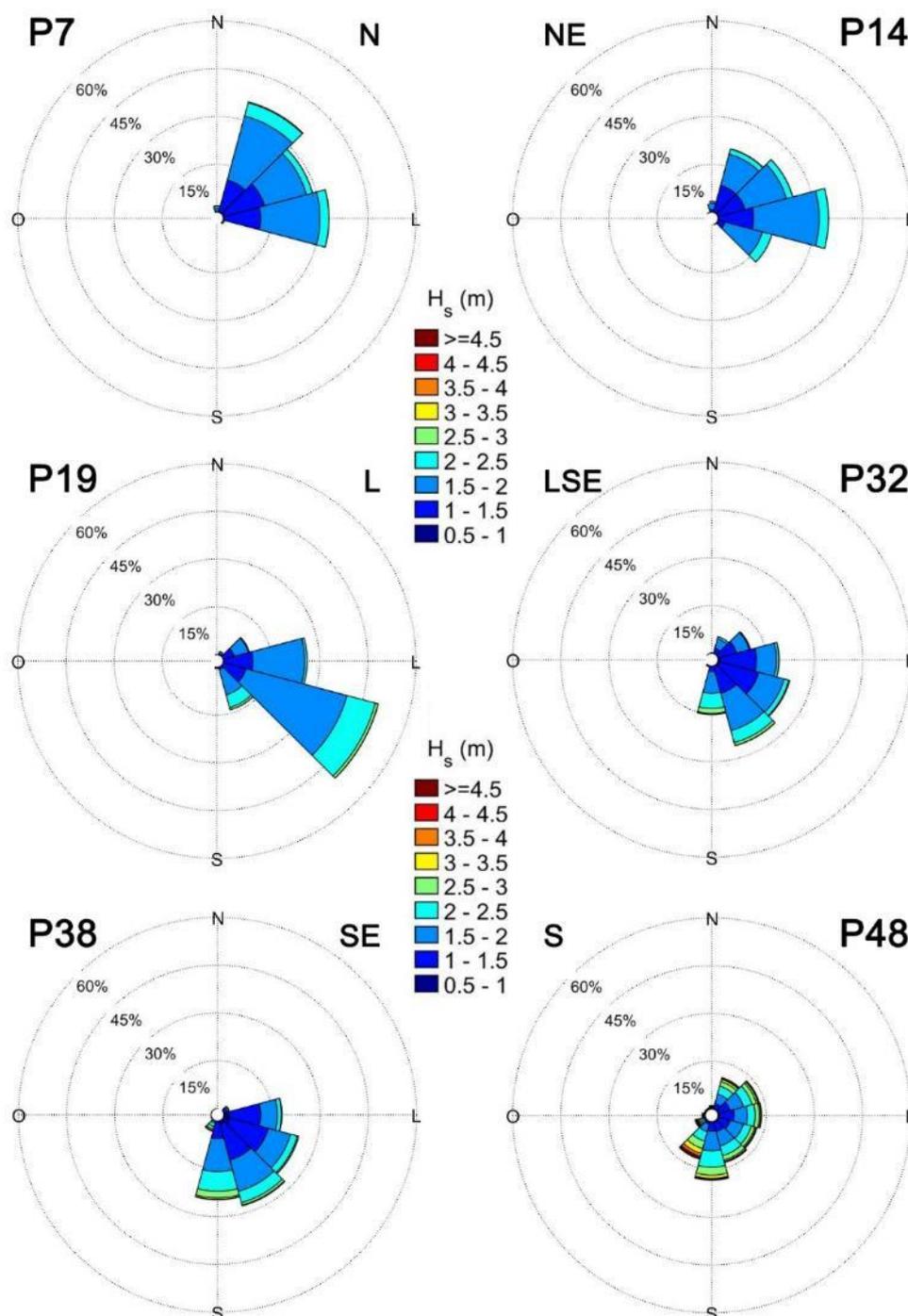
Gráfico 20 - Média sazonal de H_s por região da margem continental (conclusão)

A sazonalidade adotada foi trimestral, com os seguintes períodos analisados: dezembro, janeiro e fevereiro (DJF); março, abril e maio (MAM); junho, julho e agosto (JJA); setembro, outubro e novembro (SON). Fonte: Autor.

6.2.3 Caracterização da Distribuição Direcional de H_s

A partir dos dados do ERA-Interim foi realizada uma análise da distribuição dos valores médios anuais de H_s em termos da direção de incidência da onda. O Gráfico 21 apresenta o resultado anual da distribuição direcional de H_s nas seis regiões estudadas.

Gráfico 21 - Distribuição direcional anual de H_s

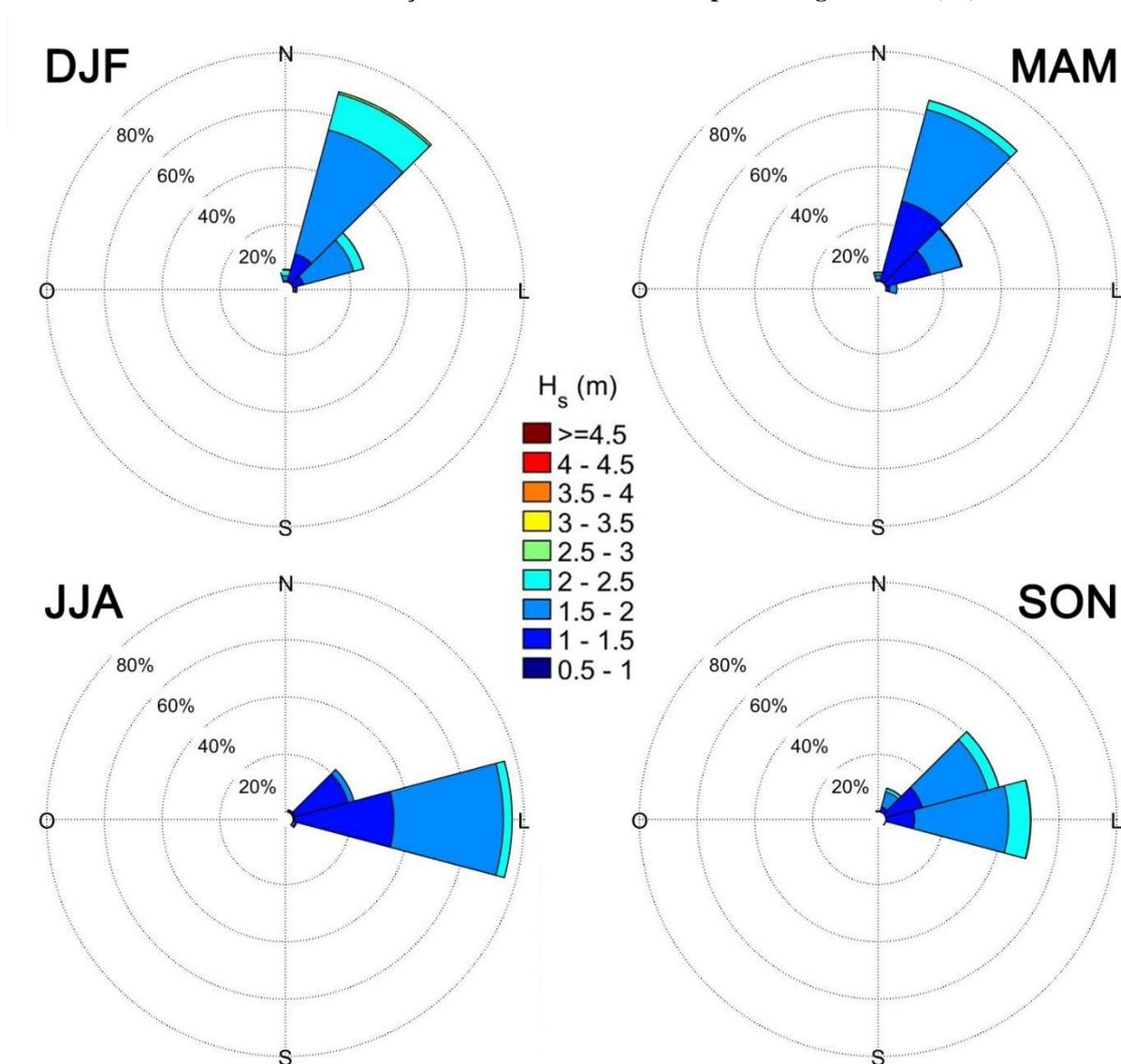


As siglas N, NE, L, LSE, SE e S indicam a região da margem continental em que os pontos estão localizados na área de estudo. Os dados estão separados em intervalos de 30°. Fonte: Autor.

As distribuições direcionais de H_s mostradas no Gráfico 21 são consequência direta dos espectros bidimensionais apresentados nos Gráfico 11 a Gráfico 16, e dos sistemas de ondas que os formam. Os Gráfico 22 a Gráfico 27 apresentam o comportamento sazonal da distribuição direcional de H_s para as seis regiões.

Para a Região Norte (P7) ocorre a predominância das ondas com direção de Nordeste e de Leste, sendo que a primeira direção predomina nos trimestres DJF e MAM enquanto que as ondas de Leste ocorrem nos períodos de JJA e SON, como pode ser observado no Gráfico 22.

Gráfico 22 - Distribuição direcional sazonal de H_s para a Região Norte (P7)



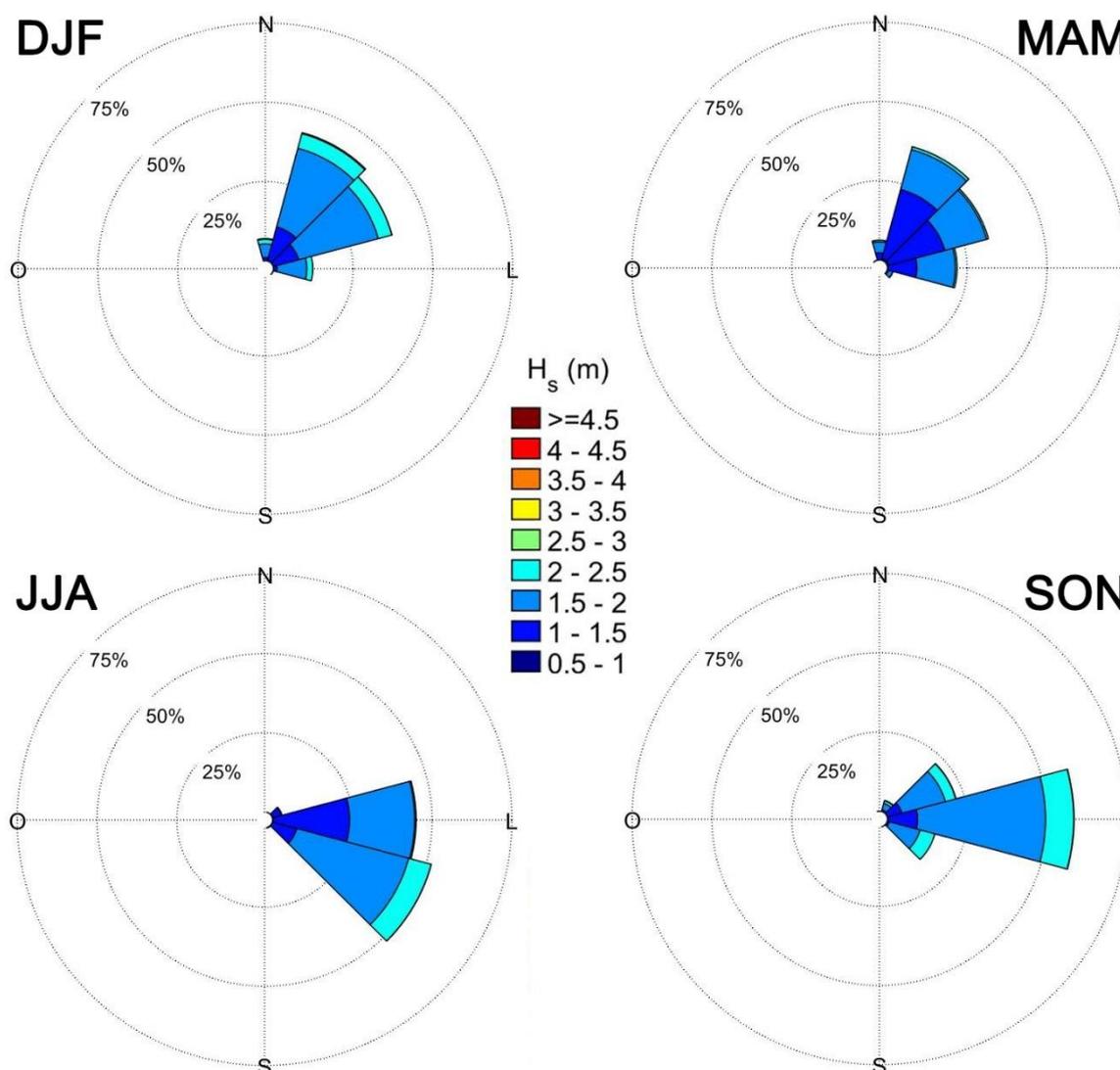
A sazonalidade adotada foi trimestral, com os seguintes períodos analisados: dezembro, janeiro e fevereiro (DJF); março, abril e maio (MAM); junho, julho e agosto (JJA); setembro, outubro e novembro (SON). Os dados estão separados em intervalos de 30°. Fonte: Autor.

O comportamento mostrado no Gráfico 22 está relacionado com a predominância de ondas oriundas do Hemisfério Norte que incidem na direção Nordeste na maior parte do ano.

Entretanto, em JJA e SON há uma diminuição da atuação dos sistemas provenientes dessa região, e os alísios de Sudeste agem para mudar a direção das ondas para Leste (SILVA, 2013). Ao longo de todo o ano verifica-se uma maior frequência de ondas entre 1,5 m e 2,0 m, enquanto que no período de JJA, valores de H_s no intervalo entre 1,0 m e 1,5 m ocorrem com mais frequência do que nos demais trimestres, fruto do enfraquecimento dos sistemas atmosférico que atuam no Hemisfério Norte.

No período de DJF ocorre com mais frequência ondas com H_s maior que 2 m, com valores entre 2,0 m e 2,5 m predominando. Isso ocorre devido a maior atividade dos sistemas atmosféricos do Hemisfério Norte. Entretanto, em todos os períodos verifica-se a ocorrência de ondas com H_s maior que 2,0 m.

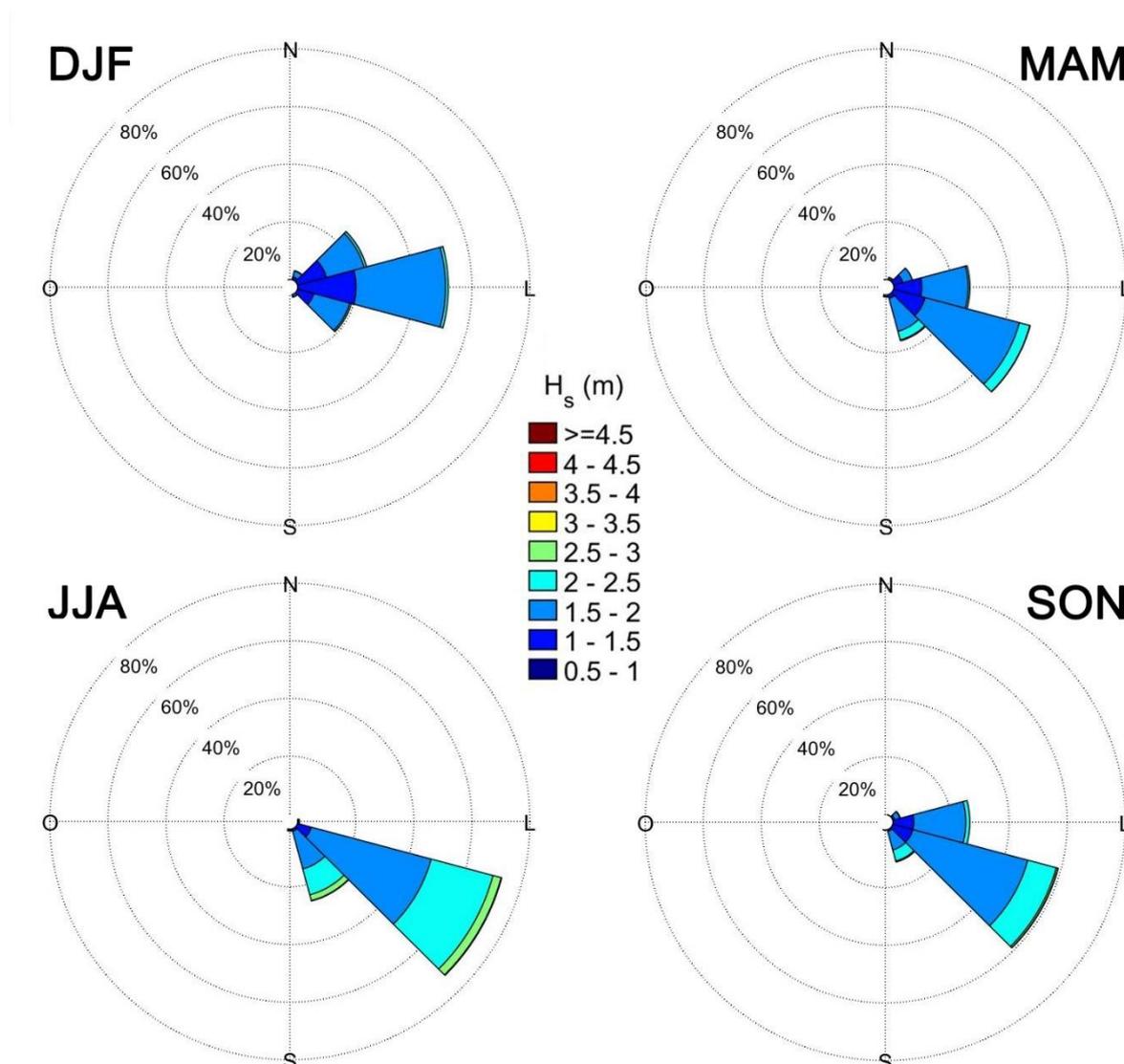
Gráfico 23 - Distribuição direcional sazonal de H_s para a Região Nordeste (P14)



A sazonalidade adotada foi trimestral, com os seguintes períodos analisados: dezembro, janeiro e fevereiro (DJF); março, abril e maio (MAM); junho, julho e agosto (JJA); setembro, outubro e novembro (SON). Os dados estão separados em intervalos de 30°. Fonte: Autor.

A partir do Gráfico 23, verifica-se que nos períodos de DJF e MAM a direção predominante das ondas é de Nordeste. Essa predominância ocorre principalmente devido à influência dos alísios oriundos dos sistemas atmosféricos do Hemisfério Norte, que em DJF apresentam maior intensidade. Em MAM, pode-se observar uma diminuição na intensidade das ondas, com valores de H_s ocorrendo, preferencialmente, entre 1,0 m e 1,5 m. Já em DJF a maior ocorrência é de ondas com H_s entre 1,5 m e 2,0 m.

Gráfico 24 - Distribuição direcional sazonal de H_s para a Região Leste (P19)



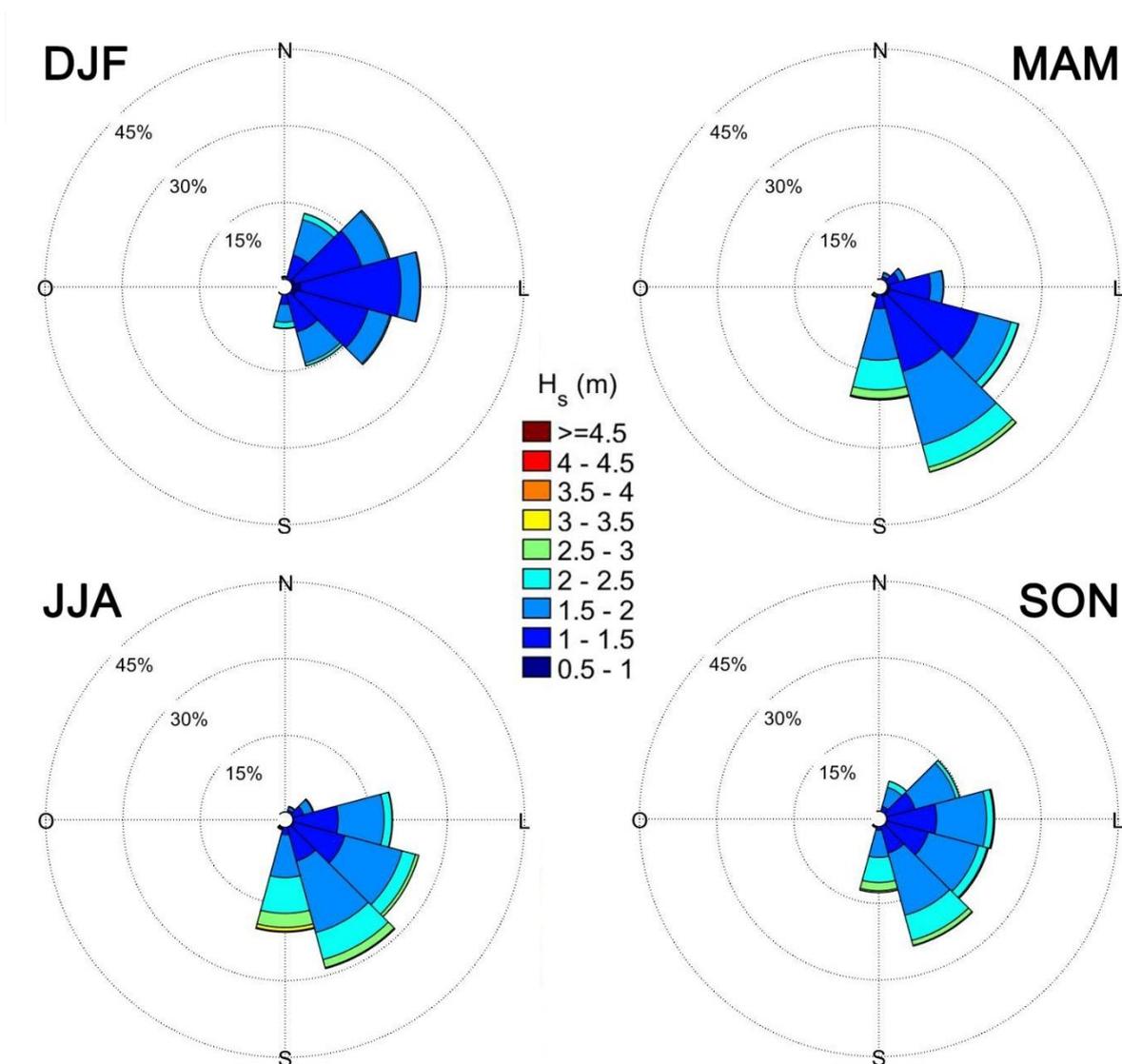
A sazonalidade adotada foi trimestral, com os seguintes períodos analisados: dezembro, janeiro e fevereiro (DJF); março, abril e maio (MAM); junho, julho e agosto (JJA); setembro, outubro e novembro (SON). Os dados estão separados em intervalos de 30°. Fonte: Autor.

No trimestre de JJA, com a mudança de posição da ZCIT e a intensificação e aproximação da costa do ASAS (CAVALCANTI *et al.*, 2009), na Região Norte os alísios de Sudeste se intensificam e verifica-se uma mudança na direção das ondas, passando de Nordeste

para Sudeste, com ondas apresentando preferencialmente H_s entre 1,0 m e 1,5 m. Em SON, os alísios de Sudeste diminuem de intensidade, e as ondas mudam novamente de direção passando a ser de Leste.

O Gráfico 24 mostra a sazonalidade da distribuição direcional de H_s na Região Leste (P19). Pode-se observar que os alísios de Nordeste já não influenciam mais tanto a direção das ondas, uma vez que em MAM, JJA e SON as ondas são de Sudeste. Apenas no período de DJF, quando a ZCIT está mais próxima do Equador (VELEDA, 2008), é que as ondas são de Leste devido à influência dos ventos alísios de Nordeste.

Gráfico 25 - Distribuição direcional sazonal de H_s para a Região Leste-Sudeste (P32)

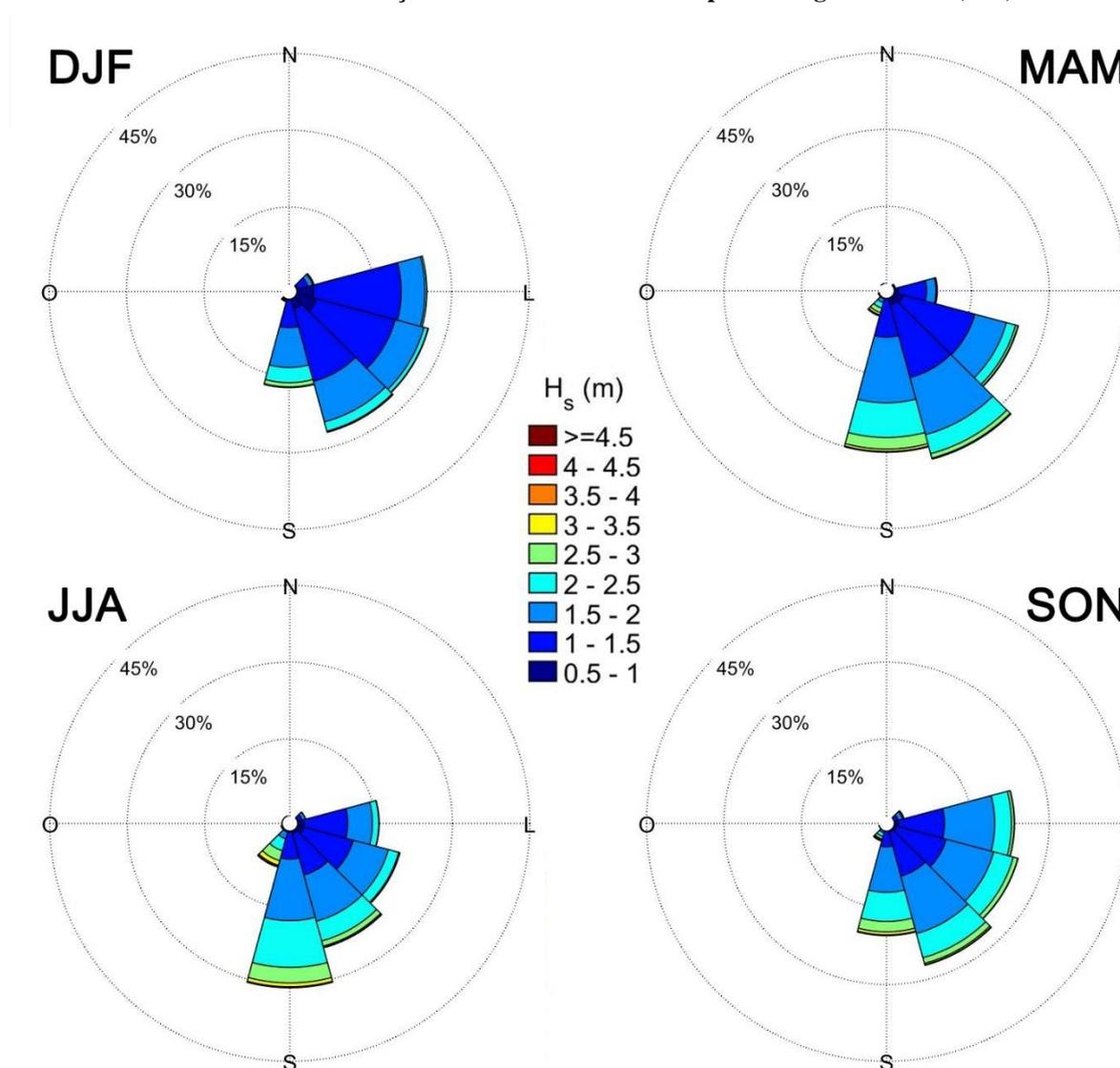


A sazonalidade adotada foi trimestral, com os seguintes períodos analisados: dezembro, janeiro e fevereiro (DJF); março, abril e maio (MAM); junho, julho e agosto (JJA); setembro, outubro e novembro (SON). Os dados estão separados em intervalos de 30°. Fonte: Autor.

Observando o Gráfico 24 verifica-se também que os valores de H_s na Região Leste são bem regulares, com valores de 1,5 m a 2,0 m predominando em todas os trimestres. Em JJA, devido à intensificação dos alísios de Sudeste, ocorre um aumento na frequência de ondas com valores acima de 2,0 m.

O Gráfico 25 apresenta o comportamento sazonal da distribuição direcional anual de H_s para a região Leste-Sudeste (P32). Verifica-se que nessa região já ocorre uma maior distribuição das ondas em termos de direção. Entretanto, apesar da maior distribuição direcional das ondas em relação às regiões de latitudes inferiores, ainda é possível verificar a existência de direções predominantes. Nessa região ainda há uma predominância de Leste em DJF e de Sudeste nos outros períodos, resultado da maior ou menor intensidade do ASAS.

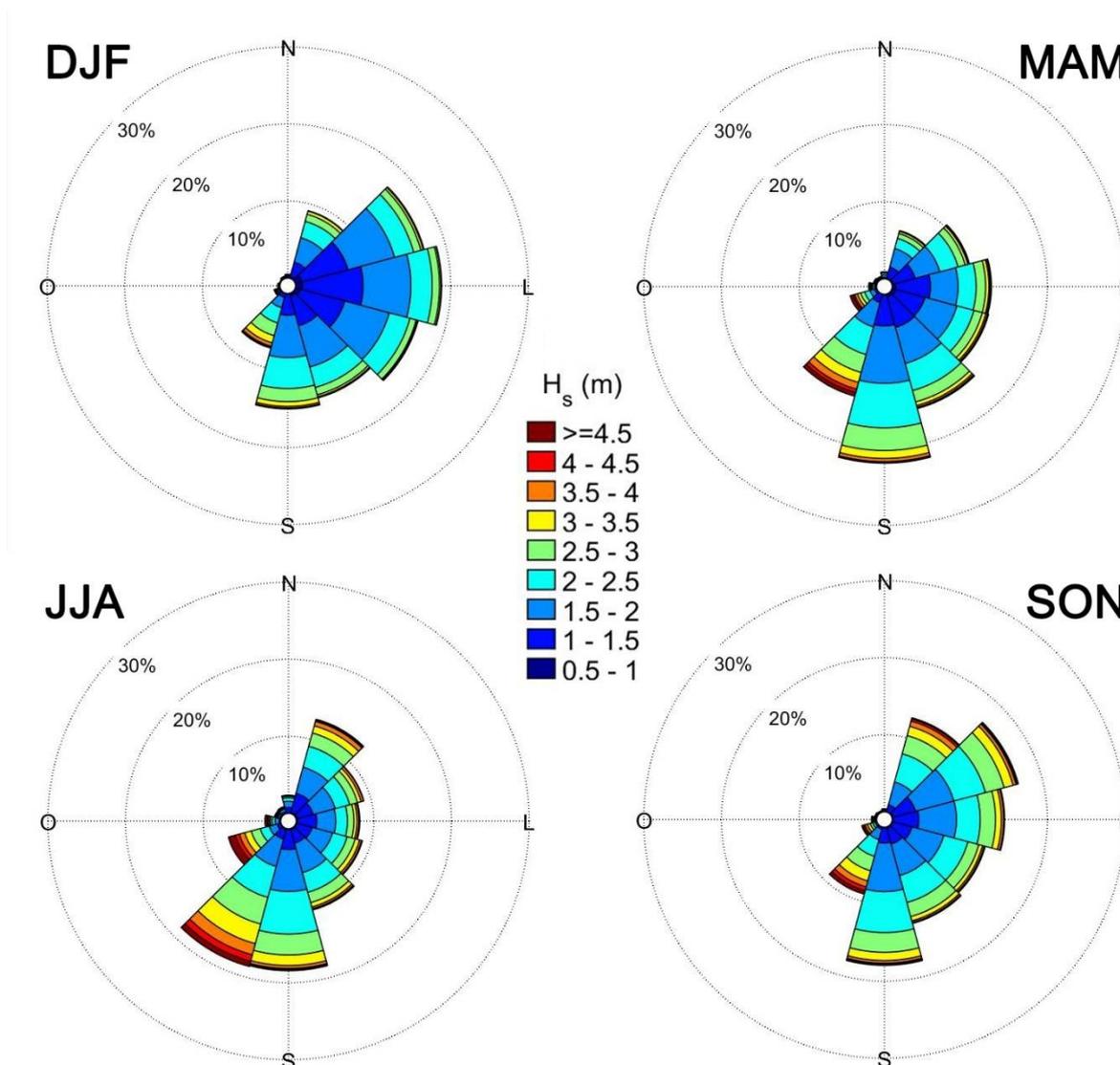
Gráfico 26 - Distribuição direcional sazonal de H_s para a Região Sudeste (P38)



A sazonalidade adotada foi trimestral, com os seguintes períodos analisados: dezembro, janeiro e fevereiro (DJF); março, abril e maio (MAM); junho, julho e agosto (JJA); setembro, outubro e novembro (SON). Os dados estão separados em intervalos de 30°. Fonte: Autor.

Em relação a intensidade das ondas na Região Leste-Sudeste, o Gráfico 25 aponta que em DJF predominam ondas pequenas, com H_s entre 1,0 m e 1,5 m. A partir de MAM há um aumento de H_s , relacionado com a intensificação do ASAS e da ocorrência de ciclones e sistemas frontais. Assim, há um aumento na ocorrência de ondas com H_s entre 1,5 m e 3,0 m. Em SON os sistemas atmosféricos atuantes perdem força e há uma leve diminuição na frequência de ocorrência de ondas maiores que 2,0 m.

Gráfico 27 - Distribuição direcional sazonal de H_s para a Região Sul (P48)



A sazonalidade adotada foi trimestral, com os seguintes períodos analisados: dezembro, janeiro e fevereiro (DJF); março, abril e maio (MAM); junho, julho e agosto (JJA); setembro, outubro e novembro (SON). Os dados estão separados em intervalos de 30°. Fonte: Autor.

Para a região Sudeste (P38), apresentada no Gráfico 26, o comportamento sazonal da distribuição direcional de H_s apresenta ondas preferencialmente de Sudeste ocorrendo em DJF, MAM e SON, e ondas de Sul ocorrendo em JJA. Entretanto, a ocorrência de ondas de outras

direções é bastante acentuada na região, com ondas de Leste e Sul acontecendo bastante nos trimestres de DJF e SON, e ondas de Sul acontecendo em MAM. Esse espalhamento da direção das ondas é decorrente dos sistemas atmosféricos que atuam nessa região, que tem característica de alta variabilidade (SILVA, 2013).

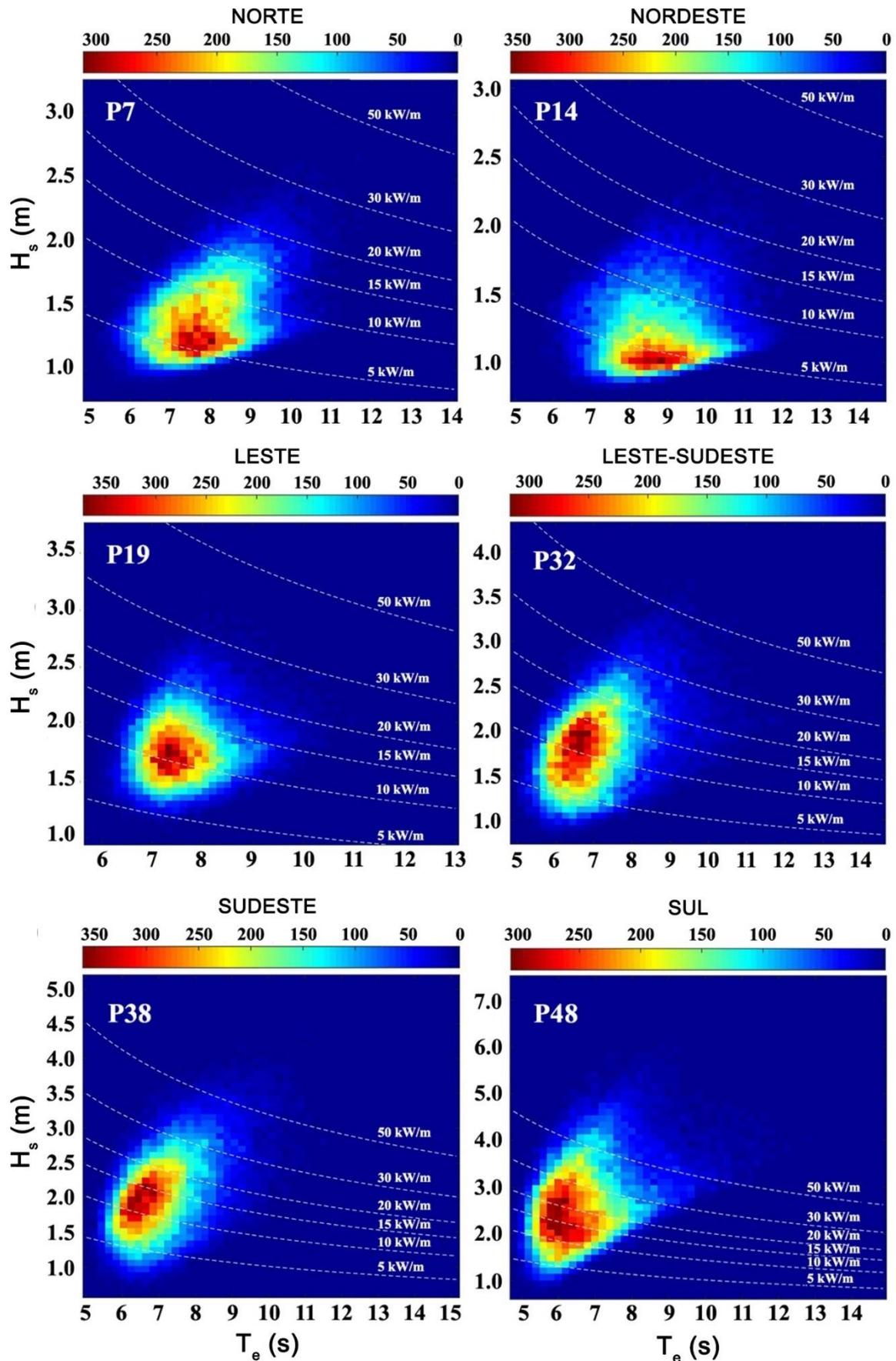
A intensidade das ondas na Região Sudeste, como aponta o Gráfico 26, é bastante similar à da Região Leste-Sudeste, com valores de H_s entre 1,0 m e 1,5 m predominando em DJF, período de menor intensidade do ASAS, e aumentando a frequência de ondas maiores, principalmente entre 1,5 m e 3,0 m, em JJA, período de maior intensidade do ASAS. Os períodos de MAM e SON funcionam como períodos de transição entre as situações de maior e menor intensidade das ondas.

A Região Sul (P48), mostrada no Gráfico 27, é a que apresenta maior espalhamento direcional de H_s . Em todos os quatro períodos, a região apresenta ocorrência de ondas desde Nordeste até Sudoeste, sendo que em DJF predominam as ondas de Leste. Em MAM a maior ocorrência é de ondas de Sul. Enquanto que em JJA e SON duas direções apresentam frequências de ocorrência praticamente iguais. Em JJA predominam ondas de Sul e Sudoeste, e em SON predominam ondas de Sul e de Nordeste. Novamente a grande variação em termos de direção está relacionada às características do ASAS e a ocorrência de ciclones e sistemas frontais na região que apresentam grande variabilidade temporal e espacial (SILVA, 2013).

A partir do Gráfico 27 também se verifica que a Região Sul é a que apresenta maior ocorrência de ondas com grandes valores de H_s . Em todos os quatro períodos têm-se ocorrência significativa de valores de H_s maiores que 2,0 m, com destaque para o período de JJA com a ocorrência de ondas maiores que 4,0 m. Esses valores altos de H_s , assim com a grande variabilidade direcional na região, são resultado da atuação do ASAS, dos ciclones extratropicais e dos sistemas frontais, principalmente em JJA onde os dois últimos ocorrem com maior frequência.

6.3 ANÁLISE DO RECURSO ONDOMOTRIZ

O Gráfico 28 apresenta a distribuição de ocorrência anual bivariável, em termos de H_s e T_e , que define o estado de mar de um local. Como a partir desses dois parâmetros, utilizando a Equação 26, é possível estimar a potência da onda no local, o Gráfico 28 também apresenta os estados de mar que apresentam a mesma potência ondomotriz.

Gráfico 28 - Distribuição de ocorrência bivariável de H_s x T_e 

As linhas tracejadas indicam ondas com o mesmo potencial. Fonte: Autor.

Os comportamentos apresentados no Gráfico 28 refletem as frequências de ocorrência de H_s mostrados no Gráfico 21, e conseqüentemente os sistemas atmosféricos atuantes em cada região já exaustivamente discutidos anteriormente.

Para a Região Norte (P7) e Nordeste (P14), o intervalo de H_s de maior ocorrência é o mesmo (1,0 m a 1,5 m). Entretanto, os valores de T_e de maior ocorrência estão entre 7 s e 8 s para a Região Norte entre 8 s e 9 s para a Região Nordeste. O Gráfico 28 ainda indica que ondas com essas características de H_s e T_e apresentam valores pouco maiores que 5 kW/m.

A Região Leste (P19) apresenta valores mais frequentemente no intervalo de H_s entre 1,5 m e 2 m, e no intervalo de T_e entre 7 s e 8 s. Esses valores indicam ondas preferencialmente com potência superior a 10 kW/m. Entre as seis regiões, a Leste é a que apresenta a maior concentração dos resultados.

Na Região Leste-Sudeste (P32) têm-se a predominância do mesmo intervalo de H_s que ocorre para a Região Leste (1,5 m a 2,0 m), com valores próximos a 2,0 m ocorrendo mais. Já o intervalo de maior ocorrência de T_e é entre 6 s e 7 s. Com relação à potência, esses valores indicam uma concentração maior na ocorrência de ondas com valores entre 5 kW/m e 15 kW/m.

A Região Sudeste apresenta H_s ocorrendo com maior frequência entre 1,5 m e 2,5 m, enquanto que T_e ocorre com maior frequência entre 6 s e 7 s, resultando no potencial das ondas variando, de forma significativa, entre 10 kW/m e 20 kW/m.

A Região Sul, por sua vez, apresenta o mesmo intervalo de ocorrência de T_e que a Região Sudeste (6 s a 7 s), porém os valores de H_s são maiores, ocorrendo com maior frequência entre 2,0 m e 3,0 m. Isso resulta em ondas com maior potência, apresentando com maior frequência valores entre 10 kW/m e 30 kW/m.

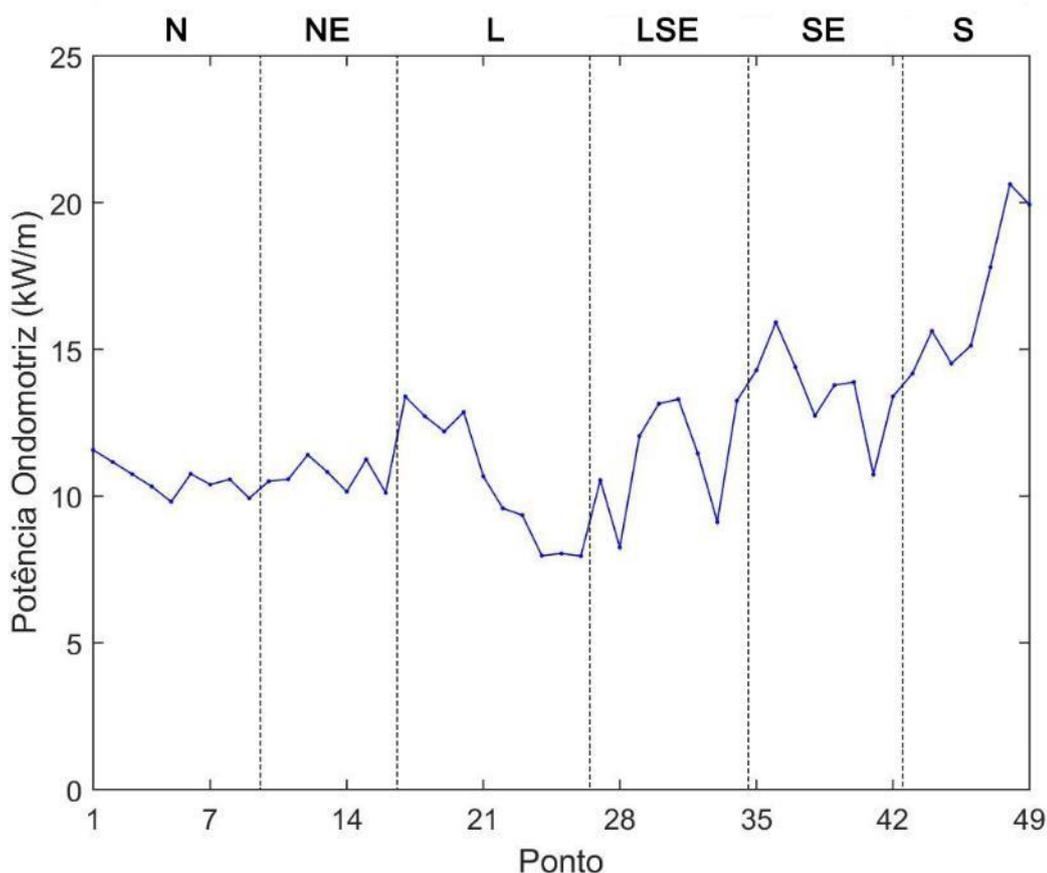
6.3.1 Caracterização Anual de P

Os valores médios anuais da potência ondomotriz, P , em cada um dos 49 pontos selecionados nas seis regiões são apresentados no Gráfico 29. Pode-se observar que a região com a maior média anual da potência ondomotriz é a Região Sul, com o ponto P48 sendo o mais energético em toda a área de estudo, e apresentando 20,63 kW/m.

A Região Norte apresenta potencial praticamente uniforme entre os seus pontos, com maior potencial ocorrendo no ponto P1 com 11,57 kW/m, enquanto que o menor potencial ocorreu no ponto P5 com 9,80 kW/m. Os valores baixos de potencial na região refletem a baixa

altura das ondas na região como foi constatado a partir da distribuição de H_s apresentada no Gráfico 21.

Gráfico 29 - Média anual da potência ondomotriz



As siglas N, NE, L, LSE, SE e S indicam a região da margem continental em que os pontos estão localizados na área de estudo. Fonte: Autor.

O comportamento da Região Nordeste é bastante similar ao da Região Norte com bastante uniformidade entre os valores obtidos. O maior potencial ocorre em P12, com 11,40 kW/m, enquanto que o menor ocorre em P16, com 10,11 kW/m. Os valores praticamente constante são resultado do clima de ondas bastante regular na região em decorrência da atuação dos ventos alísios.

A Região Leste apresenta dois comportamentos. Um com maiores potenciais, entre os pontos P17 e P20, onde a influência dos alísios de Sudeste é maior, e outro com menores potenciais, entre os pontos P21 e P26, onde os dois sistemas principais atuantes na costa brasileira, a ZCIT e o ASAS, apresentam menos influência devido à distância da área em relação a eles. Assim, na Região Leste o maior potencial ocorre no ponto P17, com 13,39 kW/m, e o menor ocorre no ponto P24, com 7,97 kW/m.

As Regiões Leste-Sudeste, Sudeste e Sul apresentam comportamento semelhante, com o potencial apresentando tendência de crescimento com o aumento das latitudes. Entretanto, devido à alta variabilidade temporal e espacial dos sistemas climáticos na região (SILVA, 2013), há uma variação significativa mesmo entre pontos adjacentes. Além disso, a profundidade e a distância em relação a costa (Apêndice F) parecem afetar os resultados obtidos. Para essas três regiões os pontos de maior potencial são, respectivamente, P31 (13,30 kW/m), P36 (15,92 kW/m) e P48 (20, 63 kW/m). Já os pontos de menor potencial são, respectivamente, P28 (8,25 kW/m), P41 (10,73 kW/m) e P45 (14,62 kW/m).

A influência da profundidade nos valores de P nessas regiões pode ser melhor observada na Região Sudeste. O ponto P36, o de maior potencial apresenta profundidade de 1.109 m, enquanto que o ponto P41, o de menor potencial, apresenta 111 m de profundidade.

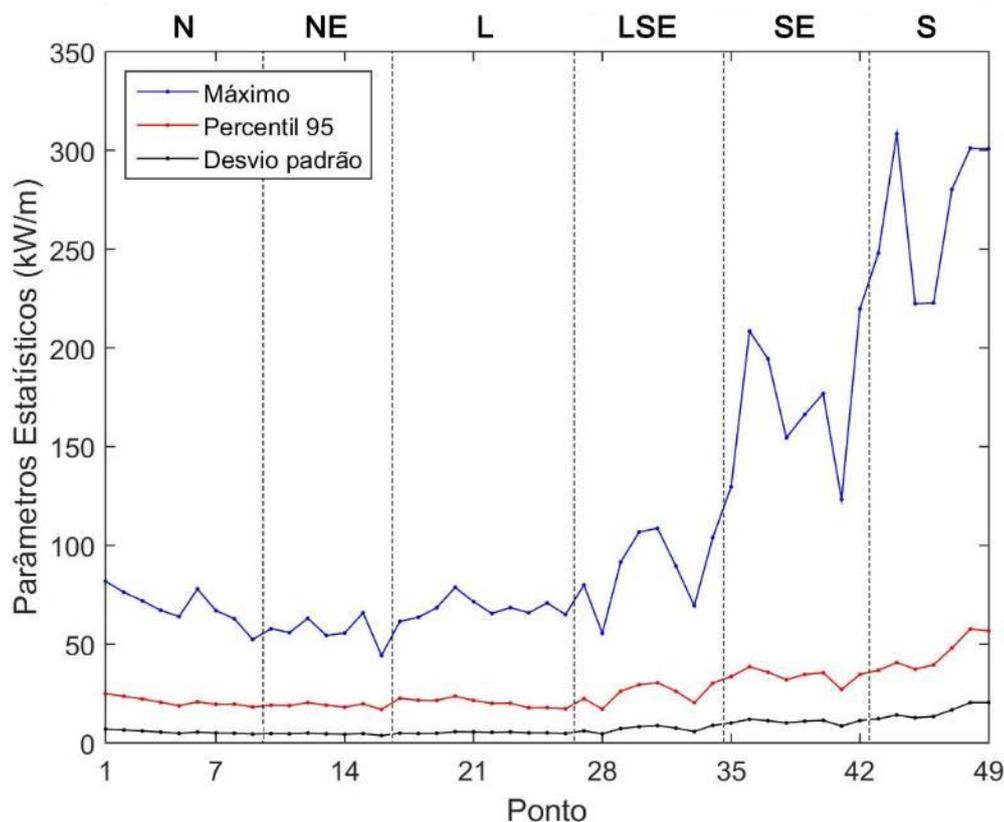
Os valores de média encontrados são bastante inferiores àqueles utilizados para considerar um local como tendo um grande recurso disponível. Em termos de comparação, Portugal tem locais na parte continental com valores acima de 40 kW/m (RUSU e GUEDES SOARES, 2009), mais do que duas vezes o maior valor encontrado para a costa do Brasil. Entretanto, os valores obtidos são próximos ou melhores do que outros locais, como Península da Coreia (KIM *et al.*, 2011) e Itália (LIBERTI, CARILLO e SANNINO, 2013), cada um com valores encontrados de até 11 kW/m. Além disso, as médias anuais da potência encontradas para a região offshore do Brasil estão em acordo com as obtidas por estudos realizados anteriormente no local, como os de Carvalho (2010) e Silva (2013).

Utilizando os valores de P médio anual dos 49 pontos espalhados ao longo de toda a costa brasileira, foi calculada a P média da costa brasileira, estimada em 12,01 kW/m. Considerando que a costa do Brasil tem 7.941 km (CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY, 2016), o potencial ondomotriz total disponível ao longo da costa brasileira pode ser calculado em 89,97 GW a uma distância média de 127 km em relação à costa. Esse valor encontrado é próximo ao valor de 90,94 GW encontrado por Carvalho (2010) em um estudo também realizado ao longo de toda a costa brasileira.

Entretanto, para ser considerável viável, a distância da instalação de WEC em relação à costa precisa ser significativamente menor. Isso significa uma redução na potência ondomotriz estimada devido às perdas de energia que ocorre nas águas intermediárias e rasas. Babarit *et al.* (2012) menciona uma perda de cerca de 10% entre águas profundas e rasas sob condições de ondas típicas. Porém, para a instalação de um parque ondomotriz, medições diretas ou modelagens são necessárias para levar em consideração os efeitos dissipativos das águas rasas e intermediárias.

O Gráfico 30 apresenta a análise estatística do recurso ondomotriz em termos de potência máxima (P_{MAX}), desvio padrão (P_{σ}) e do percentil 95 ($P_{95\%}$). Nele pode ser identificado um aumento da maioria dos parâmetros com o aumento da latitude, assim como aconteceu com H_s (Gráfico 19). A exceção são os valores de P_{MAX} na Região Norte que apresenta tendência de diminuição com o aumento da latitude

Gráfico 30 - Parâmetros estatísticos anuais da potência ondomotriz



As siglas N, NE, L, LSE, SE e S indicam a região da margem continental em que os pontos estão localizados na área de estudo. Fonte: Autor.

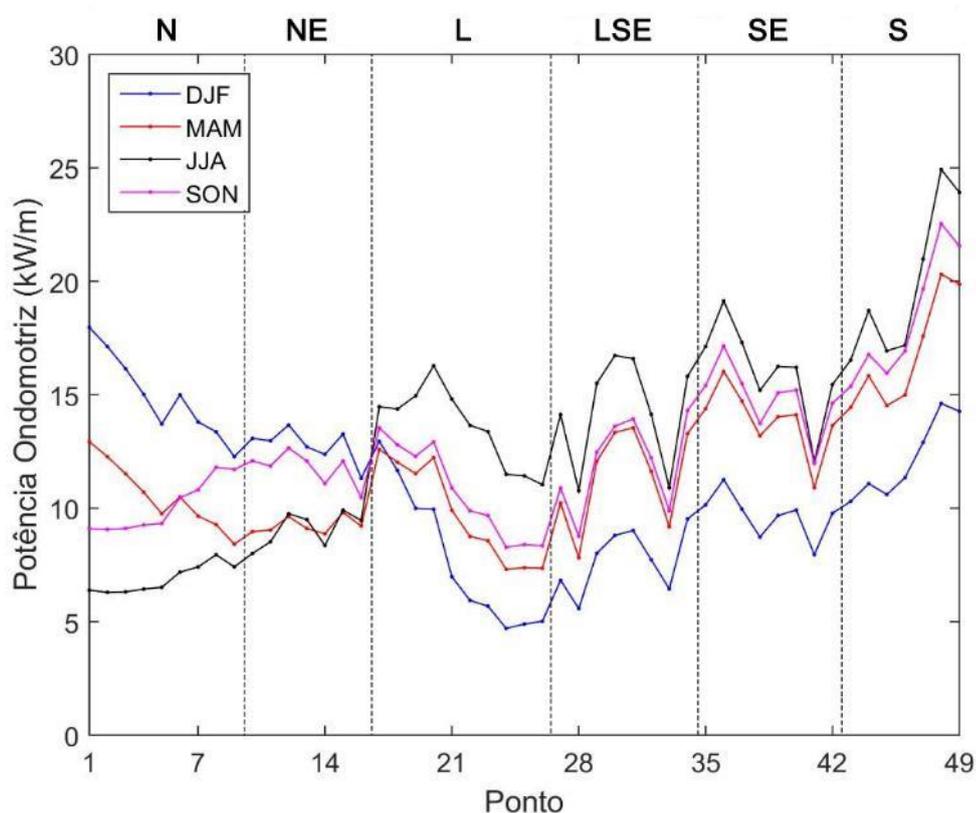
Apesar da tendência de crescimento na área de estudo dos valores de P_{MAX} , $P_{95\%}$ e P_{σ} , como pode ser observado Gráfico 30, essa tendência só se intensifica a partir da Região Leste-Sudeste, com os valores nas Regiões Norte, Nordeste e Leste apresentando pouca variação. Assim, a baixa variabilidade encontrada nessas três regiões, combinada com a baixa variabilidade direcional mostrada no Gráfico 21 indica estados de mar constantes.

Em termos de aproveitamento do potencial disponível, o fato das Regiões Norte, Nordeste e Leste apresentarem estados de mar constantes, pode compensar os baixos valores de potência ondomotriz média anual encontrados. Já para as regiões Sudeste e Sul, a análise conjunta dos parâmetros apresentados no Gráfico 30, indicam a ocorrência de eventos extremos, assim como ocorreu na análise de H_s apresentada no Gráfico 19.

6.3.2 Caracterização Sazonal de P

O Gráfico 31 apresenta a média sazonal da potência ondomotriz ao longo das seis regiões. Pode-se observar que durante DJF as Regiões Norte e Nordeste apresentam os maiores potenciais ondomotriz ao longo de toda a costa brasileira. De acordo com Silva (2013), isso pode ser explicado pela baixa variabilidade dos ventos alísios que agem na formação das ondas dessa região durante esse período. A Região Leste apresenta uma diminuição dos valores de P médio à medida que aumenta a latitude. A diminuição é resultado da diminuição da influência dos alísios de Sudeste na formação das ondas. Nas Regiões Leste-Sudeste, Sudeste e Sul há um crescimento de P com o aumento da latitude, atingindo valores próximos aos das Regiões Norte e Nordeste nos pontos P48 e P49. Esse aumento é resultado da maior proximidade com o ASAS para grandes latitudes. O ponto com maior potencial em toda a área de estudo em DJF é o ponto P1 com 17,97 kW/m.

Gráfico 31 - Média sazonal do recurso ondomotriz



As siglas N, NE, L, LSE, SE e S indicam a região da margem continental em que os pontos estão localizados na área de estudo. Fonte: Autor.

Em MAM os valores de potência ondomotriz média das Regiões Norte e Nordeste diminuem, enquanto que os valores médios das demais regiões aumentam até atingirem um

valor máximo no período JJA. O comportamento espacial de P durante MAM segue a mesma tendência apresentada durante DJF.

Durante JJA, nas Regiões Norte e Nordeste são observados os piores resultados, com o pior de todos ocorrendo em P2 (6,29 kW/m). Por sua vez, essa estação é a mais energética para as demais regiões, com o local mais energético (P48) apresentando 24,93 kW/m. Esse padrão deve-se, principalmente, ao inverno no Hemisfério Sul e a intensificação dos fenômenos atmosféricos, fato que também justificou o aumento de H_s e T_e para os pontos em altas latitudes durante o período de JJA. Nesse período, diferente dos anteriores, nas Regiões Norte e Nordeste ocorre um aumento espacial com o aumento da latitude dos valores de P médio. Para as demais regiões o comportamento espacial se mantém.

O período SON, assim como MAM, é um período de transição. Dessa forma, nas Regiões Norte e Nordeste os valores tendem a aumentar quando comparados com JJA, e nas demais regiões os valores tendem a diminuir quando comparado ao mesmo período de JJA.

6.3.3 Caracterização Mensal de P

O Gráfico 32 mostra o recurso ondomotriz mensal médio para as seis regiões analisadas. Pode-se observar que as Regiões Norte e Nordeste apresentam os maiores valores de P nos meses iniciais e finais do ano, com os piores resultados nos meses centrais. Para as outras regiões ocorre o inverso, e os meses mais energéticos são os do meio do ano. Esses resultados coincidem com a maior ou menor atividade dos sistemas atmosféricos que mais atuam nas regiões, conforme já discutido.

Além da diferença na variabilidade temporal ao longo da costa brasileira, o intervalo entre o mês com a menor média e o mês com a maior média de P apresenta resultados semelhantes para todos os pontos. Esse intervalo no ponto que apresenta o maior recurso mensal (P48 com 27,44 kW/m em setembro) é de 13,72 kW/m, valor significativamente menor que os encontrados pela literatura em diferentes partes do mundo. Por exemplo, Rusu e Onea (2016) estimam em 726,2 kW/m o intervalo entre o pior e o melhor mês na Islândia, mais de 50 vezes o encontrado para o ponto P48. Essa informação é importante porque, como aponta Portilla, Sosa e Cavaleri (2013), a baixa variabilidade sazonal pode ser um fator importante de vantagem econômica em projetos de aproveitamento do recurso ondomotriz. Além disso, a baixa variabilidade sazonal remove a necessidade do projeto do WEC ser capaz de suportar diferentes condições de mar.

Gráfico 32 - Valores médios mensais do recurso ondomotriz (continua)

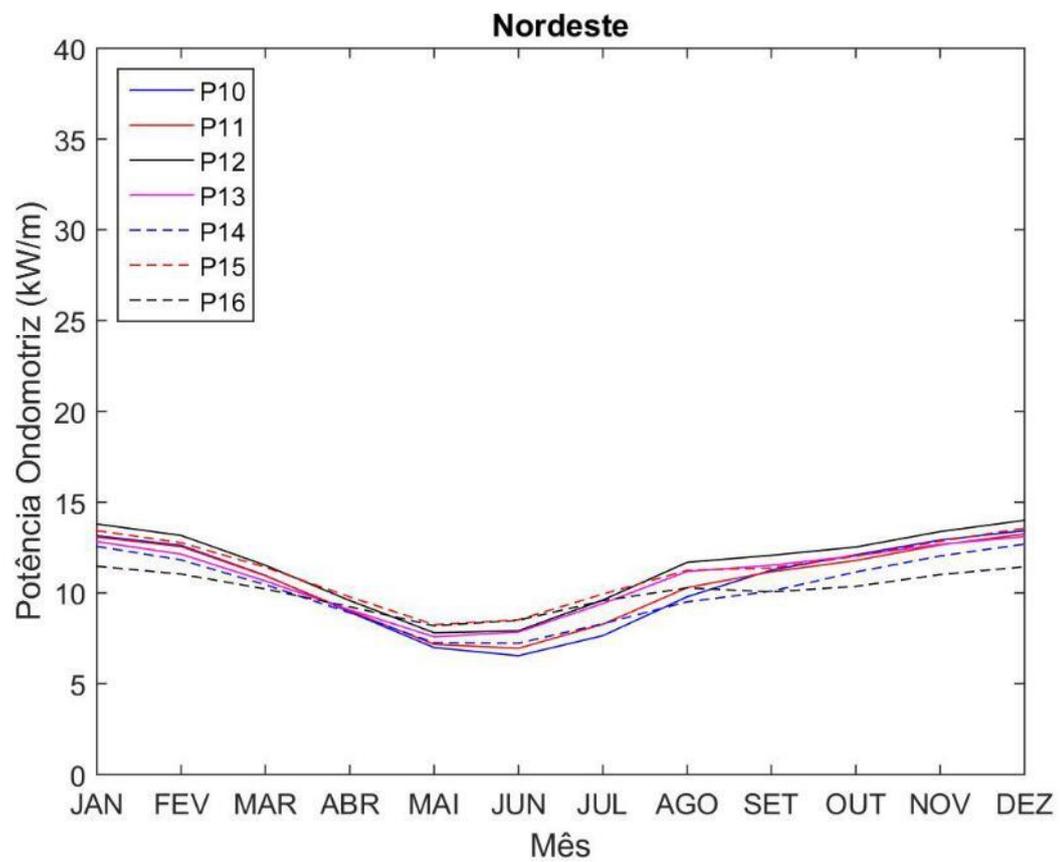
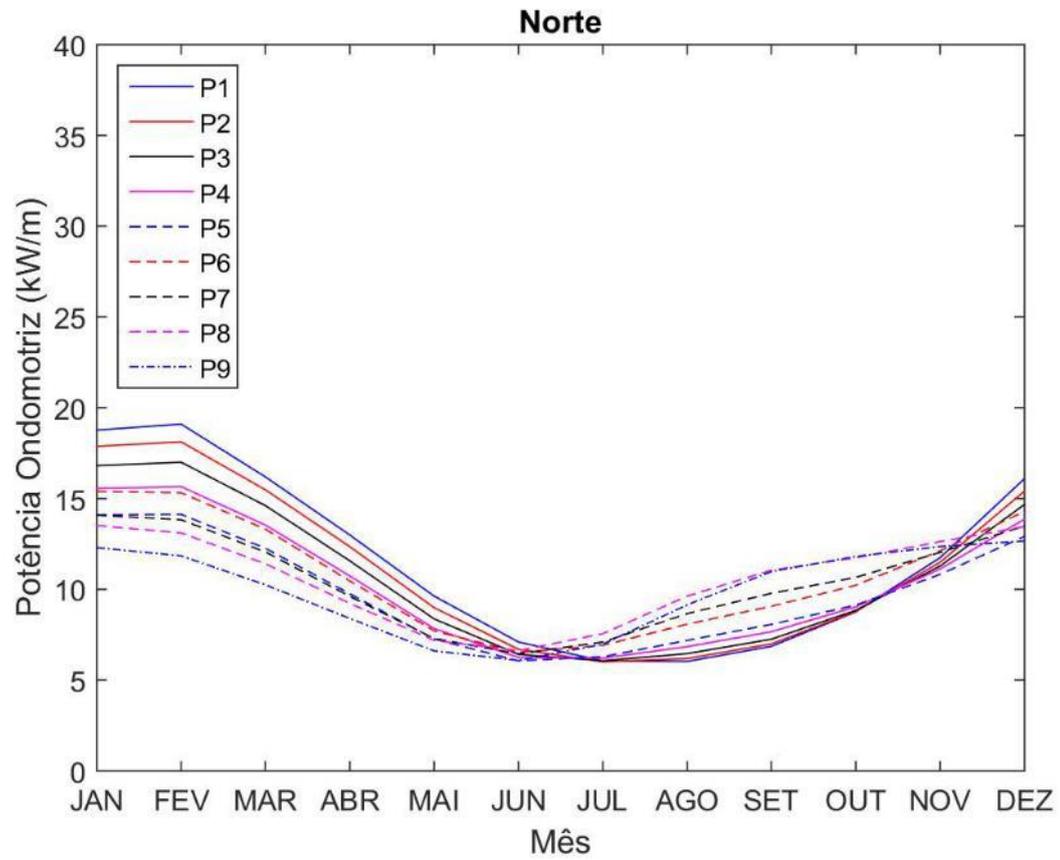


Gráfico 32 - Valores médios mensais do recurso ondomotriz (continuação)

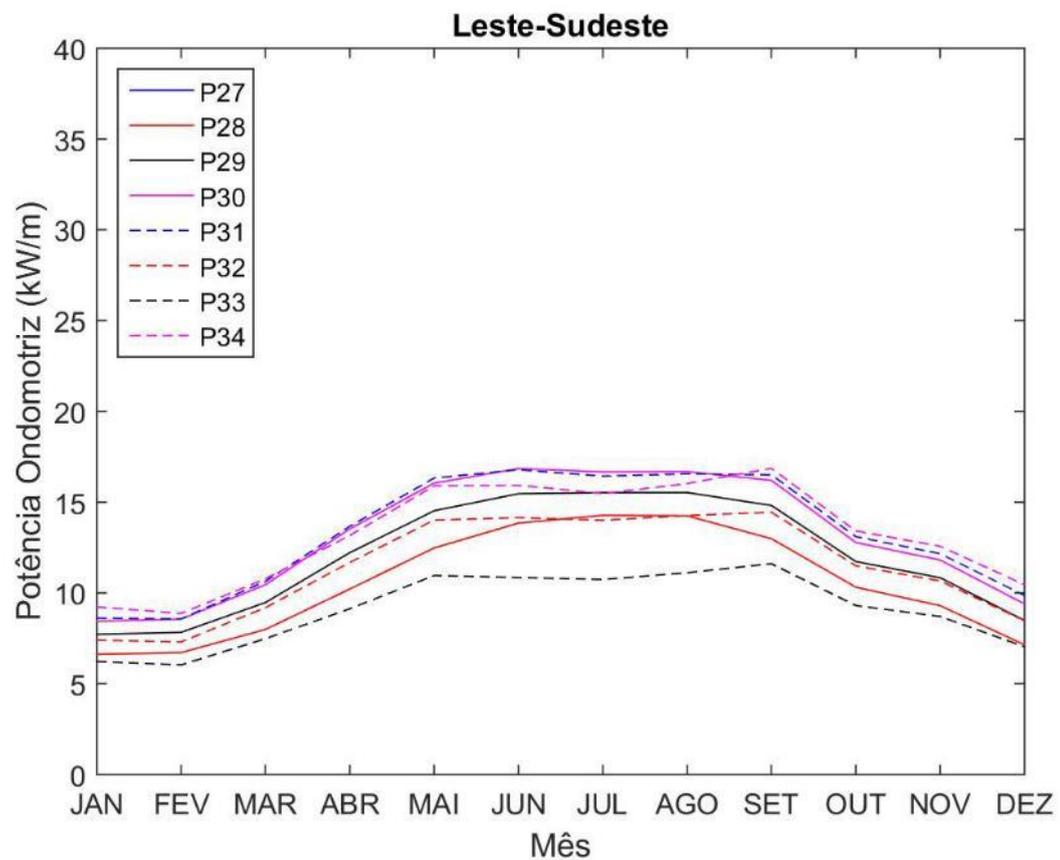
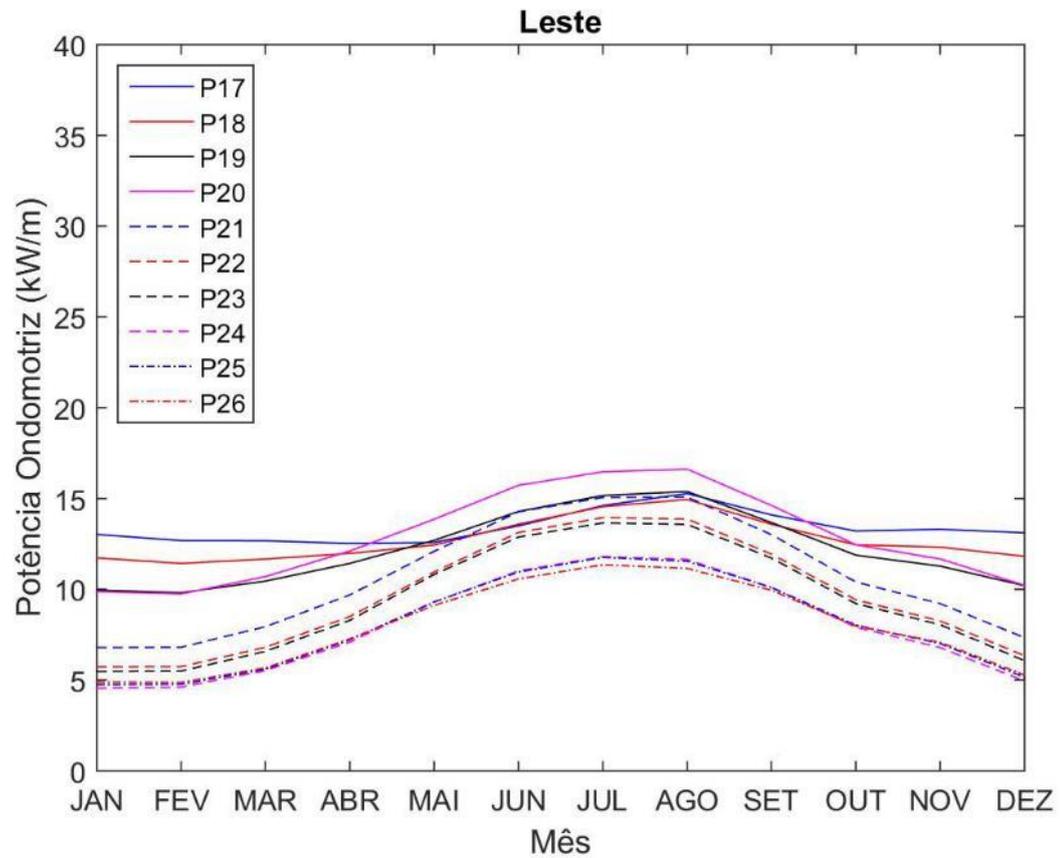
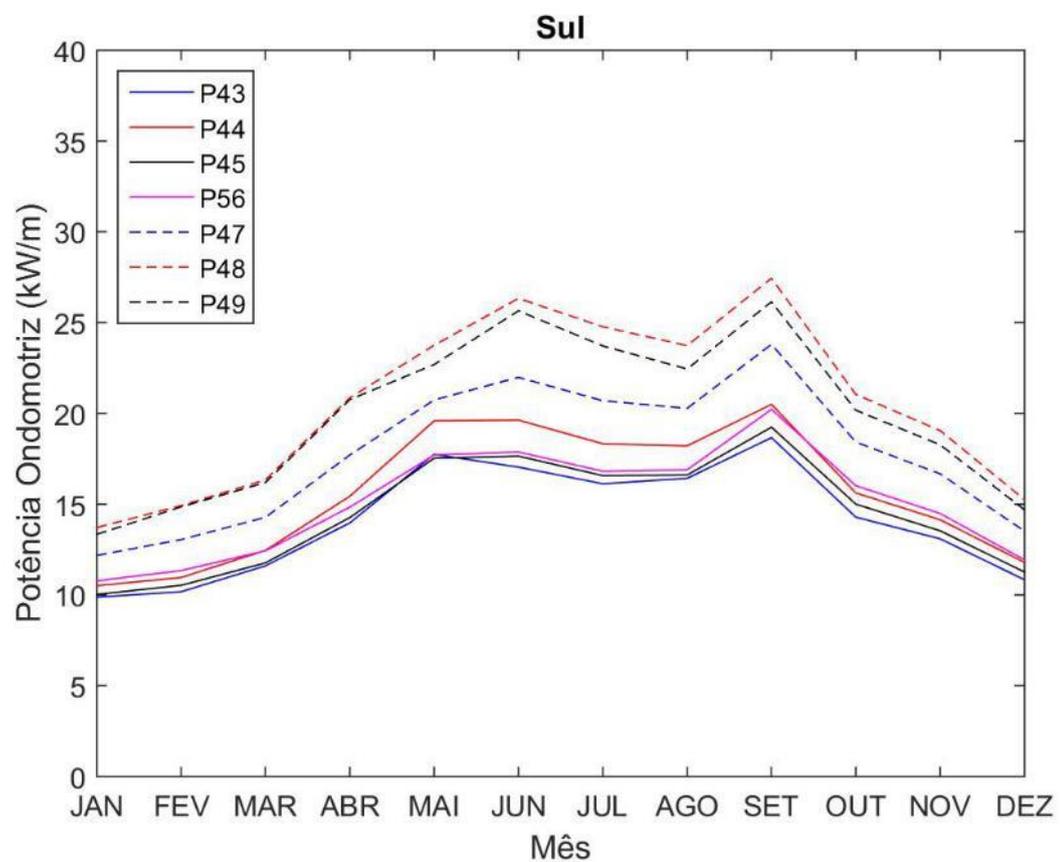
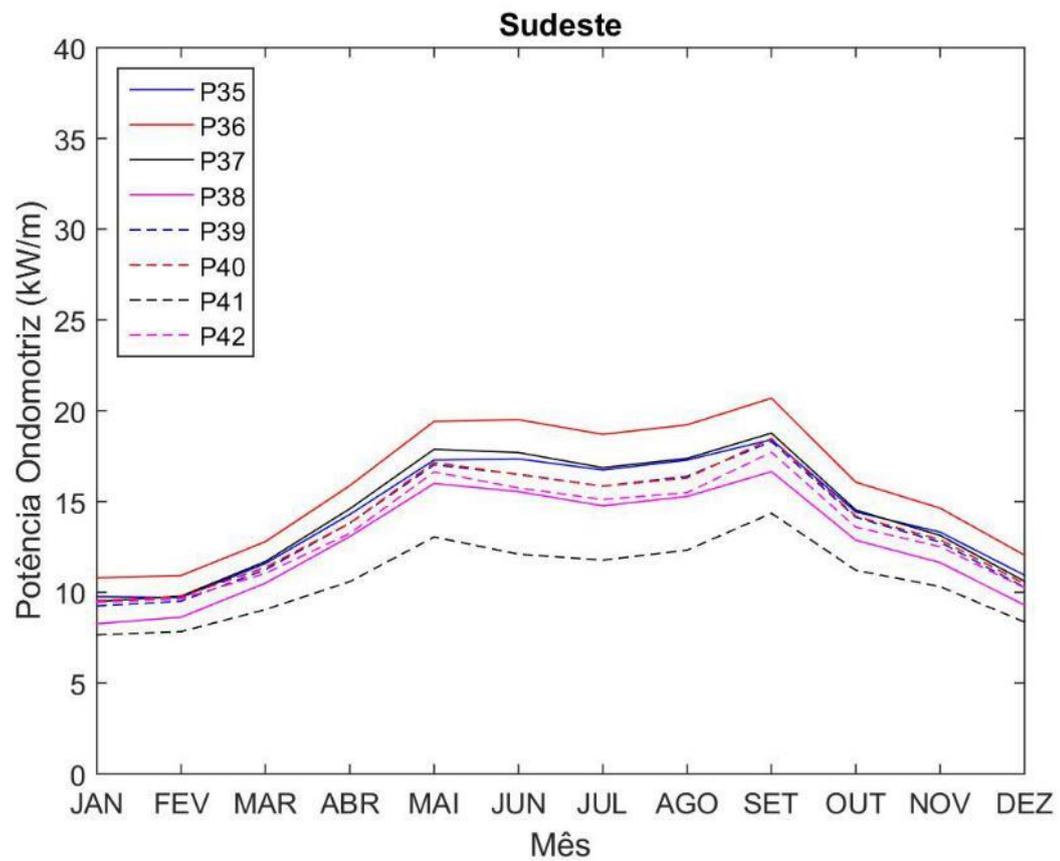


Gráfico 32 - Valores médios mensais do recurso ondomotriz (conclusão)

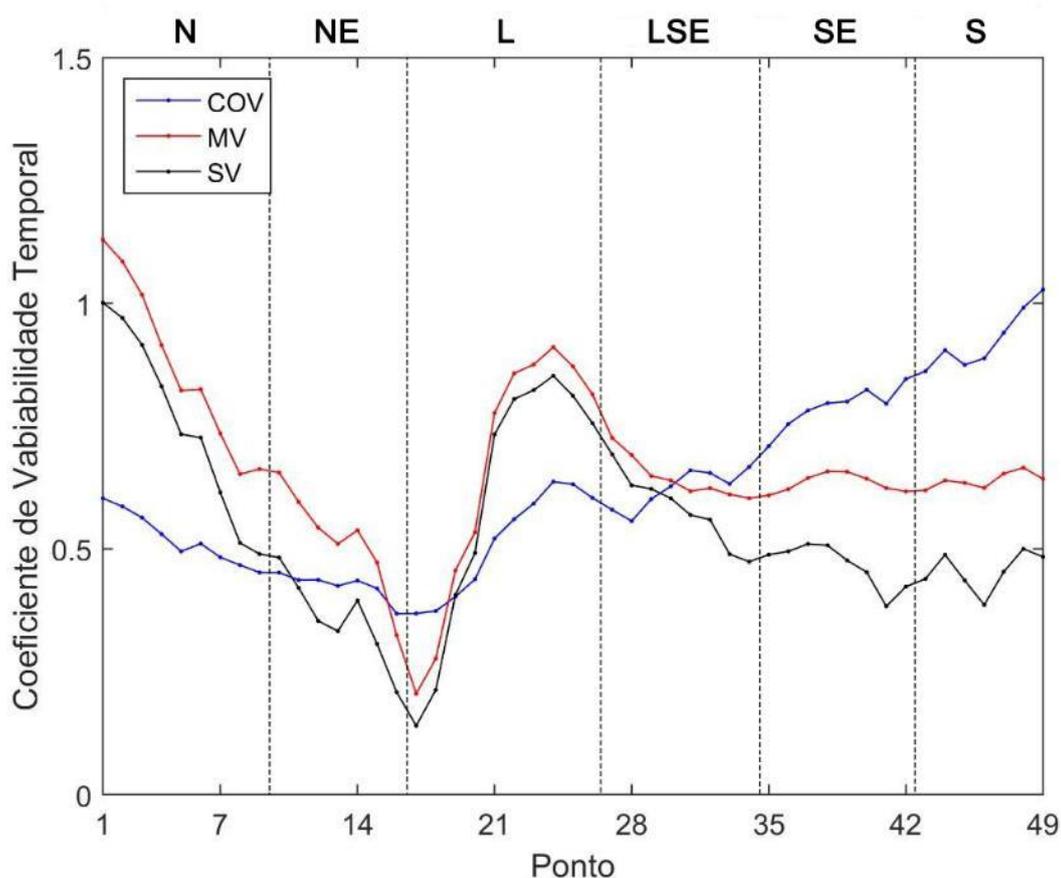


6.3.4 Análise da Variabilidade Temporal de P

Foi realizada uma análise da variabilidade temporal baseada em três coeficientes (COV , MV e SV) na área de estudo. De acordo com Sierra *et al.* (2016) COV próximo a zero indica uma baixa variabilidade; entre 0,85 e 0,90 indica recurso com instabilidade moderada; e COV maior que 1,2 significa uma variabilidade considerável. Para os coeficientes SV e MV , grandes valores significam grande variabilidade sazonal e mensal, respectivamente, e valores menores que 1 indicam variabilidade moderada. Outro estudo que utilizou esses coeficientes de variabilidade temporal foi Sierra *et al.* (2013), cuja área estudada foi a ilha Lanzarote (Ilhas Canárias, Espanha).

O Gráfico 33 apresenta os resultados dos três coeficientes de variabilidade temporal para as seis regiões estudadas.

Gráfico 33 - Coeficientes de Variabilidade Temporal



Fonte: Autor.

A Região Norte apresenta COV entre 0,60 (P1) e 0,45 (P9). Os valores de MV e SV apresentam também os maiores resultados em P1 (1,00 e 1,13, respectivamente), e os menores

em P9 (0,51 e 0,65, respectivamente). Assim, a variabilidade da Região Norte é de moderada a grade nos pontos mais ao norte e moderada nos pontos mais ao sul. Essa variabilidade significativa está relacionada com a grande diferença na intensidade das ondas que ocorre na região entre os períodos de DJF (verão no Hemisfério Sul) e JJA (Inverno no Hemisfério Sul). Como os pontos mais ao norte da região estão mais sujeitos aos sistemas climáticos do Hemisfério Norte em DJF, a variabilidade desses pontos acaba sendo maior também.

Para a Região Nordeste a tendência de diminuição da variabilidade observada na Região Norte se mantém. Dessa forma, o maior valor dos coeficientes ocorre nas baixas latitudes da região e o menor nas altas latitudes da região. O ponto P10 apresenta *COV* igual a 0,45, *SV* igual a 0,48 e *MV* igual a 0,66, sendo o ponto com os maiores resultados da Região Nordeste. Já o ponto P16 apresenta *COV* igual a 0,37, *SV* igual a 0,21 e *MV* igual a 0,32, sendo o ponto com os menores resultados. Como a Região Nordeste está o ano inteiro sob a influência dos constantes ventos alísios, a variabilidade na região é baixa, principalmente nos pontos mais ao sul.

A Região Leste é a que apresenta o ponto de menor variabilidade temporal de todas as regiões, com *COV*, *SV* e *MV* igual a, respectivamente, 0,37, 0,14 e 0,21 no ponto P17. Entretanto, na Região Leste a tendência é de aumento da variabilidade temporal com o aumento das latitudes. Isso porquê ocorre também um aumento da influência do ASAS, que possui maior variação tanto temporal quanto espacial em relação aos alísios. O ponto P24 é o que apresenta maior variabilidade na região com *COV*, *SV* e *MV* igual a, respectivamente, 0,64, 0,185 e 0,91.

Para a Região Leste-Sudeste o *COV* continua aumentando, enquanto que *MV* e *SV* apresentam uma leve diminuição. A inversão de *MV* e *SV* é motivada pelo aumento de *P* médio para as altas latitudes, enquanto que a diferença entre os piores e os melhores resultados permanece praticamente constante. O maior *COV* ocorre no ponto P34 (0,67) e o menor no ponto P28 (0,56). Já para *MV* e *SV*, o maior resultado ocorre no ponto P27 (0,69 e 0,73, respectivamente), enquanto que o menor ocorre no ponto P34 (0,47 e 0,60, respectivamente). Assim, a variabilidade na Região Leste-Sudeste pode ser considerada de baixa a moderada.

Na Região Sudeste e Sul o comportamento é bem semelhante, com *COV* crescendo proporcionalmente ao aumento das latitudes, e *MV* e *SV* praticamente estacionados no patamar de 0,6 e 0,5 respectivamente. Dessa forma, a variabilidade da Região Sudeste é moderada e da Região Sul é de moderada a alta.

O aumento da variabilidade nas Regiões Sudeste e Sul está diretamente ligada ao aumento da influência dos sistemas atmosféricos da região, ou seja, do ASAS dos ciclones

extratropicais e dos sistemas frontais, sendo que esses dois últimos os maiores responsáveis devido a sua alta variabilidade temporal e espacial nos meses de JJA (SILVA, 2013).

6.4 ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS WEC

O desempenho dos WEC na costa do Brasil foi avaliado por meio de três análises diferentes. São elas: Análise global de desempenho; Análise da dependência direcional; e Análise de escala.

6.4.1 Análise Global de Desempenho

Para avaliar a quantidade de energia de onda que pode ser convertida em cada um dos 49 pontos estudados, foram inicialmente selecionados os três WEC descritos na metodologia: Pelamis, Wave Dragon e AquaBuoy. Cada um desses WECs apresenta princípios de conversão diferentes e podem ser instalados em águas profundas. O Pelamis é um dispositivo atenuador, o Wave Dragon é um dispositivo de galgamento (e exterminador), e o AquaBuoy é um dispositivo absorvedor pontual. As principais características de cada um deles são apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 - Características dos WEC selecionados

WEC	Princípio de funcionamento	Potência nominal (kW)	Profundidade recomendada (m)
AquaBuoy	Absorvedor Pontual	250	> 50
Pelamis	Atenuador	750	> 50
Wave Dragon	Galgamento	7000	> 30

Fonte: Adaptado de Rusu e Onea (2016).

A energia convertida por um WEC é indicada por matrizes de potência, onde cada bin de energia, definido por intervalos de altura significativa e período de energia de onda (RUSU e GUEDES SOARES, 2012), tem seu próprio valor específico de potência convertida. Como apontado por Rusu e Onea (2016), a potência convertida por um WEC depende de um grande número de fatores, alguns desconhecidos ou imperfeitamente conhecidos. Por causa disso, mesmo as matrizes de potência construídas a partir de WEC amplamente testados experimentalmente, apresentam incertezas. Para o Pelamis, Mackay, Bahaj e Challenor (2010) encontraram incertezas de 20% em relação aos resultados estimados.

As matrizes de potência dos WEC foram obtidas de Silva, Rusu e Guedes Soares (2013) e são apresentadas no Apêndice C. A profundidade recomendada em cada WEC foi obtida de Rusu e Onea (2016).

Usando a distribuição bivariável da ocorrência em termos de H_s e T_e (como as do Gráfico 28) em cada ponto, com os mesmos bins de H_s e T_e que os utilizados nas matrizes de potência dos WEC, a potência média convertida (P_e) pôde ser estimada utilizando-se a Equação 62. A partir dos valores de P_e estimados para cada WEC nas condições de estados de mar de cada ponto, a produção elétrica anual (PEA) pôde ser finalmente estimada utilizando-se a Equação 63. Uma consideração que foi feita é que os dispositivos são capazes de produzir o valor apresentado na sua matriz de potência, independentemente da direção incidente da onda. Em outras palavras, nessa primeira análise os WEC foram considerados não dependentes da direção da onda.

O Gráfico 34 apresenta os resultados de PEA para os três WEC selecionados (Aquabuoy, Pelamis e Wave Dragon) nas seis regiões definidas.

Gráfico 34 - Produção elétrica anual dos dispositivos ondomotriz (continua)

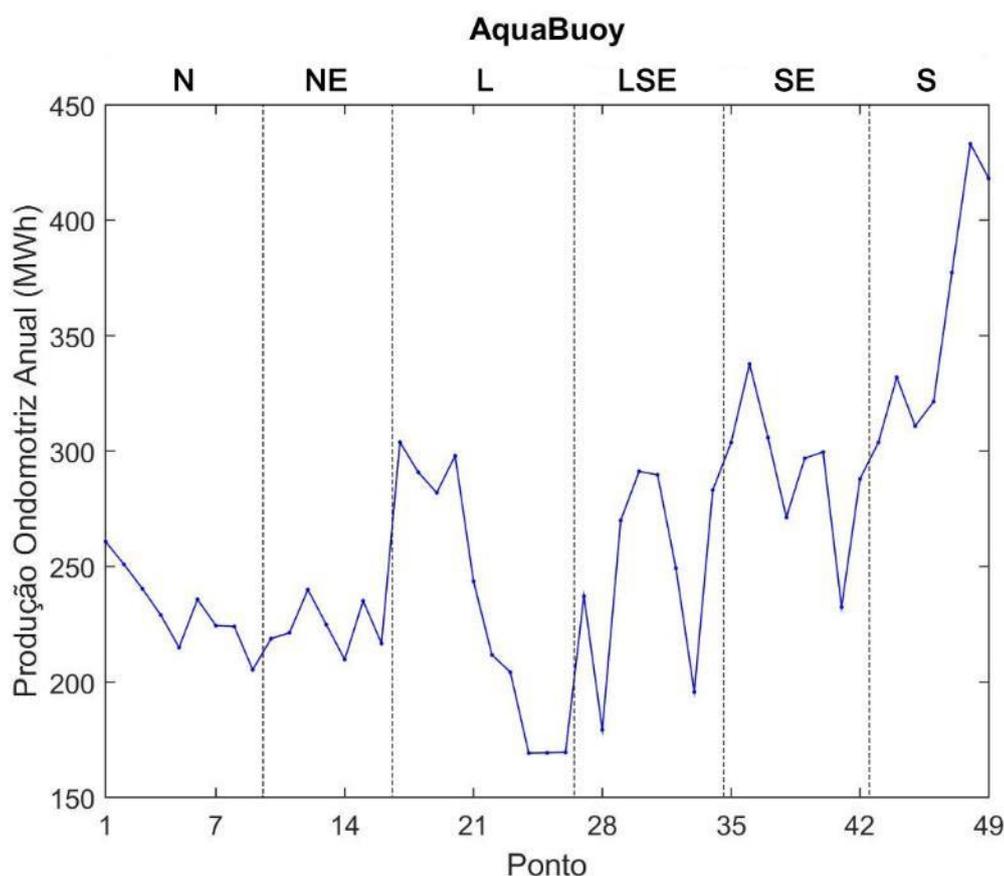
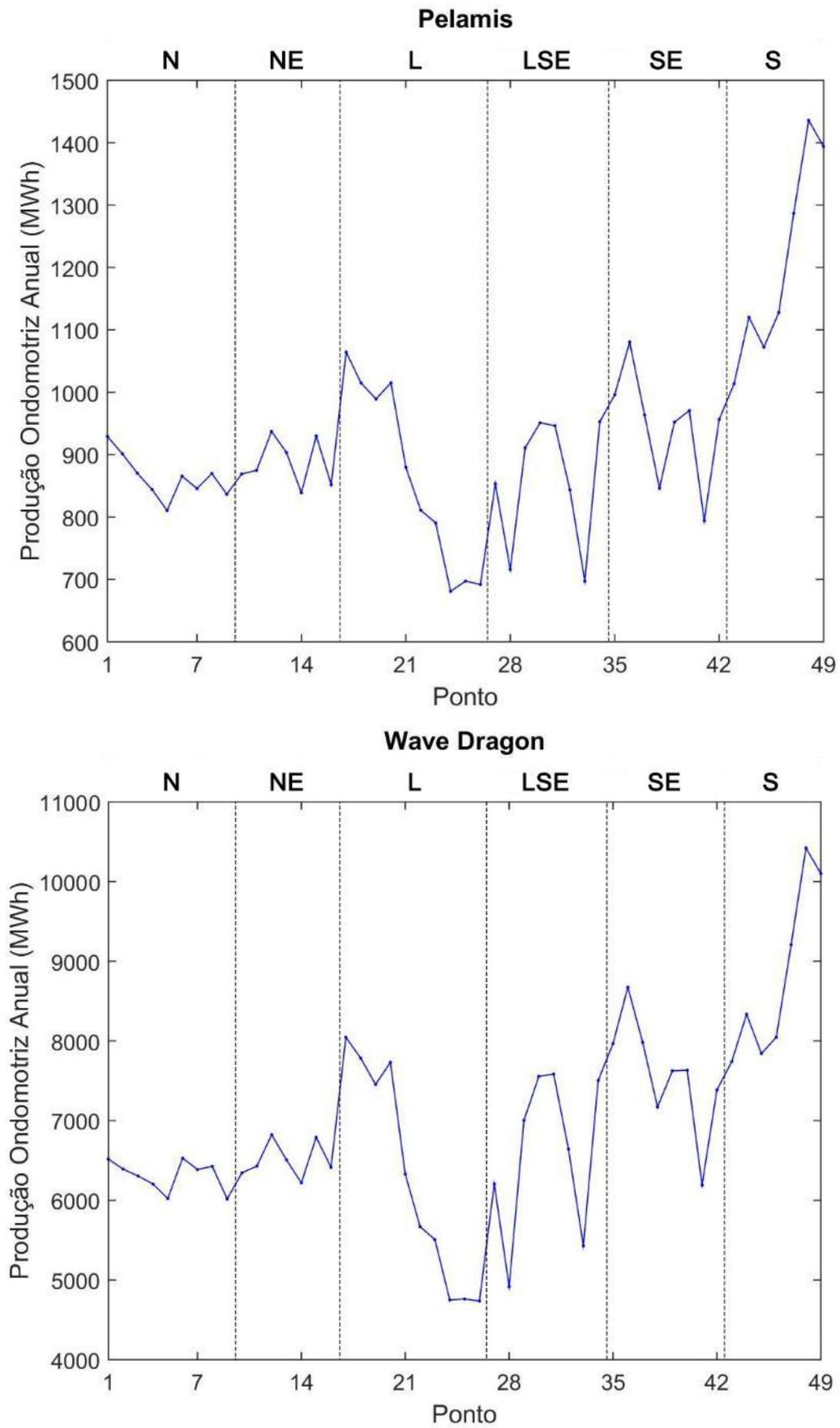


Gráfico 34 - Produção elétrica anual dos dispositivos ondomotriz (conclusão)



Para os dispositivos analisados, o ponto com maior *PEA* é o ponto P48 (Região Sul), com 0,43 GWh (AquaBuoy), 1,46 GWh (Pelamis) e 10,42 GWh (Wave Dragon). Os próximos dois pontos com maior *PEA* são os pontos vizinhos P49 e P47, respectivamente.

Fora da Região Sul, o ponto de maior *PEA* nos três dispositivos na Região Norte é o ponto P1, com 0,26 GWh (AquaBuoy), 0,93 GWh (Pelamis) e 6,52 GWh (Wave Dragon). Na Região Nordeste o ponto que conseguiu o maior valor de *PEA* nos três dispositivos foi o ponto P12, com 0,24 GWh (AquaBuoy), 0,94 GWh (Pelamis) e 6,82 GWh (Wave Dragon). Em relação à Região Leste o ponto que conseguiu o maior valor de *PEA* nos três dispositivos foi o ponto P17, com 0,30 GWh (AquaBuoy), 1,06 GWh (Pelamis) e 8,05 GWh (Wave Dragon).

Para a Região Leste-Sudeste o ponto P30 foi o que conseguiu o maior valor de *PEA* ao se utilizar o AquaBuoy (0,29 GWh) e o Pelamis 0,95 GWh). Já o ponto P31 foi o que obteve melhor resultado para o Wave Dragon (7,58 GWh). Por sua vez, na Região Sudeste o ponto que conseguiu o maior valor de *PEA* nos três dispositivos foi o ponto P36, com 0,34 GWh (AquaBuoy), 1,08 GWh (Pelamis) e 8,67 GWh (Wave Dragon).

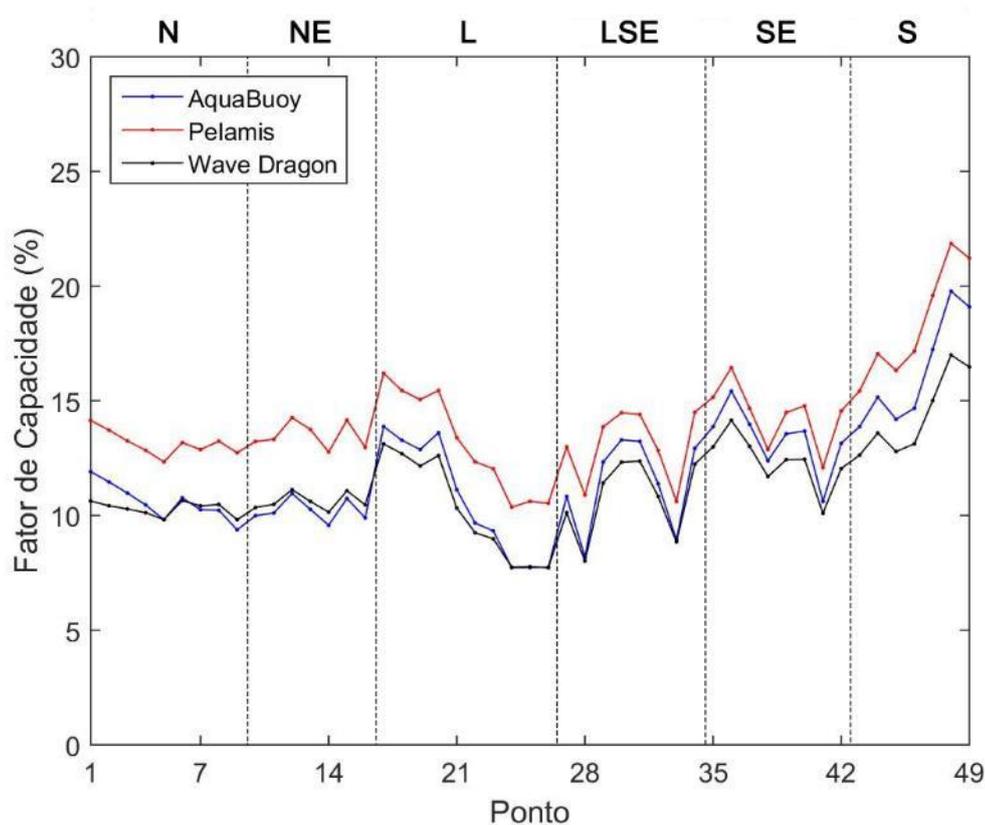
Os resultados apresentados no Gráfico 34 são condizentes com os valores de H_s e de P analisados anteriormente nos Gráfico 17 e Gráfico 29, e tem comportamento justificado pelos mesmos fenômenos atmosféricos. Um fato importante que pode ser observado no Gráfico 34 é o comportamento similar dos três dispositivos ao longo da área de estudo. A similaridade entre os comportamentos pode ser parcialmente explicada pelas características não muito diferentes que os estados de mar apresentam nas seis regiões, como pode ser visto no Gráfico 28.

Além disso, pode ser observado, a partir das matrizes de potência dos WEC (Apêndice C), que eles foram desenvolvidos para apresentarem melhor desempenho em condições diferente daquelas apresentadas no Brasil. Os valores de T_e mais comuns no Brasil estão entre 6 s e 9 s (como pode ser observado no Gráfico 28), enquanto que o Wave Dragon apresenta melhor desempenho em T_e entre 10 s e 15 s. Para os outros dois dispositivos o intervalo de melhor desempenho de T_e ocorre para períodos mais baixos, 8 s a 12 s para o AquaBuoy, e 6,5 a 12 s para o Pelamis. Esse fato impacta diretamente no fator de capacidade dos WEC.

O Gráfico 35 apresenta a comparação dos fatores de capacidade dos três dispositivos, e mostra que as três curvas são similares entre si, com o Pelamis se destacando um pouco em relação aos outros, principalmente nas Regiões Norte, Nordeste e Leste. Entretanto, os melhores resultados para os três WEC são obtidos na Região Sul, possivelmente pelos estados de mar dessa região se aproximarem mais dos estados de mar de projeto do dispositivo. Os valores relativamente maiores na parte norte da Região Leste devem-se provavelmente a baixa

variabilidade temporal da região, o que permite que o dispositivo produza uma quantidade constante de energia ao longo de todo o ano.

Gráfico 35 - Fator de Capacidade dos três WEC selecionados



Fonte: Autor.

Os pontos com melhor performance foram os mesmos que apresentaram maior valor de produção ondomotriz anual. O Pelamis atingiu fator de capacidade entre 10,36% e 21,85%, AquaBuoy entre 7,73% e 19,78%, e Wave Dragon entre 7,22% e 17,00%. Esses valores são comparáveis com os obtidos por outros trabalhos apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Comparação entre os C_f do Brasil e o de outros locais do mundo

Local	Referência	Potência ondomotriz média (kW/m)	Fator de Capacidade (%)		
			Aqua Buoy	Pelamis	Wave Dragon
Brasil (P1)	-	11,57	11,91	14,14	10,63
Brasil (P17)	-	13,39	13,87	16,20	13,12
Brasil (P36)	-	15,92	15,42	16,44	14,15
Brasil (P48)	-	20,63	19,78	21,85	17,00
Alghero, Itália	Bozzi, Archetti e Passoni, 2014	10,30	8,70	9,40	8,80
Mazara del Vallo, Itália	Bozzi, Archetti e Passoni, 2014	4,00	3,70	4,20	3,90
Arq. da Madeira, Portugal	Rusu e Onea, 2016	26,48	11,6	9,63	24,20
Ilhas Canárias, Espanha	Rusu e Onea, 2016	16,98	8,12	7,28	19,30
Islândia	Rusu e Onea, 2016	45,05	17,90	15,30	33,40
Açores, Portugal	Rusu e Onea, 2016	37,59	22,20	13,10	32,00
Marrocos ⁽¹⁾	Sierra <i>et al.</i> , 2016	29,94	-	14,76	25,51

⁽¹⁾ Apenas a parte da costa localizada no Oceano Atlântico.

Fonte: Autor.

Observando a Tabela 19, o fator de capacidade em P48 é maior para o AquaBuoy (19,78%) e para o Pelamis (21,85%) do que os obtidos na Islândia (17,90% e 15,30%), mesmo com a potência ondomotriz média desse último (45,05 kW/m) sendo mais de duas vezes maior que a do ponto P48 (20,63 kW/m). Na verdade, o resultado do fator de capacidade obtido pelo Pelamis no ponto P48 é o melhor de todos os locais apresentados da Tabela 19. Para o AquaBuoy, resultados semelhantes foram obtidos com o ponto P48 apresentando resultados maiores que todos os outros, com exceção dos Açores (22,30%). Para o Wave Dragon os resultados para o Brasil foram inferiores do que os obtidos em locais no Oceano Atlântico Norte (Arquipélago da Madeira, Ilhas Canárias, Islândia, Açores e Marrocos). Isso provavelmente ocorreu como consequência da matriz de potência do Wave Dragon apresentar os maiores valores para estados de mar bem diferente dos apresentados no Brasil, como mencionado anteriormente.

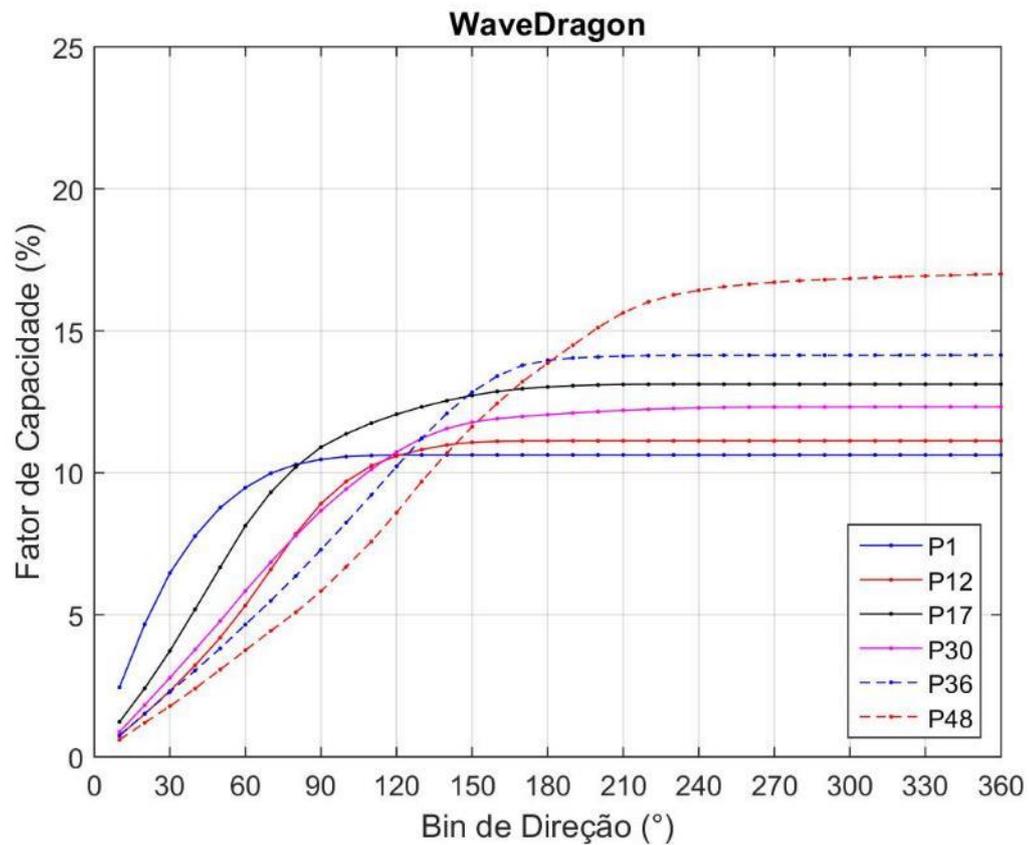
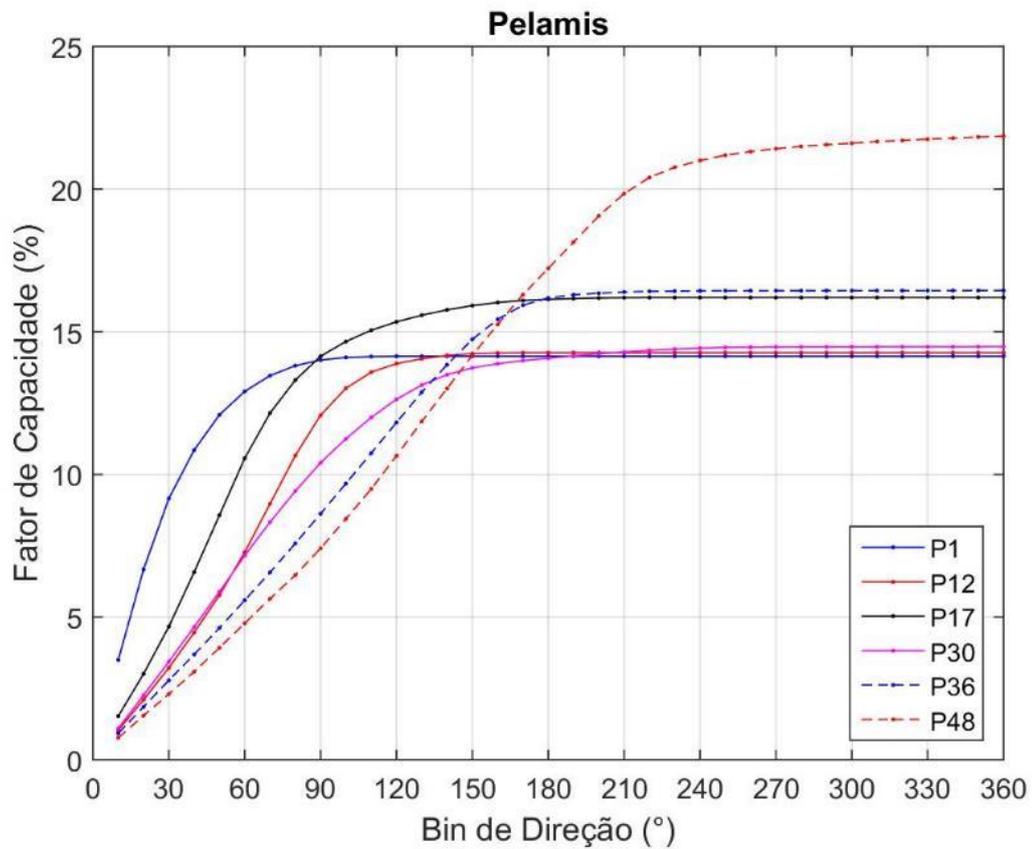
Os resultados apresentados na Tabela 19 são interessantes porque parecem indicar que a potência ondomotriz média não é o fator determinante para a produtividade de um parque ondomotriz. Conclusões similares foram apresentadas por Contestabile, Ferrante e Vicinanza (2015) e Babarit *et al.* (2012). Como aponta Contestabile, Ferrante e Vicinanza (2015), o parâmetro potência ondomotriz não consegue capturar a distribuição temporal e direcional das ondas incidentes, nem as limitações dos WEC em converter energia em condições de estados de mar de baixa e alta energia.

6.4.2 Análise da Dependência Direcional

Foi realizada uma análise da influência da distribuição direcional das ondas em relação ao fator de capacidade dos WEC. Como o AquaBuoy é um dispositivo do tipo ponto absorvedor, e teoricamente independe da direção da onda incidente devido a sua simetria axial, a análise foi realizada utilizando-se apenas os dispositivos Pelamis e Wave Dragon. Assim, os WEC foram considerados sem nenhum tipo de controle direcional, e com eles instalados de forma que a sua direção principal esteja alinhada com a direção média das ondas incidentes no local, calculada a partir da base de dados do ERA-Interim. Os bins de direção analisados foram centrados na direção média da onda e incrementados em 10° por vez até atingir 360°.

Os resultados são apresentados no Gráfico 36 para as Regiões Norte (P1), Nordeste (P12), Leste (P17), Leste-Sudeste (P30), Sudeste (P36) e Sul (P48). Esses pontos foram escolhidos por serem as que apresentam os melhores resultados de acordo com o Gráfico 35.

Gráfico 36 - Variação do fator de capacidade em função da direção



Os pontos P1, P12, P17, P30, P36 e P48 representam, respectivamente as Regiões Norte, Nordeste, Leste, Leste-Sudeste, Sudeste e Sul. Fonte: Autor.

A partir do Gráfico 36, observa-se que até o intervalo de 120° o fator de capacidade nas Regiões Norte (P1), Nordeste (P12) e Leste (P17) são maiores que o fator de capacidade das Regiões Leste-Sudeste (P30), Sudeste (P36) e Sul (P48). Isso ocorre devido à maior concentração das ondas incidentes em poucas direções nas Regiões Norte, Nordeste e Leste, como pode ser observado no Gráfico 21. Como consequência, esses 120° concentram praticamente toda a energia ondomotriz incidente nesses locais. Assim, se um WEC não apresenta capacidade de capturar as ondas incidentes de um intervalo de direção bastante largo, locais com menor recurso ondomotriz (P1, P12 e P17), mas com menor distribuição direcional, a princípio podem apresentar melhor fator de capacidade e serem mais apropriados para aproveitamento de energia do que aqueles que apresentam maior recurso, mas com maior distribuição direcional (P30, P36 e P48).

6.4.3 Análise de Escala

Utilizando uma metodologia descrita por Iuppa *et al.* (2015), foi realizada uma análise de escala nos três dispositivos (Aquabuoy, Pelamis e Wave Dragon) para os pontos de cada uma das seis regiões com os melhores resultados (P1, P12, P17, P30, P36 e P48), de acordo com o Gráfico 34. Os WEC foram reduzidos de escala a uma taxa de 1%, e para cada nova escala foi calculada uma nova matriz de potência utilizando as Equações 68 a 70. A partir dessa nova matriz de potência foram estimados os valores de potência nominal, potência média, produção elétrica anual e fator de capacidade. A metodologia utilizada só pôde ser aplicada porque os WEC analisado são projetados para condições offshore.

O Gráfico 37 apresenta os valores de C_f para os três dispositivos. O ponto vermelho indica a escala em que o C_f é máximo para aquele WEC. Pode-se notar que dentre os três WEC analisados após a redução de escala, o que apresentou melhores resultados de fator de capacidade foi o Wave Dragon. Para uma escala de 0,32, o C_f na Região Nordeste (P12), de acordo com a metodologia, poderia ser aumentado para 81,61%. Para as outras regiões, a escala (λ) que otimiza o Wave Dragon é similar, variando dentro do intervalo de λ entre 0,3 e 0,4.

Para o Aquabuoy e o Pelamis o aumento do fator de capacidade não foi tão significativo. O melhor resultado para o Pelamis foi obtido na Região Sul (P48) com C_f igual a 37,78% para uma escala de 0,52. Já o melhor resultado no Aquabuoy ocorreu na Região Nordeste (P12), com C_f igual a 63,39% para uma escala de 0,39.

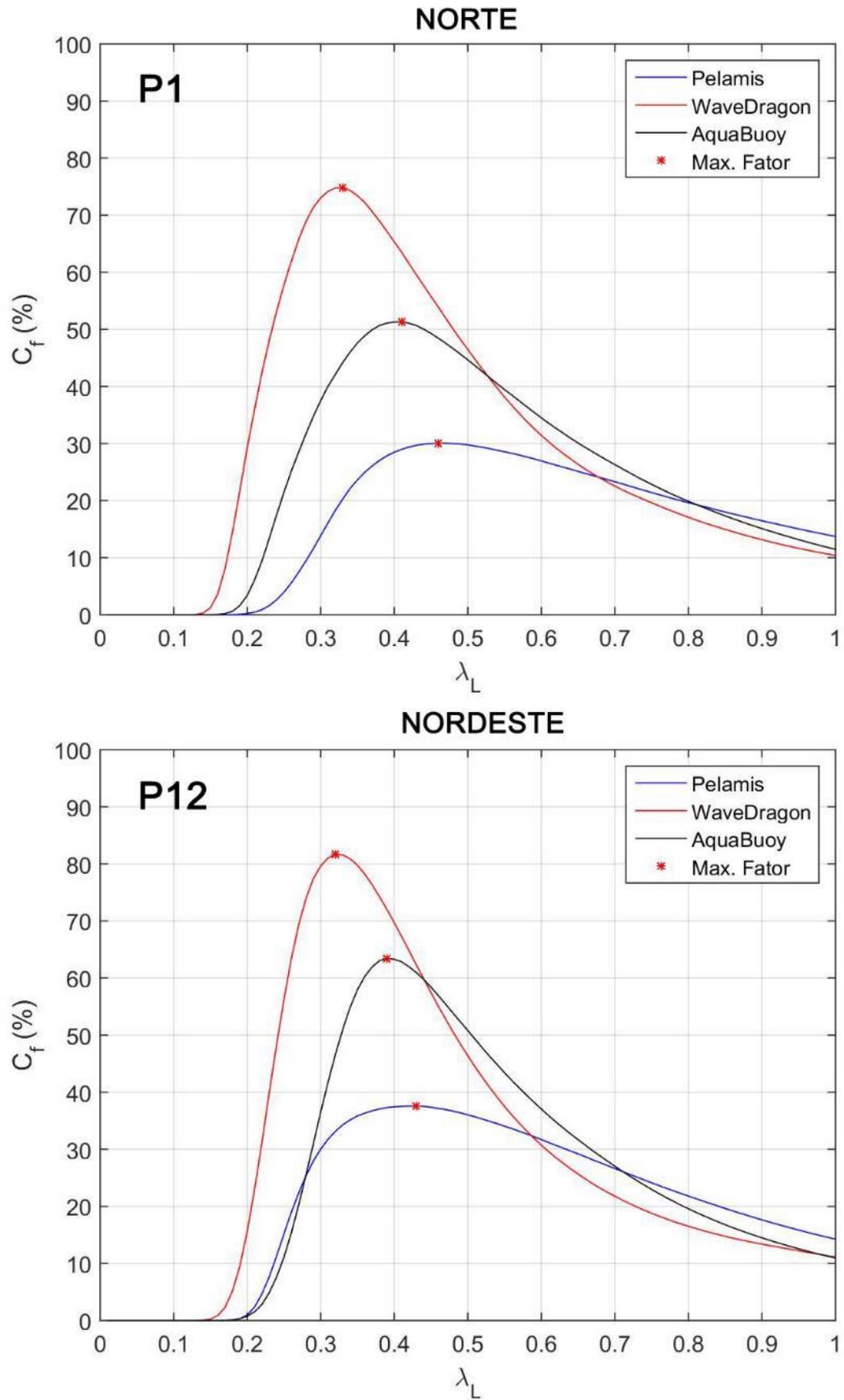
Gráfico 37 - C_f dos pontos selecionados para WEC com escalas reduzidas (continua)

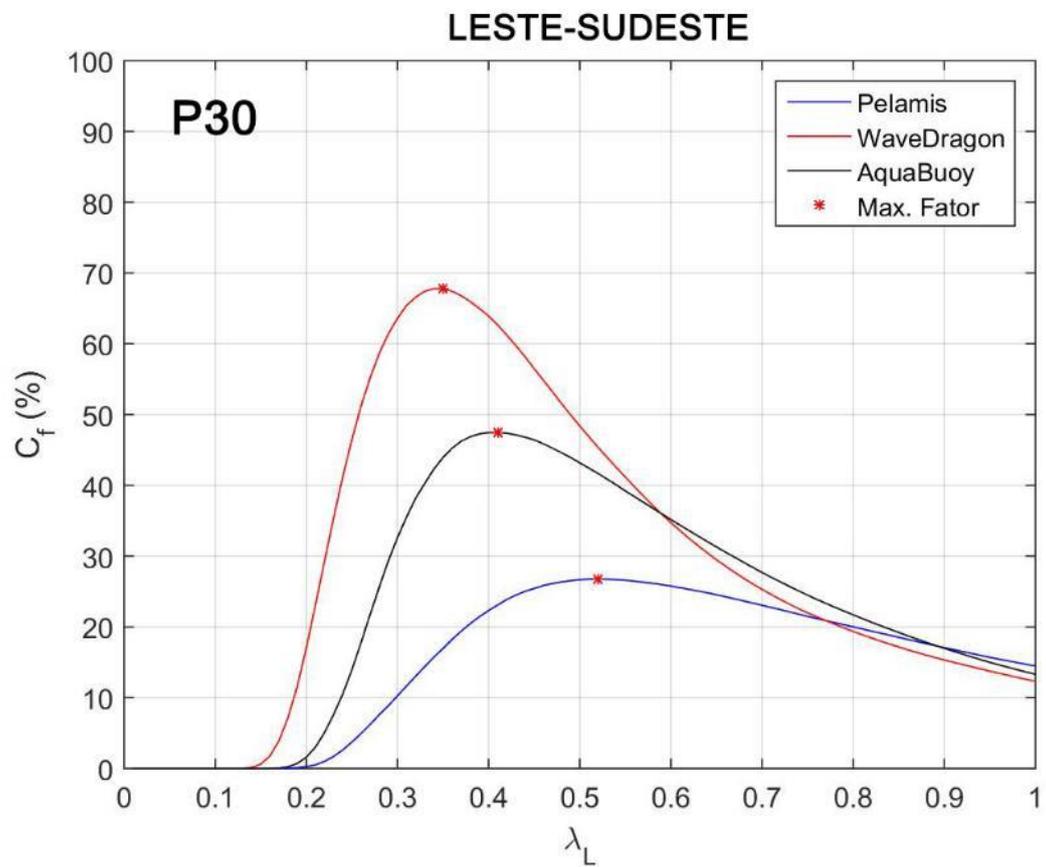
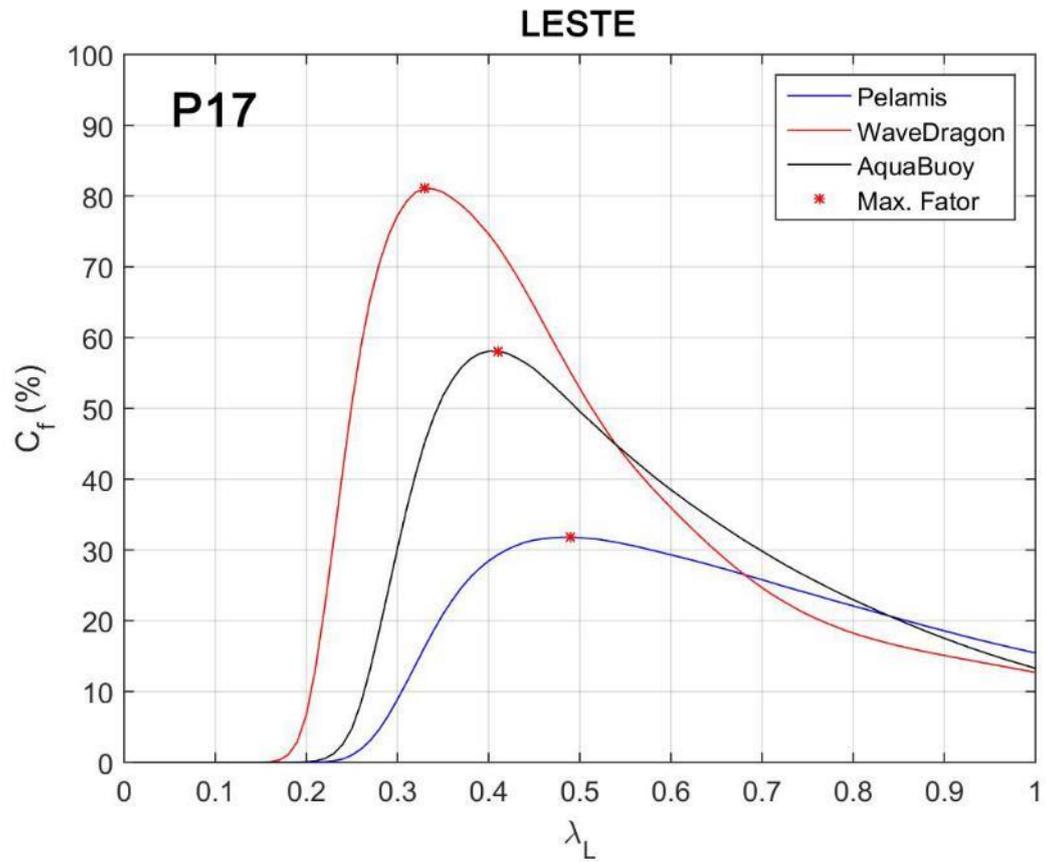
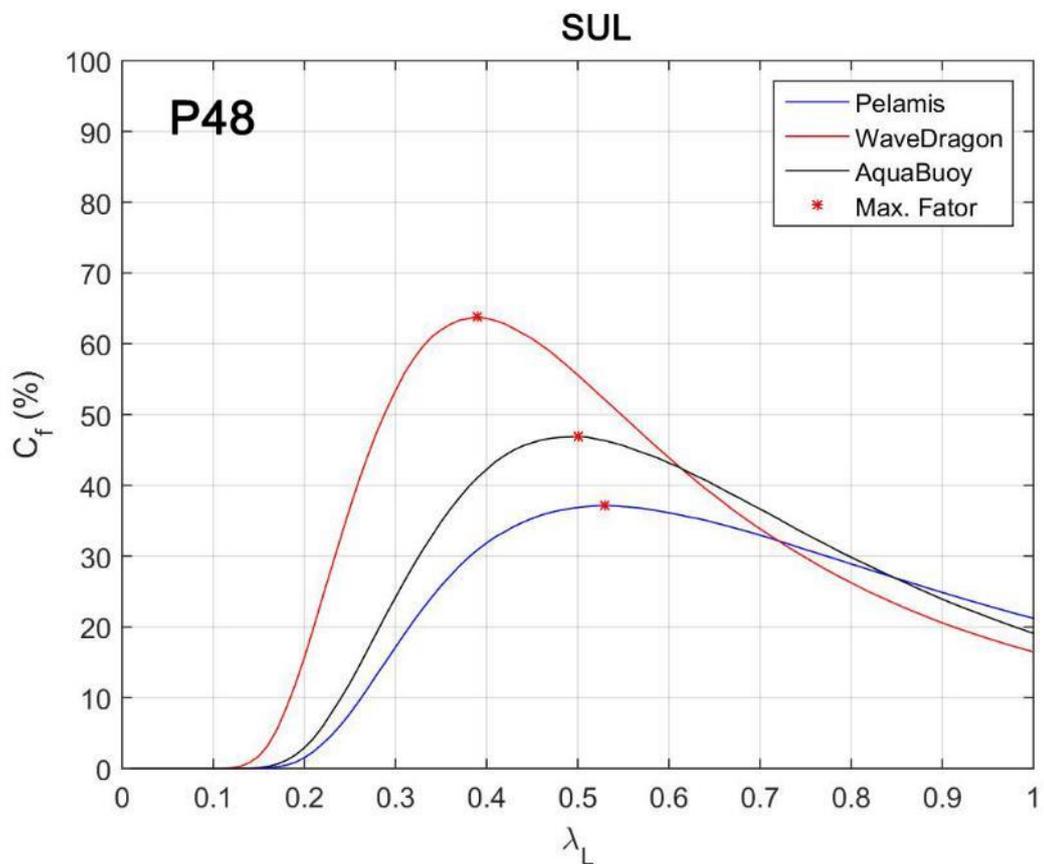
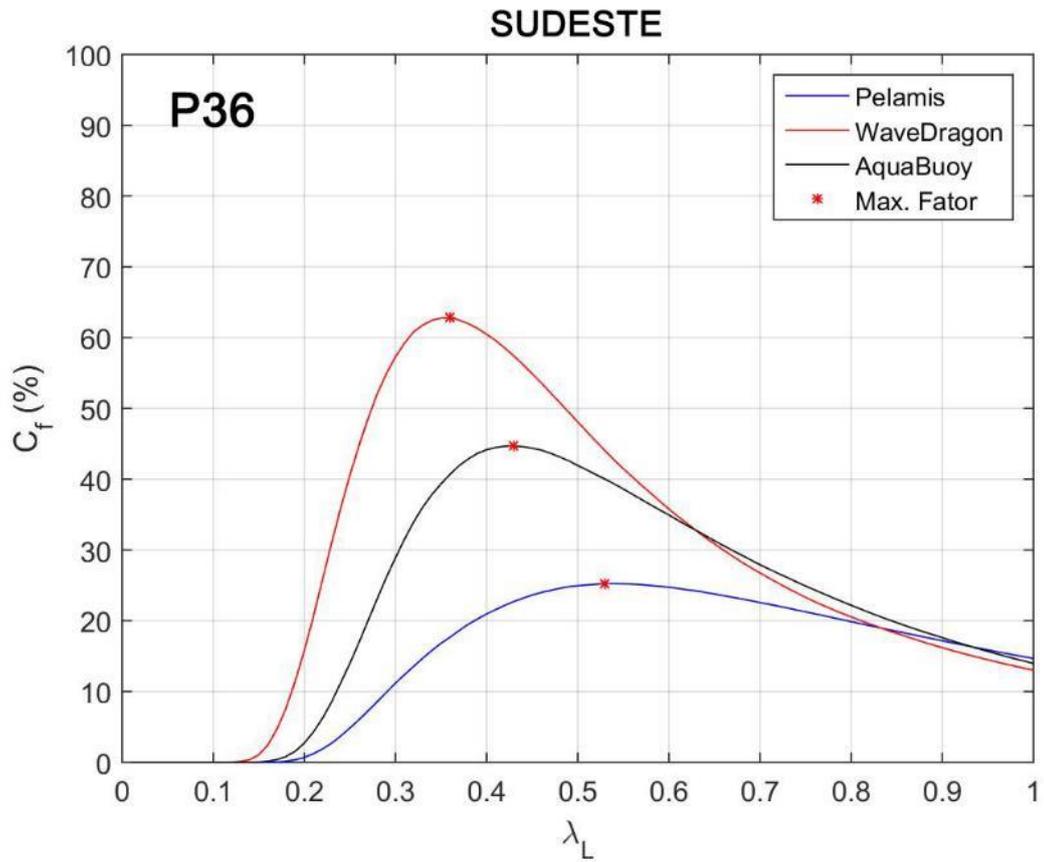
Gráfico 37 - C_f dos pontos selecionados para WEC com escalas reduzidas (continuação)

Gráfico 37 - C_f dos pontos selecionados para WEC com escalas reduzidas (conclusão)

O ponto destacado é a escala na qual o WEC apresenta o maior valor de C_f . Fonte: Autor.

A Tabela 20 sintetiza os resultados da redução de escala para os seis pontos. Nela são apresentados os resultados de potência nominal (P_n), potência elétrica média (P_e) e produção elétrica anual (PEA) para a escala em que C_f foi otimizado. Como a redução de escala buscou otimizar os dispositivos com relação ao fator de capacidade, houve sempre uma redução do P_n dos dispositivos, e conseqüentemente uma diminuição de P_e e PEA .

Tabela 20 - Análise de desempenho dos WEC após redução de escala

	P1					P12				
	Fator de escala	Potência nominal (kW)	Potência média (kW)	Produção média anual (MWh)	Fator de capacidade (%)	Fator de escala	Potência nominal (kW)	Potência média (kW)	Produção média anual (MWh)	Fator de capacidade (%)
Pelamis	0,46	49,51	14,88	130,35	30,05	0,43	39,10	14,69	128,71	37,58
WaveDragon	0,33	144,51	108,09	946,87	74,80	0,32	129,75	105,90	927,67	81,61
AquaBuoy	0,41	11,03	5,66	49,61	51,33	0,39	9,26	5,87	51,43	63,39
	P17					P30				
	Fator de escala	Potência nominal (kW)	Potência média (kW)	Produção média anual (MWh)	Fator de capacidade (%)	Fator de escala	Potência nominal (kW)	Potência média (kW)	Produção média anual (MWh)	Fator de capacidade (%)
Pelamis	0,49	61,77	19,64	172,04	31,80	0,52	76,05	20,34	178,20	26,75
WaveDragon	0,33	144,51	117,15	1026,22	81,07	0,35	177,56	120,38	1054,55	67,80
AquaBuoy	0,41	11,03	6,41	56,12	58,07	0,41	11,03	5,24	45,88	47,48
	P36					P48				
	Fator de escala	Potência nominal (kW)	Potência média (kW)	Produção média anual (MWh)	Fator de capacidade (%)	Fator de escala	Potência nominal (kW)	Potência média (kW)	Produção média anual (MWh)	Fator de capacidade (%)
Pelamis	0,53	81,29	20,51	179,68	25,23	0,52	76,05	28,73	251,65	37,78
WaveDragon	0,36	195,96	123,11	1078,43	62,82	0,40	283,34	183,34	1606,07	64,71
AquaBuoy	0,43	13,03	5,82	51,00	44,66	0,49	20,59	9,85	86,28	47,84

Fonte: Autor.

Apesar da redução da potência média convertida resultante da redução de escala, os valores de potência média e potência média anual obtidos pelo Wave Dragon quando otimizado são da mesma ordem que os obtidos pelos outros dispositivos analisados, sem a redução. A Tabela 21 apresenta a comparação em relação ao ponto P12, onde o Wave Dragon apresentou melhor fator de capacidade após a redução, com resultado de 81,61%.

Tabela 21 - Wave Dragon com escala reduzida e os outros WEC sem redução

Dispositivo	Potência nominal (kW)	Potência média (kW)	Produção média anual (MWh)	Fator de capacidade (%)
Wave Dragon	129,75	105,90	927,67	81,61
Pelamis	750,00	98,15	859,84	13,09
AquaBuoy	250,00	23,90	288,22	13,16

Fonte: Autor.

Portanto, os resultados apresentados levam a crer que apesar da baixa produção de energia obtida na costa brasileira utilizando os dispositivos analisados, esse valor pode ser incrementado se houver um redimensionamento dos dispositivos de forma a se adequar às condições de mar presentes no litoral Brasileiro. Além disso, o dispositivo que parece mais promissor após a redução de escala é o Wave Dragon.

A análise de escala apresentada é bastante simplificada, não levando em considerações diversos fatores que influenciam a produção de um WEC. Dessa forma, ela é apenas um indicativo do potência de otimização dos equipamentos para as condições de mar da região.

6.5 ANÁLISE MULTICRITÉRIO

Para a realização da análise multi-critério, os métodos AHP e TOPSIS foram usados, sendo que o AHP foi utilizado para definir o peso de cada um dos critérios escolhidos e o TOPSIS foi utilizado para promover a classificação.

6.5.1 Aplicação do Método AHP

A escolha dos critérios a serem utilizados e a relação de importância entre eles é um processo qualitativo que depende da experiência dos envolvidos na escolha. Dessa forma, buscou-se na literatura quais os critérios mais utilizados. Os critérios adotados nessa análise foram baseados nos trabalhos de Nobre *et al.* (2009), Souza (2011) e Le *et al.* (2015). Esses trabalhos utilizam diversos critérios para fazer a análise de decisão multi-critério. Entretanto, referente às ondas, apenas o potencial ondomotriz é utilizado como critério. Assim como diferencial, além do potencial ondomotriz, foram utilizados outros dois critérios relacionados com o clima de ondas: a variabilidade temporal em termos de *COV*, *MV* e *SV*; e a energia elétrica convertida pelo WEC através da produção elétrica anual (PEA) dos dispositivos Aquabuoy, Wave Dragon e Pelamis.

Além dos três critérios mencionados, foram analisados outros quatro: a distância do local em relação à costa; a distância do local em relação ao porto mais próximo; a batimetria; e se o local é área de proteção ambiental ou não. Esses critérios tem um viés mais logístico, enquanto que os três anteriores têm um viés mais da disponibilidade de energia.

A primeira etapa do método AHP foi a construção da matriz de prioridade entre os sete critérios adotados. Neste trabalho optou-se por trabalhar com duas situações diferentes. Na primeira adotou-se critérios com importância diferente entre si. Na segunda adotou-se dois grupos de critérios com importância diferente entre si, mas igual para os critérios dentro do mesmo grupo.

Assim, a matriz de prioridades com pesos diferentes, foi construída através da comparação par a par, utilizando o método do autovalor, conforme mostra a Tabela 22.

Tabela 22 - Matriz de prioridades com pesos diferentes

	Potência ondomotriz	Distância à costa	Distância de porto	Coefficiente temporal	Fator de capacidade	Batimetria	Proteção ambiental	Prioridade	Ranking
Potência ondomotriz	1	6	5	2	1/2	3	4	0,2443	2
Distância à costa	1/6	1	1/2	1/5	1/7	1/4	1/3	0,0304	7
Distância de porto	1/5	2	1	1/4	1/6	1/3	1/2	0,0437	6
Coefficiente temporal	1/2	5	4	1	1/3	2	3	0,1615	3
Fator de capacidade	2	7	6	3	1	4	5	0,3565	1
Batimetria	1/3	4	3	1/2	1/4	1	2	0,1042	4
Proteção ambiental	1/4	3	2	1/3	1/5	1/2	1	0,0594	5

Fonte: Autor.

Com relação à segunda situação, a matriz de comparação par a par foi construída utilizando os valores mostrados na Tabela 23.

Tabela 23 - Matriz de prioridades com pesos iguais

	Potência ondomotriz	Distância à costa	Distância de porto	Coefficiente temporal	Fator de capacidade	Batimetria	Proteção ambiental	Prioridade	Ranking
Potência ondomotriz	1	6	6	1	1	6	6	0,2727	1
Distância à costa	1/6	1	1	1/6	1/6	1	1	0,0455	4
Distância de porto	1/6	1	1	1/6	1/6	1	1	0,0455	4
Coefficiente temporal	1	6	6	1	1	6	6	0,2727	1
Fator de capacidade	1	6	6	1	1	6	6	0,2727	1
Batimetria	1/6	1	1	1/6	1/6	1	1	0,0455	4
Proteção ambiental	1/6	1	1	1/6	1/6	1	1	0,0455	4

Fonte: Autor.

Observa-se que, uma vez que a ordem dos critérios foi previamente estabelecida, após o cálculo da matriz de peso a ordem foi mantida. Na primeira situação o critério de maior peso foi o fator de capacidade com 35,65%, enquanto que o de menor peso foi a distância em relação à costa com 3%. Na segunda situação, o grupo relacionado com a disponibilidade de energia teve peso igual entre si e equivalente a 27,27%. Já o outro grupo relacionado à logística do local tem peso de 4,55% para cada um dos quatro critérios.

Ao se utilizar o método do autovalor é necessário calcular a inconsistência da matriz de prioridades. A matriz da Tabela 22 apresentou autovalor $\lambda_{MAX} = 7,0585$. Assim, utilizando a Equação 42 obteve-se $IC = 0,00975$, e usando o valor de $IR = 1,32$ obtido na Tabela 8 para $n = 7$, determinou-se o valor de $RC = 0,0074 = 0,7\%$. Dessa forma, a inconsistência da matriz praticamente inexistente. Já para a matriz da Tabela 23 o autovalor foi $\lambda_{MAX} = 7 = n$. Dessa forma, a matriz é consistente.

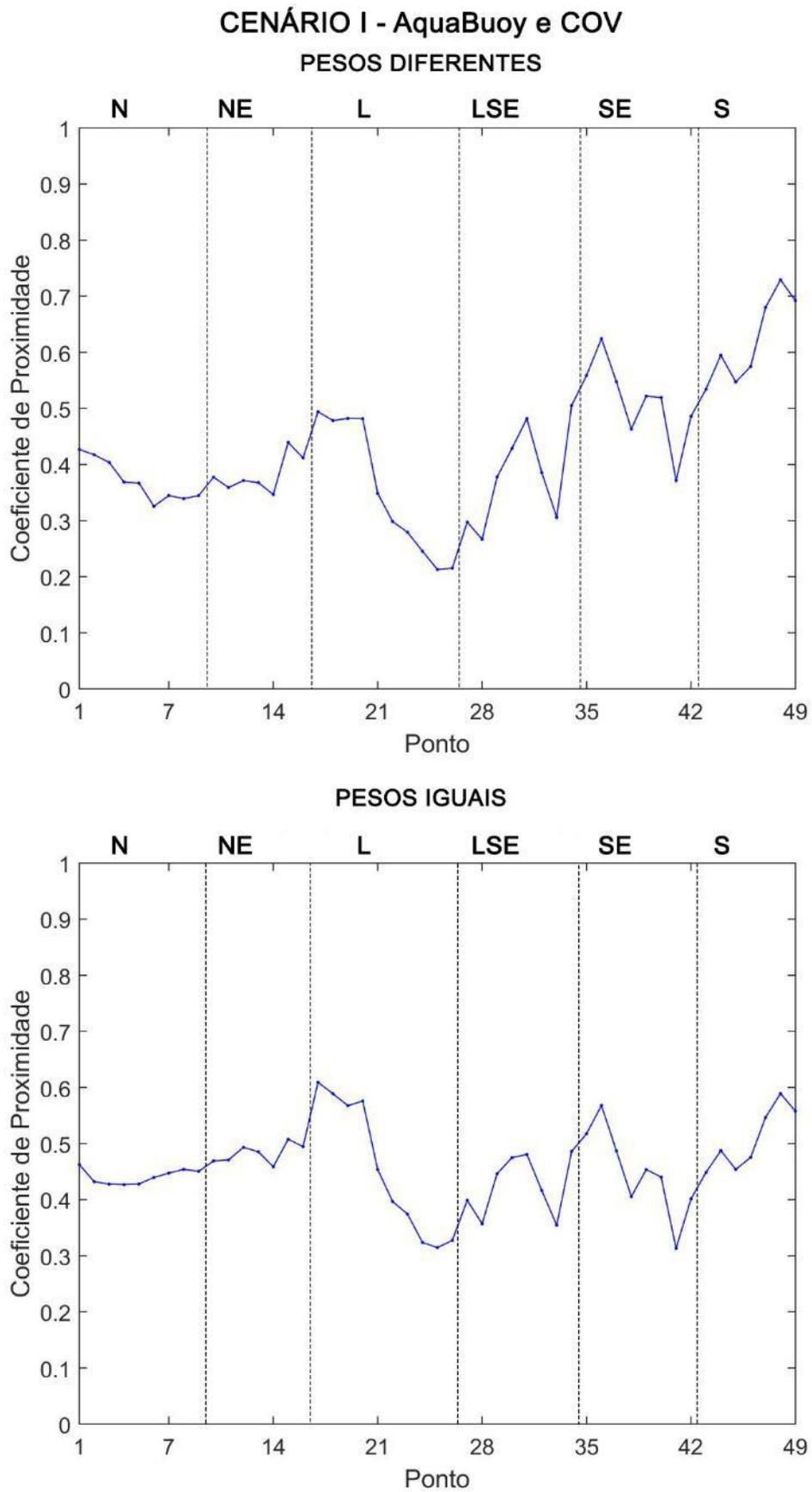
6.5.2 Aplicação do Método TOPSIS

Com os pesos de cada critério definidos, passou-se a utilizar o método TOPSIS. Foram analisados nove cenários como descrito na Tabela 14. Para cada um dos nove cenários foi construída a matriz de decisão normalizada.

Para a construção da matriz de decisão normalizada, os valores da potência ondomotriz, do fator de capacidade e do coeficiente temporal foram determinados baseados nos resultados das sessões anteriores. Os dados de batimetria foram obtidos da base de dados GEBCO. A distância em relação à costa foi obtida utilizando informações das fronteiras do Brasil obtidas da base de dados do *Global Administrative Areas* (HIJMANS, 2009). A distância do porto mais próximo foi calculada utilizando dados da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS, 2013). Já o critério “área de proteção ambiental” indica se o ponto analisado se encontra dentro (valor = 0) ou se está fora (valor = 1) de uma área de preservação. As informações desse critério foram obtidas junto ao Ministério do Meio Ambiente (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2016).

A partir da matriz de decisão normalizada e seguindo a metodologia foram encontrados os coeficientes de proximidade relativa da solução ideal para cada um dos 49 pontos divididos entre as seis regiões analisadas. Esses resultados são mostrados no Gráfico 38.

Gráfico 38 - Coeficiente de proximidade para os cenários analisado (continua)



Fonte: Autor.

Gráfico 38 - Coeficiente de proximidade para os cenários analisado (continuação)

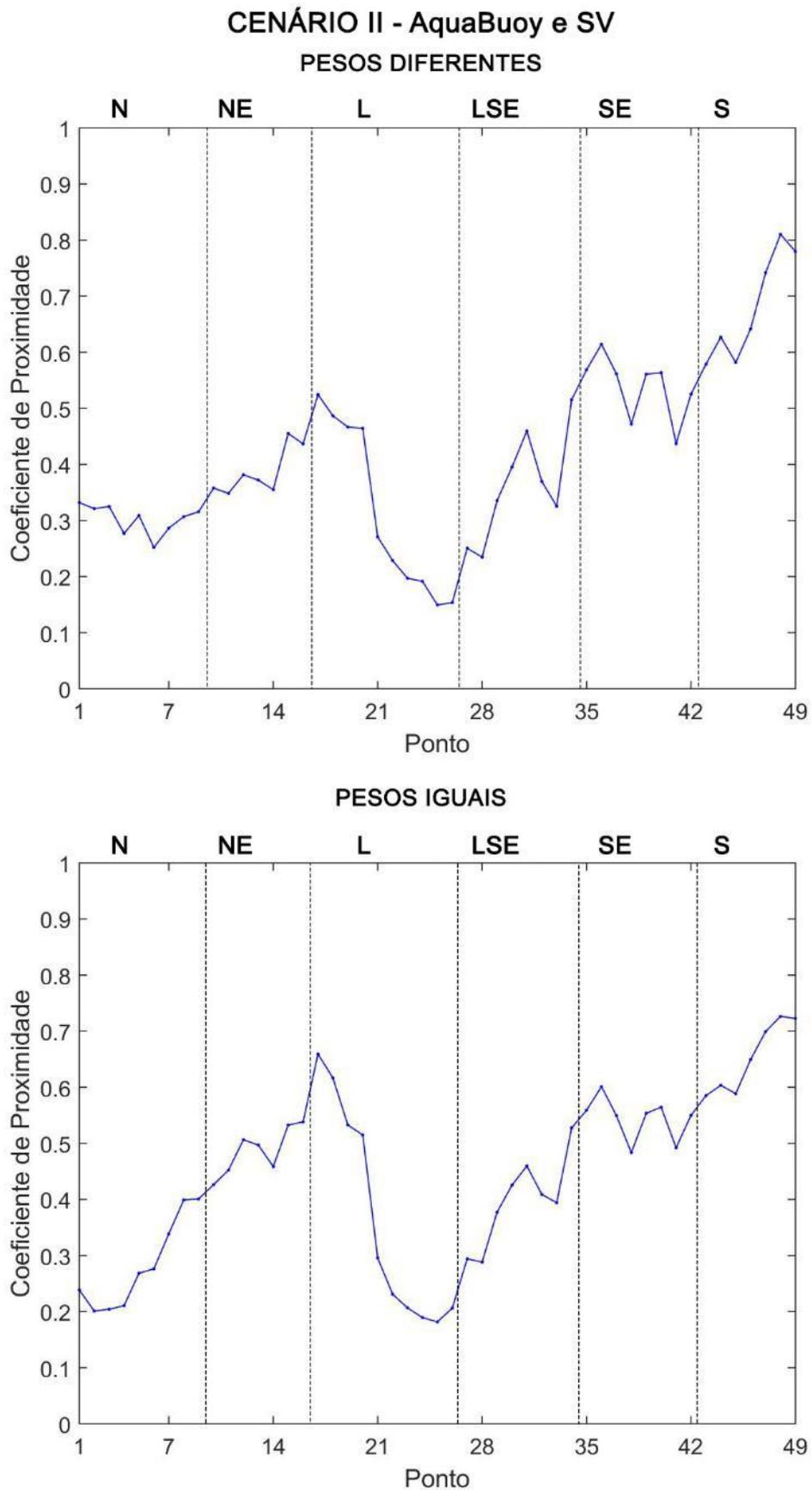


Gráfico 38 - Coeficiente de proximidade para os cenários analisado (continuação)

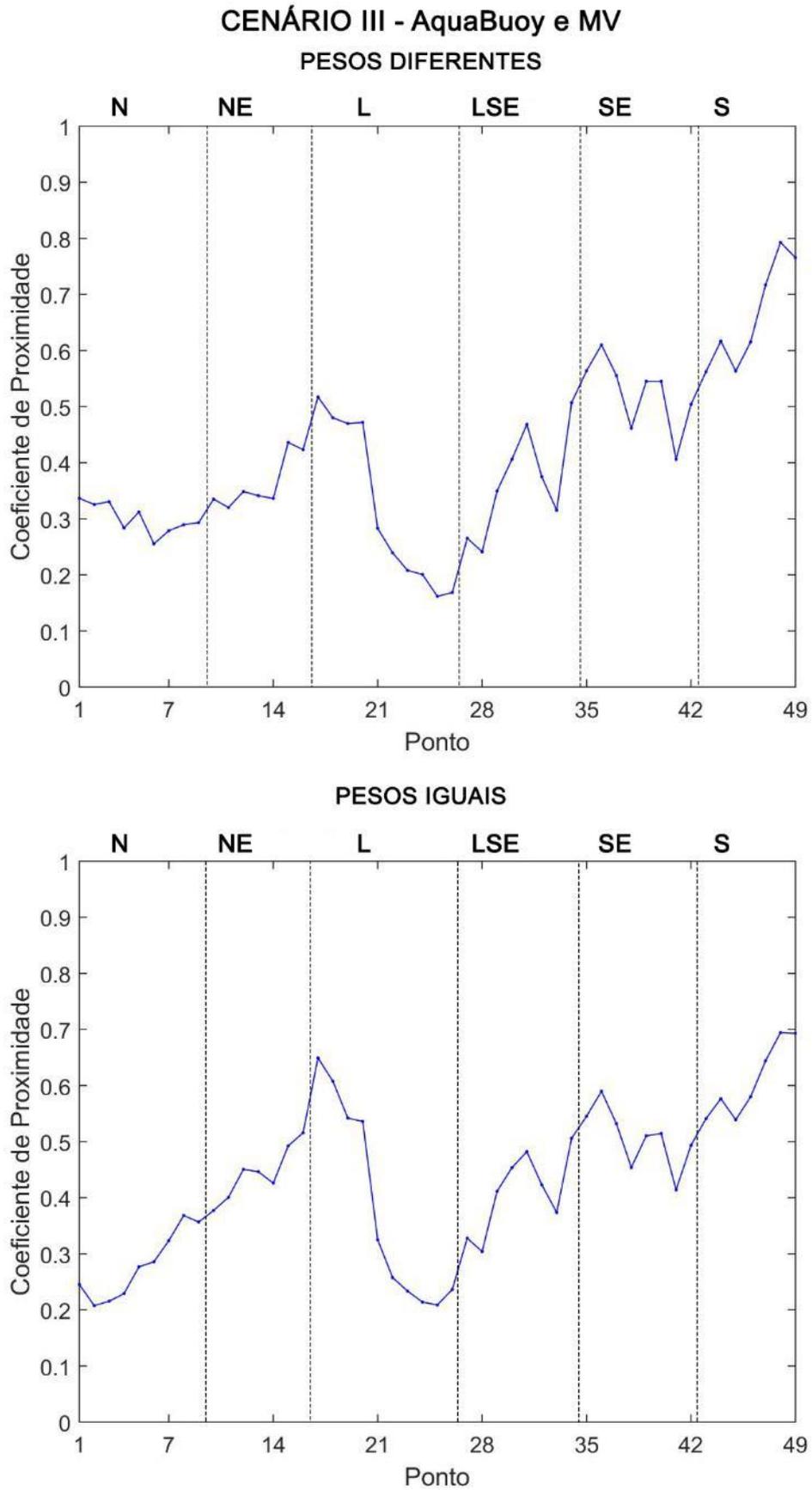


Gráfico 38 - Coeficiente de proximidade para os cenários analisado (continuação)

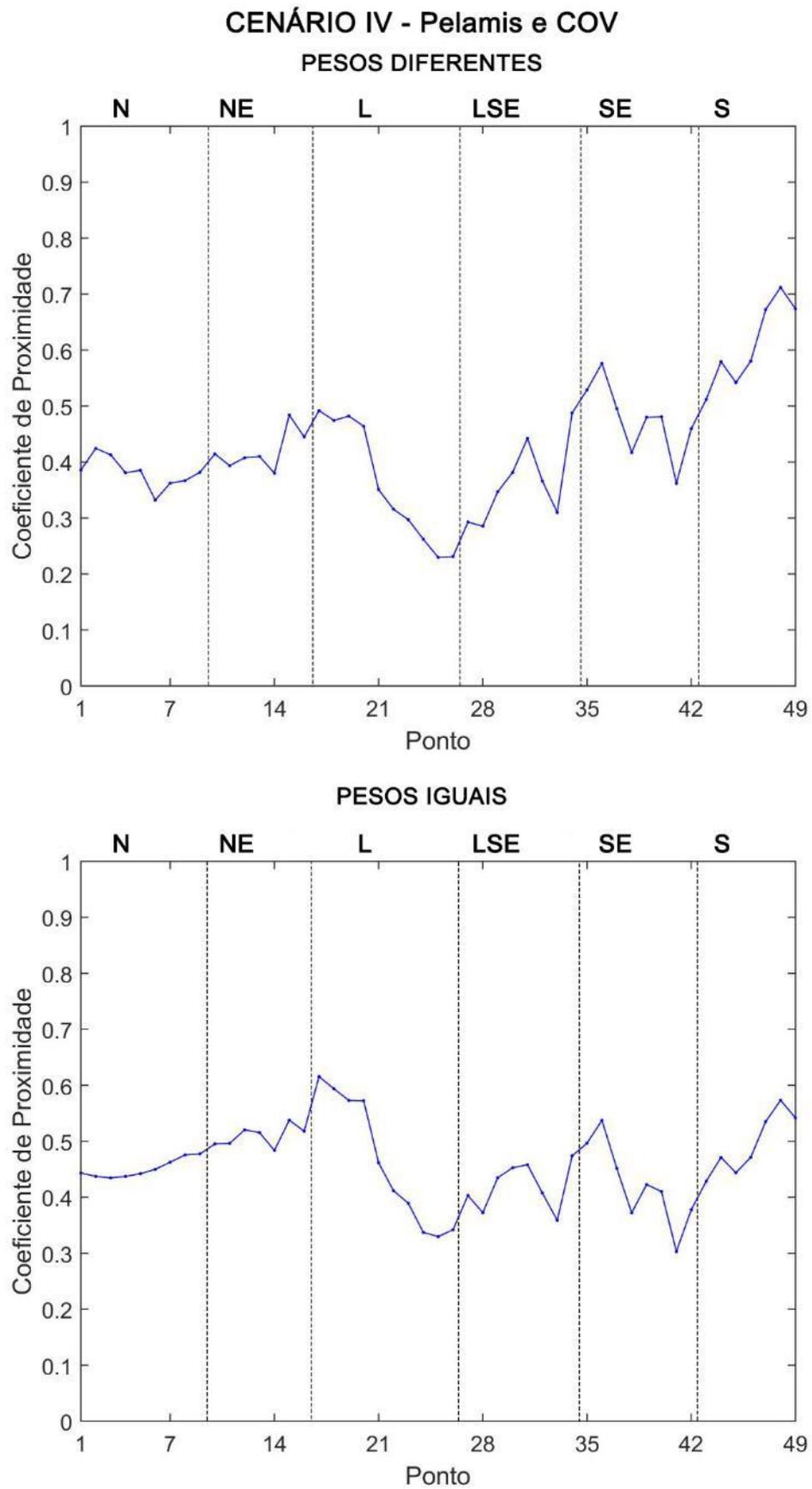


Gráfico 38 - Coeficiente de proximidade para os cenários analisado (continuação)

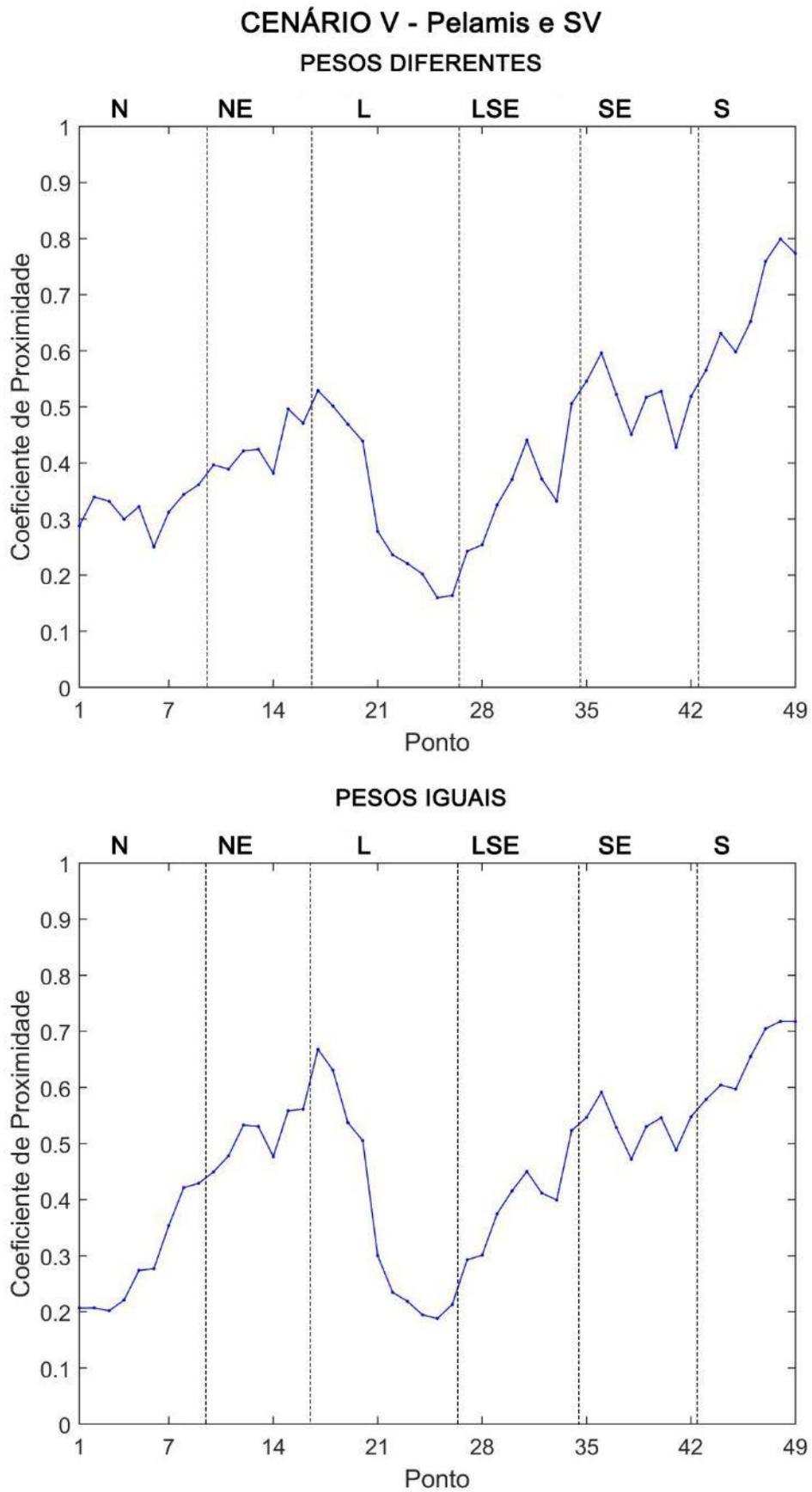


Gráfico 38 - Coeficiente de proximidade para os cenários analisado (continuação)

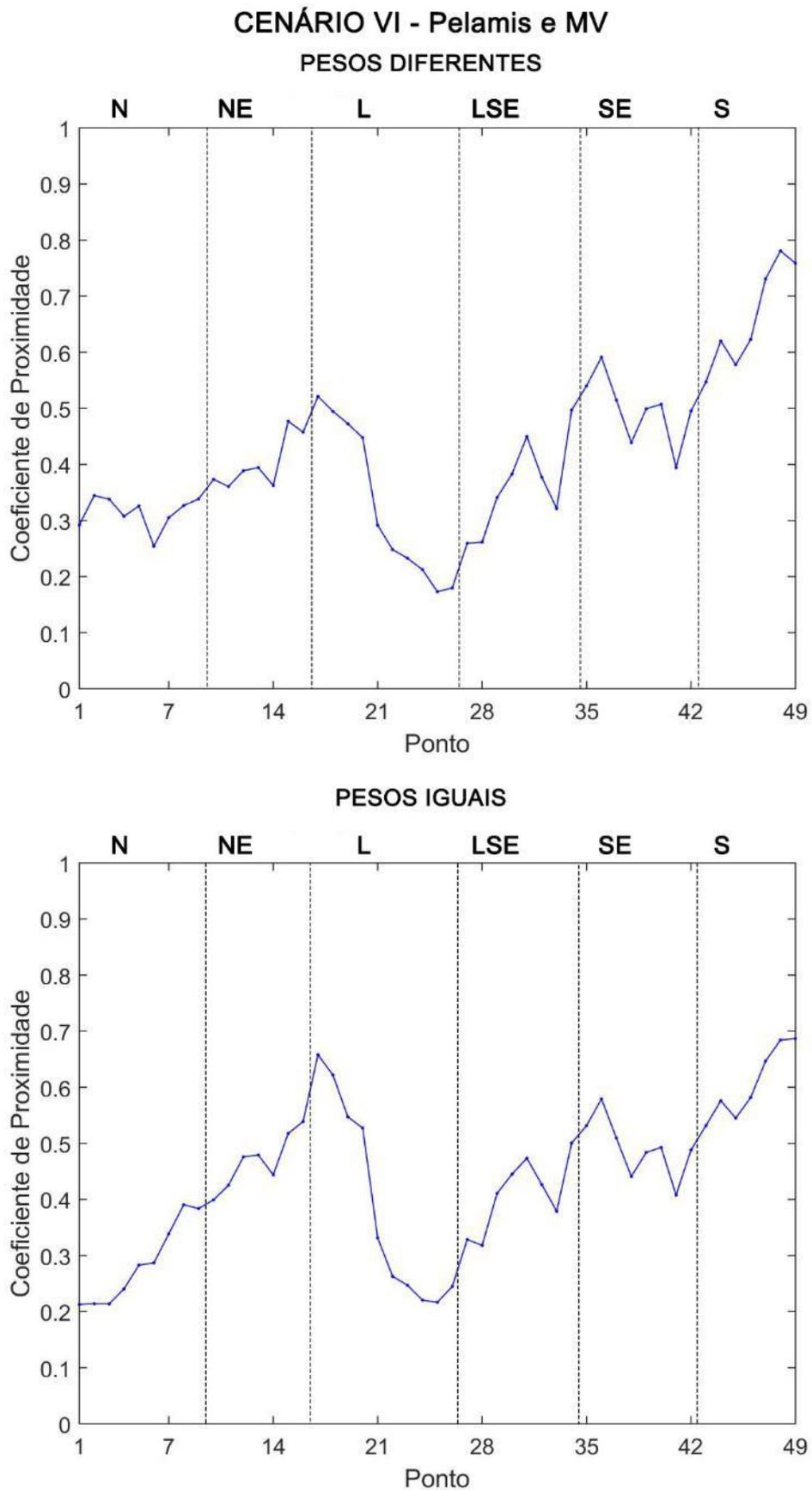


Gráfico 38 - Coeficiente de proximidade para os cenários analisado (continuação)

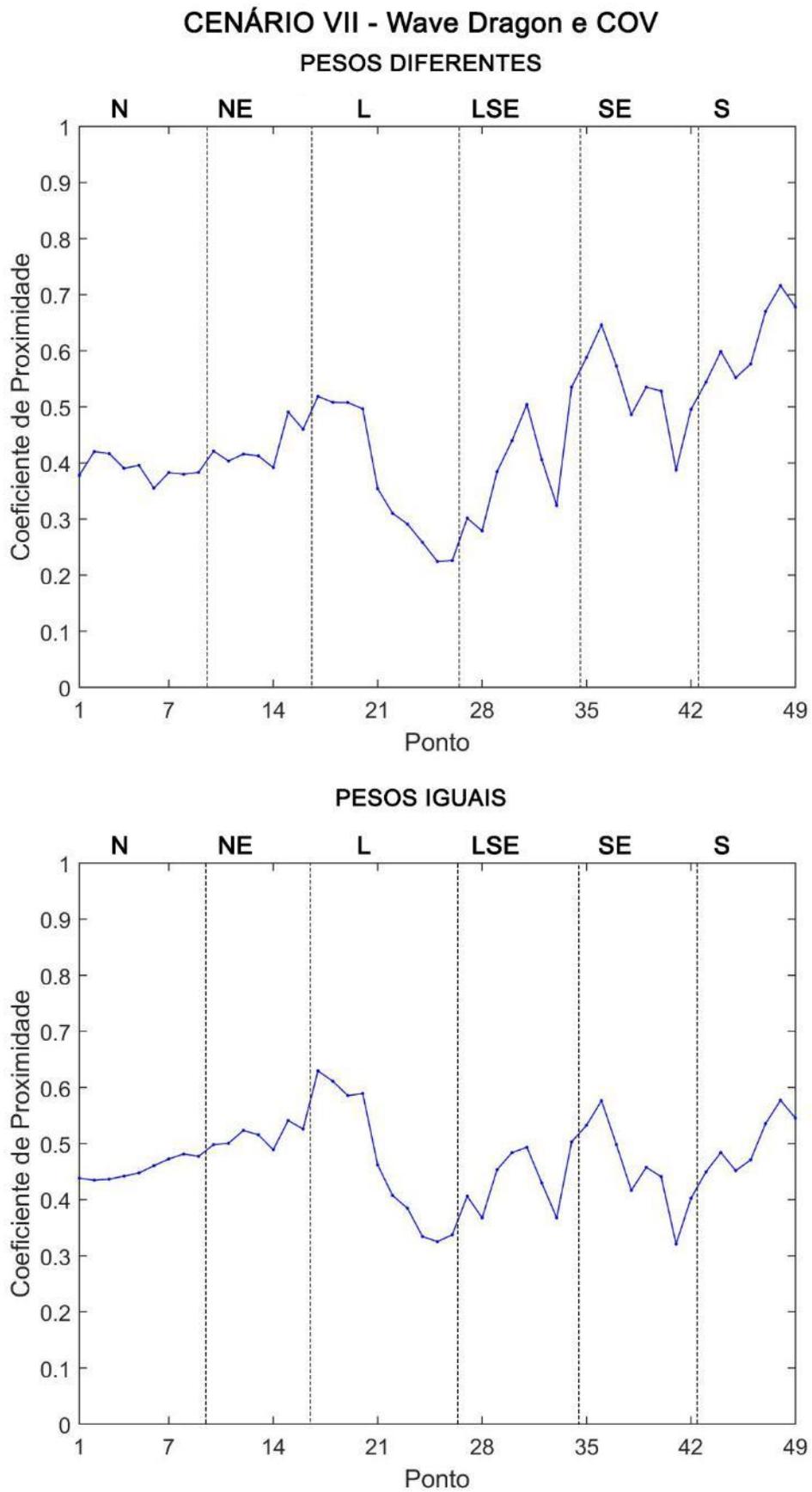


Gráfico 38 - Coeficiente de proximidade para os cenários analisado (continuação)

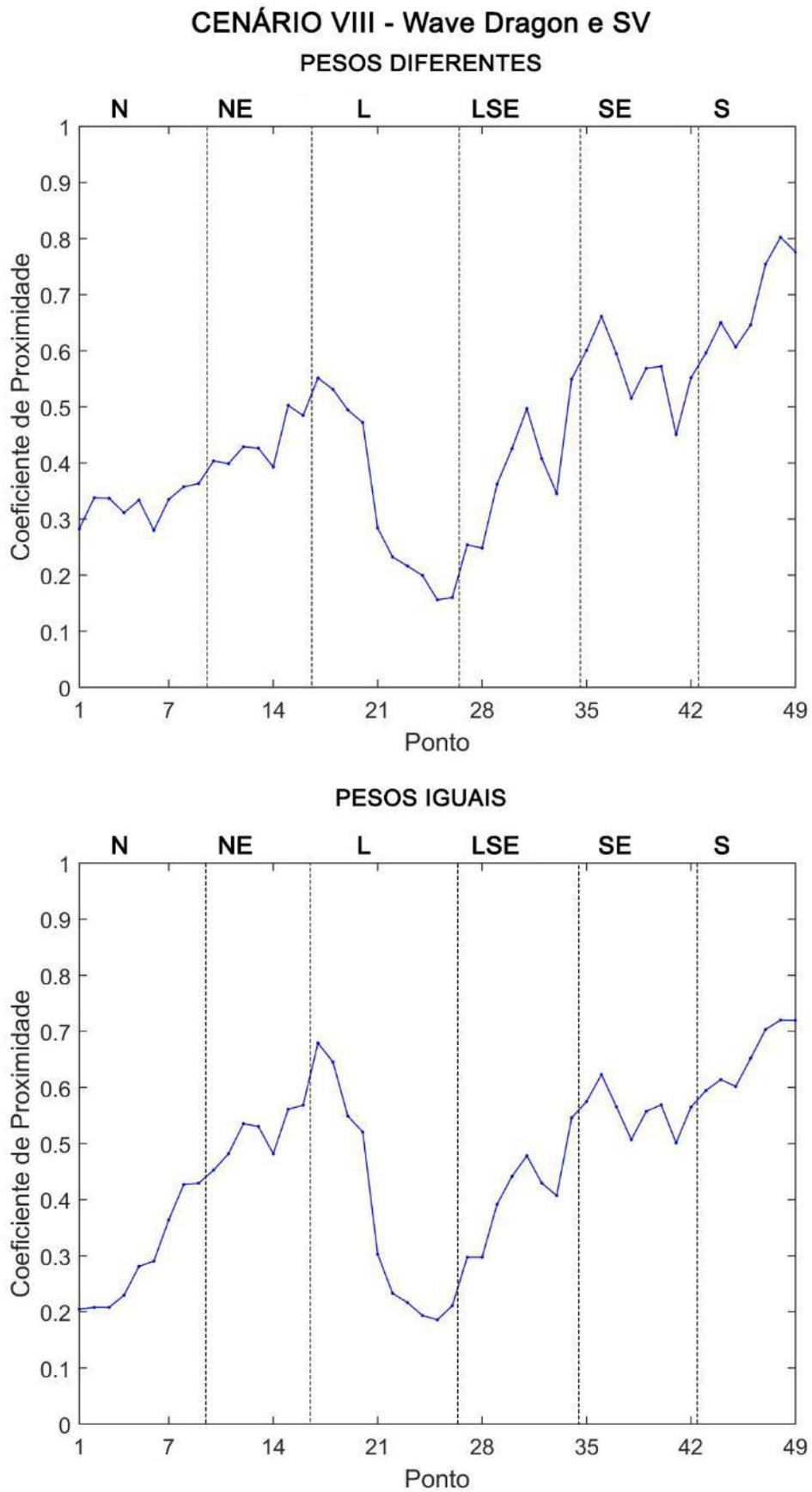
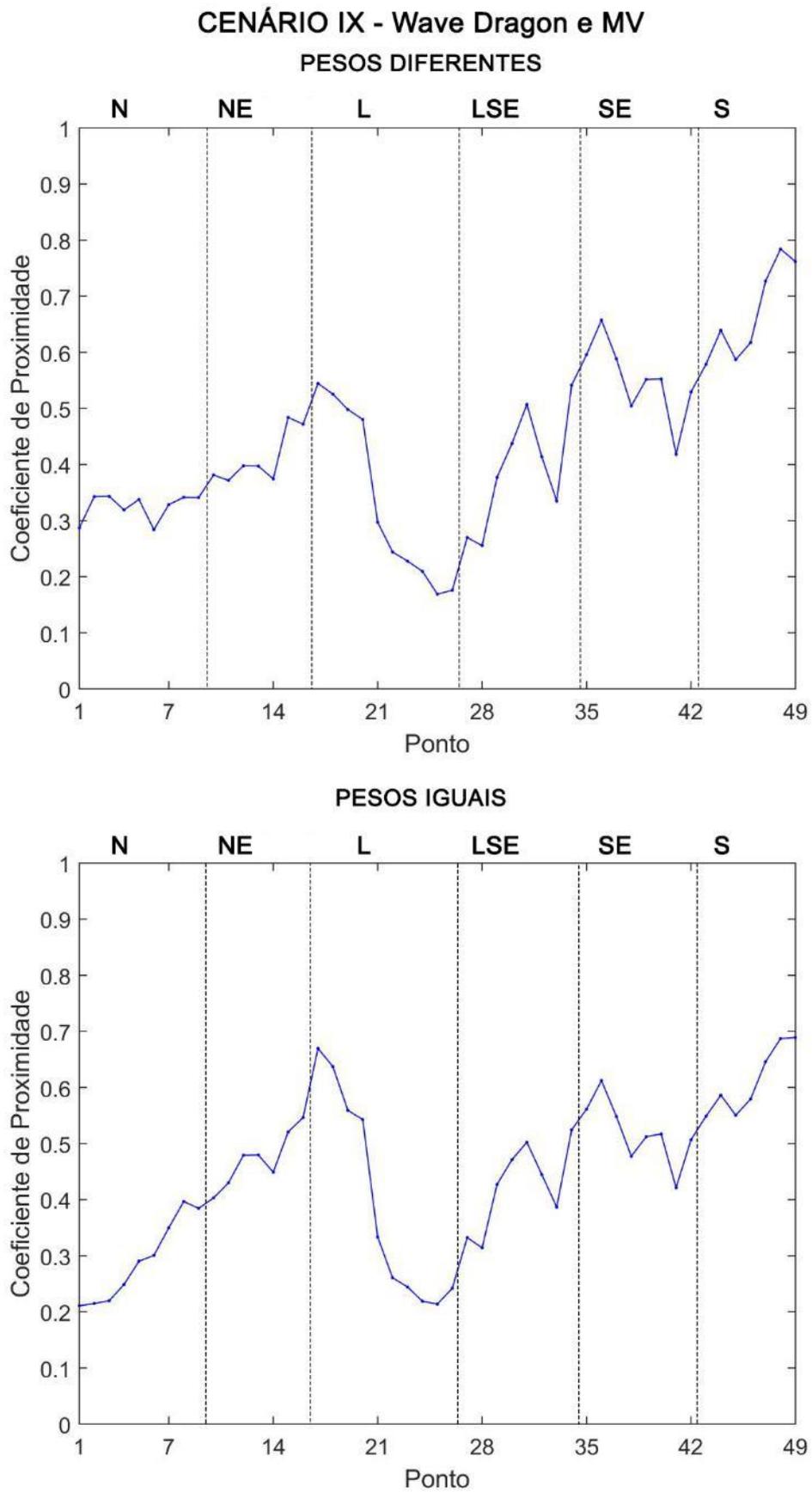


Gráfico 38 - Coeficiente de proximidade para os cenários analisado (conclusão)



A partir do Gráfico 38 percebe-se que, independentemente das situações e dos cenários, três regiões apresentam áreas que se destacam: a Região Sul, a Região Sudeste e a Região Leste. A área que apresenta os melhores resultados está localizada na Região Sul, principalmente entre os pontos P45 e P49, com o ponto P48 apresentando o maior coeficiente de proximidade relativa à solução ideal em praticamente todos os cenários. As únicas exceções são os cenários I, IV e VII quando os pesos são iguais. Nessas situações o ponto P17 na Região Leste apresenta os maiores valores do coeficiente de proximidade relativa.

A segunda área com os maiores valores está na Região Sudeste, entre os pontos P35 e P37, com o destaque sendo o ponto P36. Já a terceira área está na Região Leste, entre os pontos P17 e P20, com destaque para o ponto P17.

Já as áreas de menor potencial seriam a área entre os pontos P21 e P25 na Região Leste e a Região Norte. As Regiões Nordeste e Leste-Sudeste apresentam potencial intermediário, com destaque para os pontos P15 e P16 na Região Nordeste, e os pontos P30 e P31 na Região Leste-Sudeste.

Quando se analisa os resultados para pesos diferentes, em todos os cenários, independentemente do WEC ou do coeficiente temporal utilizado, as melhores áreas estão na ordem já mencionada: primeiro na Região Sul entre os pontos P45 e P49, segundo na Região Sudeste entre os pontos P34 e P38, e terceiro na Região Leste entre os pontos (P17 e P20). O maior coeficiente é encontrado no ponto P48 no Cenário II com valor de 0,81. A região que apresenta os piores resultados é a Região Leste, na área entre os pontos P21 e P26, com o ponto P25 obtendo os piores resultados em todos os nove cenários para pesos dos critérios diferentes.

Por sua vez, quando se analisa os resultados para pesos iguais, verifica-se que a mesma sequência da análise anterior foi obtida nesta para os cenários II, III, V, VI, VIII e IX, com a Região Sul se destacando. Já para os cenários I, IV e VII, a Região Leste entre os pontos P17 e P20 apresenta os melhores resultados. Entretanto, nesses três cenários os resultados das três áreas de destaque são muito próximos.

Essa diferença nos resultados deve-se ao uso do *COV* como um dos critérios. Como pode ser observado no Gráfico 33, o *COV* tem valor mínimo na Região Leste entre P17 e P20, e máximo na Região Sul entre P45 e P49. Uma vez que se deseja que esse coeficiente seja minimizado, ele tem um impacto direto nos resultados dos cenários que o utilizam como critério (I, IV e VII).

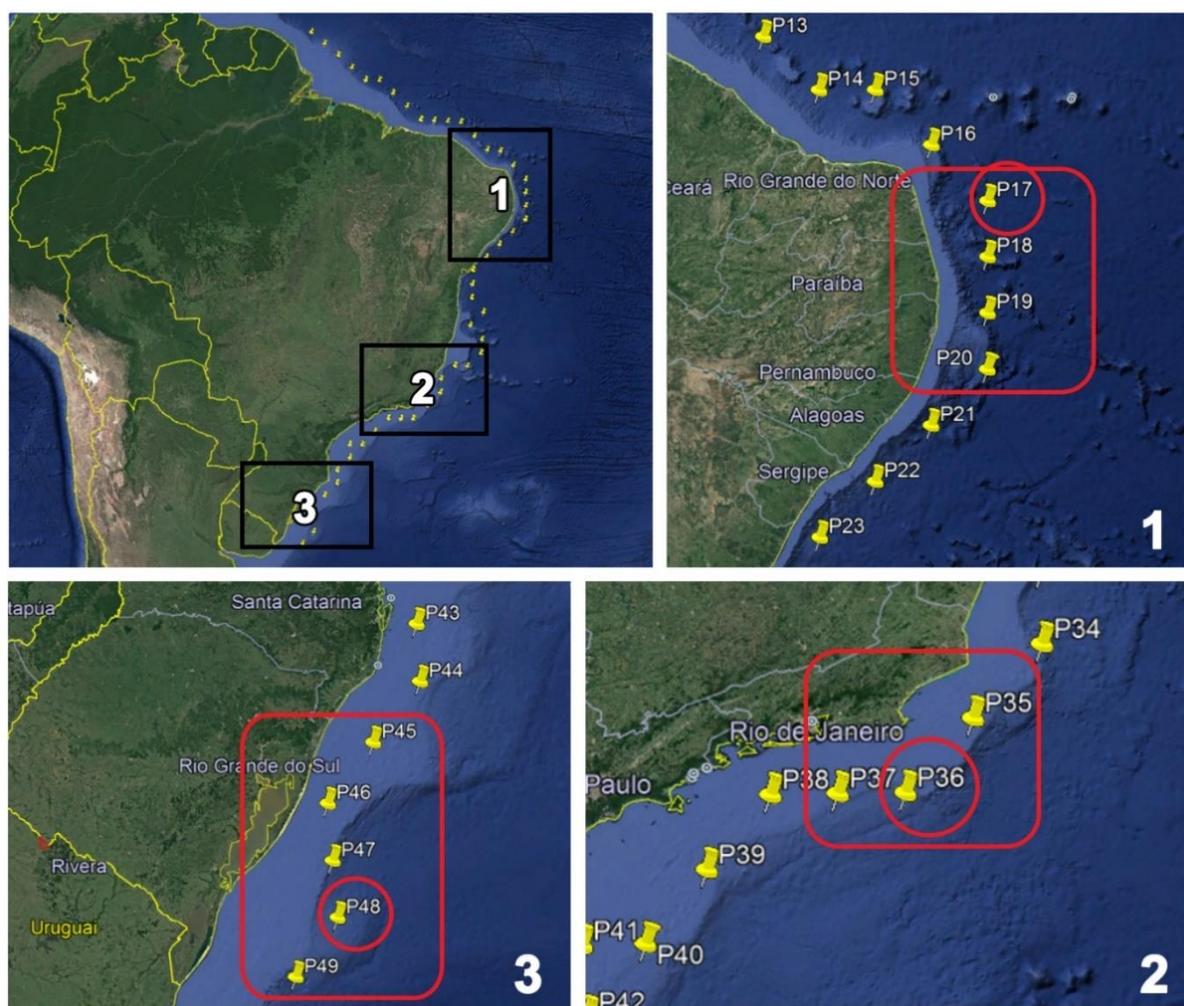
Os resultados encontrados são condizentes com os outros resultados apresentados ao longo deste trabalho. A Região Sul e Sudeste, apesar de uma maior variabilidade temporal, são as que apresentam maior potencial ondomotriz e também os maiores fatores de capacidade.

Assim, nas análises em que esses dois critérios têm maior peso (situação onde os pesos dos critérios são diferentes) eles se destacam. Quando a variabilidade tem maior peso (situação onde os pesos são iguais dentro do mesmo grupo de critérios) há uma diminuição no valor dos coeficientes encontrados.

Para a Região Leste a explicação é semelhante, com ela apresentando os menores valores de variabilidade temporal, o que acaba compensando os valores de potencial e fator de capacidade levemente menores na região. As Regiões Norte e Leste-Sudeste, por sua vez, apresentam os piores resultados tanto em termos de variabilidade temporal, quanto de potência ondomotriz e fator de capacidade, o que se reflete na análise de multi-critérios.

Assim, diante dos resultados, independente dos cenários ou dos pesos, os resultados indicam que as três áreas apresentadas na Figura 31 são as de maior potencial para aproveitamento do recurso ondomotriz na costa do Brasil.

Figura 31 - Regiões com maiores coeficientes de proximidade relativa à solução ideal



Fonte: Autor.

A análise multi-critério do jeito que foi aplicada não permite a comparação para identificação de qual o WEC é mais indicado em determinado ponto, uma vez que o objetivo era analisar os locais com maior potencial para geração de energia ondomotriz. Entretanto, baseado nos resultados encontrados e sintetizados no Gráfico 35, podemos afirmar que o WEC Pelamis, dentre os três analisados, é o que melhor responde às condições de mar de toda a costa brasileira.

7 CONCLUSÕES

Apesar das limitações decorrentes do número reduzido de dados para a validação, os resultados encontrados mostram sinais de uma correlação aceitável entre os dados de reanálise e os do satélite de altimetria na área estudada. No entanto, uma análise mais robusta ainda é necessária para confirmar esses indícios e validar a base de dados na região.

A partir da caracterização da onda, verificou-se que a altura significativa das ondas e a potência das ondas aumentam de norte a sul, atingindo valores máximos na Região Sul do Brasil. No entanto, na Região Leste, os valores são ligeiramente superiores às áreas adjacentes. Para o período de onda, não foi observado padrão significativo.

As ondas, em termos de direção, apresentam uma clara distinção entre as localizadas nas Regiões Norte, Nordeste e Leste e as localizadas nas Regiões Leste-Sudeste, Sudeste e Sul. Em baixas latitudes, as ondas incidentes em um determinado local apresentam baixa variação de direção, concentrando-se em um bin direcional estreito. Em altas latitudes, o bin direcional é mais largo atingindo até valores maiores que 180° .

A região offshore brasileira apresenta um recurso ondomotriz médio anual entre 7,97 kW/m e 20,63 kW/m. Considerando que o litoral brasileiro é de 7.491 km, o recurso ondomotriz em toda a costa brasileira a uma distância média de 127 km da costa é de 89,97 GW.

Nas Regiões Norte e Nordeste os meses mais energéticos são os do final e começo do ano, e os menos energéticos são os meses do meio do ano. Para as outras regiões, ocorre o inverso.

Os valores mais baixos dos três coeficientes de variabilidade temporal são obtidos na Região Leste. Entretanto, a baixa variabilidade temporal obtida pelas análises sazonais e mensais e pelos coeficientes de variabilidade temporal (*COV*, *SV* e *MV*), indicam que vários locais brasileiros podem ser adequados para a conversão da energia das ondas. Estes locais não são apenas concentrados na Região Sul, onde o potencial ondomotriz é maior.

A análise de três WEC indica que, na Região Sul da área de estudo, a conversão de energia das ondas em um local poderia atingir até 10,42 GWh se o dispositivo Wave Dragon for usado. Apesar de apresentar a maior produção, Wave Dragon não foi o dispositivo com os maiores valores de fator de capacidade. O fator de capacidade máximo é de 21,85% no ponto P48 quando se utiliza o Pelamis.

A partir da comparação dos valores de fator de capacidade obtidos com valores encontrados na literatura para diversas partes do mundo, pode-se concluir que a potência média

das ondas não é o fator determinante na escolha de um local para a instalação de uma fazenda de ondas. Escolher um local é muito mais complexo e envolve um grande número de fatores, incluindo a variabilidade temporal do recurso local.

Outra conclusão é que, apesar de serem desenvolvidos para as características do Oceano Atlântico Norte, os dispositivos Pelamis e AquaBuoy parecem se adaptar melhor a condições mais calmas de mar com pouca variabilidade temporal, como ocorre na área de estudo. O Wave Dragon, por outro lado, gera energia melhor em um mar mais energético com maior variabilidade temporal.

A partir da análise de escala dos WEC Pelamis, Wave Dragon e AquaBuoy, a redução para um fator de escala de cerca de 0,30 do Wave Dragon poderia, na teoria, levar a resultados de mais de 80% do fator de capacidade.

Por fim, a análise multi-critério confirmou os resultados obtidos pelas outras análises, indicando três regiões como as mais indicadas para exploração do recurso ondomotriz na costa do Brasil. A Região Sul foi a que obteve os melhores resultados pelo análise, seguida da Região Sudeste e da parte norte da Região Leste. Entretanto, a parte norte da Região Leste é a que mais se destaca quando a variabilidade temporal tem um peso igual ao do potencial ondomotriz na análise.

A seguir são listadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Melhorar a validação dos dados do ERA-Interim utilizando dados de mais satélites para aumentar a resolução temporal e espacial, ou, preferencialmente, utilizando dados de medição *in situ*;
- Simular o comportamento das ondas na região de águas rasas utilizando modelos de onda específicos para essa região;
- Realizar uma análise econômica do custo de implantação e manutenção de um parque ondomotriz;
- Projetar um WEC otimizado para as condições de onda da costa do Brasil;
- Realizar análise multi-critério mais detalhada nas áreas identificadas com potencial.

REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR, M.; RAHIMI, R. Iran Atlas of offshore renewable energies. **Renewable Energy**, v. 36, p. 388-398, 2011.
- AFGAN, N. H.; CARVALHO, M. G. Multi-criteria assessment of new and renewable energy power plants. **Energy**, v. 27, n. 8, p. 739-755, 2002.
- AFGAN, N. H.; CARVALHO, M. G. Sustainability assessment of a hybrid energy system. **Energy Policy**, v. 36, n. 8, p. 2903-2910, 2008.
- AFGAN, N. H.; PILAVACHI, P. A.; CARVALHO, M. G. Multi-criteria evaluation of natural gas resources. **Energy Policy**, v. 35, n. 1, p. 704-713, 2007.
- AFGAN, N. H.; VEZIROGLU, A.; CARVALHO, M. G. Multi-criteria evaluation of hydrogen system options. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 32, n. 15, p. 3183-3193, 2007.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS. PNIH - Plano Nacional de Integração Hidroviária. **Agência Nacional de Transportes Aquaviários**, 2013. Disponível em: <<http://www.antaq.gov.br/portal/PNIH.asp>>. Acesso em: 28 Dez. 2016.
- AIRY, G. B. Tides and waves. **Encyclopaedia Metropolitana**, London, p. 241-396, 1845.
- ALNASER, W. E. Estimation of energy from tide, wave, and sea water currents in Bahrain. **Renewable Energy**, v. 3, n. 2/3, p. 235-238, 1993.
- ALVES, J. H. G. M.; MELO, E. Measurement and modeling of wind waves at the northeast coast of Santa Catarina, Brazil. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v. 49, n. 1/2, p. 13-28, 2001.
- AOUN, N. S.; HARAJLI, H. A.; QUEFFEULOU, P. Preliminary appraisal of wave power prospects in Lebanon. **Renewable Energy**, v. 53, p. 165-173, 2013.
- AQUAMARINE POWER. Technology: How Oyster wave power works. **Aquamarine Power**, 2011. Disponível em: <<http://www.aquamarinepower.com/technology/how-oyster-wave-power-works.aspx>>. Acesso em: 08 Mar. 2016.
- ARAGONÉS-BELTRÁN, P. *et al.* An ANP-based approach for the selection of photovoltaic solar power plant investment projects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 1, p. 249-264, 2010.
- ARAS, H.; ERDOĞMUŞ, Ş.; KOÇ, E. Multi-criteria selection for a wind observation station location using analytic hierarchy process. **Renewable Energy**, v. 29, n. 8, p. 1383-1392, 2004.

ARAÚJO, C. E. S. *et al.* Wave regime characteristics of the Southern Brazilian Coast. **Proceedings of the Sixth International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries - COPEDEC VI**, Colombo, Sri Lanka, p. 15, 2003.

ARENA, F. *et al.* Wave climate analysis for the design of wave energy harvesters in the Mediterranean Sea. **Renewable Energy**, v. 77, p. 125-141, 2015.

ARINAGA, R. A.; CHEUNG, K. F. Atlas of global wave energy from 10 years of reanalysis and hindcast data. **Renewable Energy**, n. 39, p. 49-64, 2012.

AWS OCEAN ENERGY LTD. Archimedes Waveswing submerged wave power buoy. **AWS Ocean**, 2016. Disponível em: <<http://www.awsocan.com/archimedes-waveswing.html>>. Acesso em: 27 Dez. 2016.

AYDOGAN, B.; AYAT, B.; YÜKSEL, Y. Black Sea wave energy atlas from 13 years hindcasted wave data. **Renewable Energy**, v. 57, p. 436-447, 2013.

BABARIT, A. A database of capture width ratio of wave energy converters. **Renewable Energy**, v. 80, p. 610-628, 2015.

BABARIT, A. *et al.* Simulation of electricity supply of an Atlantic island by offshore wind turbines and wave energy converters associated with a medium scale local energy storage. **Renewable Energy**, v. 31, p. 153-160, 2006.

BABARIT, A. *et al.* Numerical benchmarking study of a selection of wave energy converters. **Renewable Energy**, v. 41, p. 44-63, 2012.

BANA E COSTA, C. Les problématiques de l'aide à la décision: Vers l'enrichissement de la trilogie choix-tri-rangement. **RAIRO - Operations Research**, v. 2, n. 30, p. 191-216, 1996.

BARBARIOL, F. *et al.* Improving the assessment of wave energy resources by means of coupled wave-ocean numerical modeling. **Renewable Energy**, v. 60, p. 462-471, 2013.

BECCALI, M.; CELLURA, M.; ARDENTE, D. Decision making in energy planning: the ELECTRE multicriteria analysis approach compared to a FUZZY-SETS methodology. **Energy Conversion and Management**, v. 39, n. 16-18, p. 1869-1881, 1998.

BECCALI, M.; CELLURA, M.; MISTRETTA, M. Decision-making in energy planning. Application of the Electre method at regional level for the diffusion of renewable energy technology. **Renewable Energy**, v. 28, n. 13, p. 2063-2087, 2003.

BEGIĆ, F.; AFGAN, N. H. Sustainability assessment tool for the decision making in selection of energy system—Bosnian case. **Energy**, v. 32, n. 10, p. 1979-1985, 2007.

BEHRENS, S. *et al.* Assessing the wave energy converter potential for Australian coastal regions. **Renewable Energy**, v. 43, p. 210-217, 2012.

BEHZADIAN, M. *et al.* A state-of the-art survey of TOPSIS applications. **Expert Systems with Applications**, v. 39, p. 13051-13069, 2012.

BENTO, A. R. *et al.* Modeling wave energy resources in the Irish west coast. **Proc. 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering - OMAE 2011**, Rotterdam, The Netherlands, 2011.

BENTO, A. R.; MARTINHO, P.; GUEDES SOARES, C. Modelling wave energy resources for UK's southwest coast. **Proceedings of the IEEE OCEANS'2011**, Santander, Spain, 2011.

BENTO, A. R.; MARTINHO, P.; GUEDES SOARES, C. Numerical modelling of the wave energy in Galway Bay. **Renewable Energy**, v. 78, p. 457-466, 2015.

BERNHOFF, H.; SJÖSTEDT, E.; LEIJON, M. Wave energy resources in sheltered sea areas: A case study of the Baltic Sea. **Renewable Energy**, v. 31, n. 13, p. 2164-2170, 2006.

BOUD, R.; THORPE, T. WaveNet: Results from the work of the European Thematic Network of Wave Energy. **European Community**, p. 269-304, 2003. Seção D.

BOZZI, S.; ARCHETTI, R.; PASSONI, G. Wave electricity production in Italian offshore: A preliminary investigation. **Renewable Energy**, v. 62, p. 407-416, 2014.

BRANCO, F. V. **Contribuições de swell gerado em tempestades distantes para o clima de ondas na costa brasileira**. [S.l.]: Universidade de São Paulo, 2005. 154 p. Dissertação (Mestrado em Geociências).

BROWN, J.; BEARMAN, G. **Waves, Tides and Shallow Water Process**. 2nd. ed. United Kingdom: Butterworth-Heinemann, 1999. 227 p.

BURMAN, K.; WALKER, A. **Ocean Energy Technology Overview**. [S.l.]: U.S. Department of Energy, 2009. 30 p. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/docs/fy09osti/44200.pdf>>. Acesso em: 03 ago 2015.

BURTON, J.; HUBACEK, K. Is small beautiful? A multicriteria assessment of small-scale energy technology applications in local governments. **Energy Policy**, v. 35, n. 12, p. 6402-6412, 2007.

CALLAGHAN, J.; BOUD, R. **Future Marine Energy**. Carbon Trust. [S.l.], p. 38. 2006.
CARBON TRUST, UNIVERSITY OF EDINBURGH & JRC. **Ocean Energy: State of the Art Technology Assessment**. SI Ocean. [S.l.], p. 79. 2012.

CARVALHO, J. T. **Simulação da distribuição de energia das ondas oceânicas ao largo do litoral do Brasil**. São José dos Campos: Curso de Pós-graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2010. Dissertação (Mestrado em Meteorologia).

CAVALCANTI, I. F. A. *et al.* **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo. Brasil: Oficina de Textos, 2009. 464 p.

CAVALLARO, F. Multi-criteria decision aid to assess concentrated solar thermal technologies. **Renewable Energy**, v. 34, n. 7, p. 1678-1685, 2009.

CAVALLARO, F. A comparative assessment of thin-film photovoltaic production processes using the ELECTRE III method. **Energy Policy**, v. 38, n. 1, p. 463-474, 2010.

CAVALLARO, F.; CIRAULO, L. A multicriteria approach to evaluate wind energy plants on an Italian island. **Energy Policy**, v. 33, n. 2, p. 235-244, 2005.

CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY. The World Factbook. **CIA**, 2016. Disponível em: <<http://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/fields/2060.html>>. Acesso em: 03 Dez. 2016.

CHALLENGOR, P. G.; SROKOSZ, M. A. Extraction of wave period from altimeter data. **Proc. Workshop on ERS-1, Radar Altimetry Data Products ESA SP-221**, p. 121-124, 1984.

CHANG, G. *et al.* Numerical modelling of the effects of wave energy converter characteristics on nearshore wave conditions. **Renewable Energy**, v. 89, p. 636-648, 2016.

CHAPA, J. Wave energy: Aquabuoy 2.0 Wave Power Generator. **Inhabitat**, 2007. Disponível em: <<https://inhabitat.com/wave-energy-aquabuoy-20-wave-power-generator/>>. Acesso em: 16 Out. 2017.

CHATZIMOURATIDIS, A. I.; PILAVACHI, P. A. Objective and subjective evaluation of power plants and their non-radioactive emissions using the analytic hierarchy process. **Energy Policy**, v. 35, n. 8, p. 4027-4038, 2007.

CHATZIMOURATIDIS, A. I.; PILAVACHI, P. A. Sensitivity analysis of technological, economic and sustainability evaluation of power plants using the analytic hierarchy process. **Energy Policy**, v. 37, n. 3, p. 788-798, 2009.

CHATZIMOURATIDIS, A. I.; PILAVACHI, P. A. Technological, economic and sustainability evaluation of power plants using the Analytic Hierarchy Process. **Energy Policy**, v. 37, n. 3, p. 778-787, 2009.

CHENG, E. W. L.; LI, H. Analytic network process applied to project selection. **J Constr Eng**, v. 131, n. 4, p. 459-466, 2005.

CHERNI, J. A. *et al.* Energy supply for sustainable rural livelihoods. A multi-criteria decision-support system. **Energy Policy**, v. 35, n. 3, p. 1493-1504, 2007.

CHING-PIAO, T. *et al.* Study on the wave climate variation to the renewable wave energy assessment. **Renewable Energy**, v. 38, p. 50-61, 2012.

CHIU, F.-C.; HUANG, W.-Y.; TIAO, W.-C. The spatial and temporal characteristics of the wave energy resources around Taiwan. **Renewable Energy**, v. 52, p. 218-221, 2013.

CHO, E.; WEDLEY, W. A common framework for deriving preference values from pairwise comparison matrices. **Computers and Operations Research**, v. 31, n. 6, p. 893-908, 2004.

CHU, M. T. *et al.* Comparison among three analytical methods for knowledge communities group-decision analysis. **Expert Systems with Applications**, v. 33, n. 4, p. 1011-1024, 2007.

CIMMERY, V. **User Guide for Saga (version 2.0.5)**. [S.l.]: SAGA, v. 2, 2010. 319 p. Disponível em: <http://mirror.ufs.ac.za/sagagis/SAGA%20-%20Documentation/SAGA%20%20User%20Guide/SAGA_User_Guide_Vol2_Cimmery_version_2.0.5_20101209.pdf>.

CLÉMENT, A. *et al.* Wave energy in Europe: current status and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 6, n. 5, p. 405-431, 2002.

CONTESTABILE, P.; FERRANTE, V.; VICINANZA, D. Wave energy resource along the coast of Santa Catarina (Brazil). **Energies**, v. 8, p. 14219-14243, 2015.

CORNEJO-BUENO, L. *et al.* Significant wave height and energy flux prediction for marine energy applications: A grouping genetic algorithm - Extreme Learning Machine approach. **Renewable Energy**, v. 97, p. 380-389, 2016.

CORNETT, M. **A global wave energy resource assessment**. Proc. of the XVIII international offshore and polar engineering conference. Vancouver: Canadá. 2008. p. 318-323.

COUTINHO, P. N. **Levantamento do Estado da Arte da Pesquisa dos Recursos Vivos Marinhos do Brasil**. FEMAR/SECIRM/MMA. Brasília, DF, p. 138. 2005.

CRUZ, J. M. **Ocean Wave Energy: Current Status and Future Perspectives**. Berlin, Germany: Springer, 2008. 431 p.

CRUZ, J. M.; SARMENTO, A. J. **Energia das ondas: introdução aos aspectos tecnológicos e ambientais**. Portugal: Instituto do Ambiente Alfragide, 2004. 61 p.

DALTON, G. J.; ALCORN, R.; LEWIS, T. A 10 year installation program for wave energy in Ireland: A case study sensitivity analysis on financial returns. **Renewable Energy**, v. 40, p. 80-89, 2012.

DAVIES, C. G.; CHALLENGOR, P. G.; COTTON, P. D. Measurements of wave period from radar altimeters. **Proceeding of the International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis**, San Francisco, USA, p. 819-826, 2001.

DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. **Coastal Processes with Engineering Applications**. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2001.

DEE, D. P. *et al.* The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 137, n. 656 Part a, p. 553-597, 2011.

DEFNE, Z.; HAAS, K. A.; FRITZ, H. M. Wave power potential along the Atlantic coast of the southeastern USA. **Renewable Energy**, v. 34, p. 2197-2206, 2009.

DIAKOULAKI, D. *et al.* The use of a preference disaggregation method in energy analysis and policy making. **Energy**, v. 24, n. 2, p. 157-166, 1999.

DIMITROVA, M.; KORTCHEVA, A.; GALABOV, V. Validation of the operational wave model WAVEWATCH III against altimetry data from JASON-2 satellite. **Bulgarian Journal of Meteorology and Hydrology**, v. 12, n. 1-2, p. 4-17, 2013.

DREW, B.; PLUMMER, A. R.; SAHINKAYA, M. N. A review of wave energy converter technology. **Proceedings of the IMechE, Part A: Journal of Power and Energy**, v. 223, p. 887-902, 2009.

DUMONT, J. P. *et al.* **OSTM/Jason-2 Products Handbook**. [S.l.]: Aviso, 2015. 74 p. Disponivel em: <http://www.aviso.altimetry.fr/fileadmin/documents/data/tools/hdbk_j2.pdf>. Acesso em: 13 set. 2016.

DURRANT, T. H.; GREENSLADE, D. J. M.; SIMMONDS, I. Validation of Jason-1 and Envisat remotely sensed wave heights. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 26, p. 123-134, 2009.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. **Survey and characterization of potential offshore wave energy sites in Oregon**. Electric Power Research Institute. [S.l.], p. 52. 2004. (E2I EPRI WP-OR-003).

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. **Survey and characterization of potential offshore wave energy sites in Washington**. Electric Power Research Institute. [S.l.], p. 20. 2004. (E2I EPRI WP-WA-003).

EMMANOUIL, G. *et al.* 10-year high resolution study of wind sea waves and wave energy assessment in the Greek offshore areas. **Renewable Energy**, v. 90, p. 399-419, 2016.

ESPIE, P. *et al.* Multiple criteria decision making techniques applied to electricity distribution system planning. **IEE Generation, Transmission and Distribution**, v. 150, n. 5, p. 527-535, 2003.

ESTEFEN, S. F. Energia das Ondas. In: TOLMASQUIM, M. T. **Fontes renováveis de energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

FALCÃO, A. F. O. Wave energy utilization: A review of the technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Lisboa, v. 14, n. 3, p. 899-918, 2010.

FALCÃO, A. F. O. **Modelling of Wave Energy Conversion**. Instituto Técnico de Lisboa. Lisboa, Portugal, p. 130. 2014.

FALNES, J. A resonant point absorber of ocean-wave power. **Nature**, v. 256, p. 478-479, 1975.

FLEMING, F. P. **Avaliação do Potencial de Energias Oceânicas no Brasil**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - COPPE/UFRJ.

FOLLEY, M.; WHITTAKER, T. J. T. Analysis of the nearshore wave energy resource. **Renewable Energy**, v. 34, p. 1709-1715, 2009.

GALLAGHER, S. *et al.* The nearshore wind and wave energy potential of Ireland: A high resolution assessment of availability and accessibility. **Renewable Energy**, v. 88, p. 494-516, 2016.

GARCIA, G. P. **Avaliação Económica de Centrais Eólicas e Fotovoltaicas em Portugal Continental. Análise de Sensibilidade**. Lisboa: Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia - Universidade de Lisboa, 2013. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia e do Ambiente).

GARCÍA-MEDINA, G.; ÖZKAN-HALLER, H. T.; RUGGIERO, P. Wave resource assessment in Oregon and southwest Washington, USA. **Renewable Energy**, v. 64, p. 203-214, 2014.

GARRISON, T.; ELLIS, R. **Oceanography - An invitation to marine sciences**. 9th. ed. Boston: Cengage Learning, 2016.

GEORGOPOULOU, E.; LALAS, D.; PAPAGIANNAKIS, L. A multicriteria decision aid approach for energy planning problems: The case of renewable energy option. **European Journal of Operational Research**, v. 103, n. 1, p. 38-54, 1997.

GOLETISIS, Y.; PSARRAS, J.; SAMOUILIDIS, J. E. Project Ranking in the Armenian Energy Sector Using a Multicriteria Method for Groups. **Annals of Operations Research**, v. 1-4, p. 135-157, 2003.

GOMMENGINGER, C. P. *et al.* An empirical model to retrieving ocean wave period from Nadir altimeter data. **Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS 2003**, Toulouse, France, p. 2706-2708, 2003.

GONÇALVES, M.; MARTINHO, P.; GUEDES SOARES, C. Assessment of wave energy in the Canary Islands. **Renewable Energy**, v. 68, p. 774-784, 2014.

GONÇALVES, M.; MARTINHO, P.; GUEDES SOARES, C. Wave energy conditions in the western French coast. **Renewable Energy**, v. 62, p. 155-163, 2014.

GONÇALVES, W. M.; FEIJÓ, F. T.; ABDALLAH, P. R. Energia das ondas: aspectos tecnológicos e econômicos e perspectivas de aproveitamento no Brasil. **III Seminário e Workshop em Engenharia Mecânica - SEMENG'08**, Rio Grande, Brasil, 2008.

GOUMAS, M. G.; LYGEROU, V. A.; PAPAYANNAKIS, L. E. Computational methods for planning and evaluating geothermal energy projects. **Energy Policy**, v. 27, n. 3, p. 147-154, 1999.

GOUMAS, M.; LYGEROU, V. An extension of the PROMETHEE method for decision making in fuzzy environment: Ranking of alternative energy exploitation projects. **European Journal of Operational Research**, v. 123, n. 3, p. 606-613, 2000.

GOVIDAN, R. *et al.* Altimeter-Derived Ocean Wave Period Using Algorithm. **Geoscience and Remote Sensing**, v. 8, n. 2, p. 354-358, 2011.

GREENING, L. A.; BERNOW, S. Design of coordinated energy and environmental policies: use of multi-criteria decision-making. **Energy Policy**, v. 32, n. 6, p. 721-735, 2004.

GUILLOU, N.; CHAPALAIN, G. Numerical modelling of nearshore wave energy resource in the Sea of Iroise. **Renewable Energy**, v. 83, p. 942-953, 2015.

GUNN, K.; STOCK-WILLIAMS, C. Quantifying the global wave power resource. **Renewable Energy**, n. 44, p. 296-304, 2012.

HÄMÄLÄINEN, R. P.; KARJALAINEN, R. Decision support for risk analysis in energy policy. **Eur J Oper Res**, n. 56, p. 172-183, 1992.

HARALAMBOPOULOS, D. A.; POLATIDIS, H. Renewable energy projects: structuring a multi-criteria group decision-making framework. **Renewable Energy**, v. 28, n. 6, p. 961-973, 2003.

HASHEMI, M. R.; GRILLI, S. T.; NEILL, S. P. A simplified method to estimate tidal current effects on the ocean wave power resource. **Renewable Energy**, v. 96, p. 257-269, 2016.

HASHEMI, M. R.; NEILL, S. P. The role of tides in shelf-scale simulations of the wave energy resource. **Renewable Energy**, v. 69, p. 300-310, 2014.

HEEZEN, B. C.; MENARD, H. W.. Topography of the deep sea floor. In: HILL, M. N. **The Sea**. [S.l.]: Intersec. Publ., v. 3, 1966. p. 233-280.

HEMER, M. A. *et al.* A revised assessment of Australia's national wave energy resource. **Renewable Energy**, v. In Press, Corrected Proof, p. 1-23, 2016.

HENFRIDSSON, U. *et al.* Wave energy potential in the Baltic Sea and the Danish part of the North Sea, with reflections on the Skagerrak. **Renewable Energy**, v. 32, n. 12, p. 2069-2084, 2007.

HIJMANS, R. Download. **Global Administrative Areas**, 2009. Disponível em: <<http://www.gadm.org/country>>. Acesso em: 30 Dez. 2016.

HILES, C. E. *et al.* Wave energy resources near Hot Springs Cove, Canada. **Renewable Energy**, v. 71, p. 598-608, 2014.

HITZ, J. A. LIMPET: Land Installed Marine Powered Energy Transformer. **State of the Planet**, 2010. Disponível em: <<http://blogs.ei.columbia.edu/2010/05/19/limpet-land-installed-marine-powered-energy-transformer/>>. Acesso em: 11 Ago 2015.

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

HUGHES, M. G.; HEAP, A. D. National-scale wave energy resource assessment for Australia. **Renewable Energy**, v. 35, p. 1783-1791, 2010.

HWANG, C. L.; YOON, K. **Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications**. New York: Springer-Verlag, 1981.

HWANG, P. A. *et al.* A statistical comparison of wind speed, wave height, and wave period derived from satellite altimeters and ocean buoys in the Gulf of Mexico region. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. C5, p. 10451-10468, 1998.

IGLESIAS, G. *et al.* Wave energy potential in Galicia (NW Spain). **Renewable Energy**, v. 34, n. 11, p. 2323-2333, 2009.

IGLESIAS, G.; CARBALLO, R. Wave energy and nearshore hot spots: The case of the SE Bay of Biscay. **Renewable Energy**, v. 35, p. 2490-2500, 2010.

IGLESIAS, G.; CARBALLO, R. Wave energy resource in the Estaca de Bares area (Spain). **Renewable Energy**, v. 35, p. 1574-1584, 2010.

IGLESIAS, G.; CARBALLO, R. Wave resource in El Hierro - an island towards energy self-sufficiency. **Renewable Energy**, v. 36, p. 689-698, 2011.

INMAN, D. L.; BRUSH, B. M. The Coastal Challenge. **Science**, v. 181, n. 4094, p. 20-32, 1973.

INNOCENTINI, V. *et al.* Ocorrência de vagas no arquipélago de São Pedro e São Paulo: caso de 24 de outubro de 1999. **Rev. Bras. Met.**, v. 16, p. 177-186, 2001.

ISAACS, J. D.; SEYMOUR, R. J. The ocean as a power resource. **International Journal of Environmental Studies**, v. 4, n. 1-4, p. 201-205, 1973.

ISHIZAKA, A.; NEMERY, P. **Multi-Criteria Decision Analysis - Methods and Software**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2013. 296 p.

IUPPA, C. *et al.* Potential wave energy production by different wave energy converters around Sicily. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 7, p. 17, 2015.

IVANOVA, E. Y.; VOROPAI, N. I.; HANDSCHIN, E. **A multi-criteria approach to expansion planning of wind power plants in electric power systems**. Power Tech, 2005 IEEE Russia. St. Petersburg: IEEE. 2005. p. 1-4.

KABLAN, M. M. Decision support for energy conservation promotion: an analytic. **Energy Policy**, v. 32, n. 10, p. 1151-1158, 2004.

KARIMIRAD, M. **Offshore Energy Structures: For Wind Power, Wave Energy and Hybrid Marine Platforms**. [S.l.]: Springer, 2014.

KASIULIS, E.; PUNYS, P.; KOFOED, J. P. Assessment of theoretical near-shore wave power potential along the Lithuanian coast of the Baltic Sea. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 134-142, 2015.

KAYA, T.; KAHRAMAN, C. Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy VIKOR & AHP methodology: The case of Istanbul. **Energy**, v. 35, n. 6, p. 2517-2527, 2010.

KEENEY, R. **Value-Focused Thinking: A Path to Creative Decision Making**. Cambridge: Harvard University Press, 1992.

KIM, G. *et al.* Offshore and nearshore wave energy assessment around the Korean Peninsula. **Energy**, v. 36, n. 3, p. 1460-1469, 2011.

KINSMAN, B. **Wind Waves: Their Generation and Propagation on the Ocean Surface**. 1^a. ed. Englewoods Cliffs: Prentice Hall, 1965.

KÖNE, A. Ç.; BÜKE, T. An analytical network process (ANP) evaluation of alternative. **Energy Policy**, v. 35, n. 10, p. 5220-5228, 2007.

KOWALSKI, K. *et al.* Sustainable energy futures: Methodological challenges in combining scenarios and participatory multi-criteria analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 197, n. 3, p. 1063-1074, 2009.

KUMAR, V. S.; ANOOP, T. R. Wave energy resource assessment for the Indian shelf seas. **Renewable Energy**, v. 76, p. 212-219, 2015.

LAGOUN, M. S.; BENALIA, A.; BENBOUZID, M. E. H. Ocean Wave Converters: State of the Art and Current Status. **2010 IEEE International Energy Conference**, Manama, Bahrain, 2010. 636-641.

LAHDELMA, R.; SALMINEN, P.; HOKKANEN, J. Using multicriteria methods in environmental planning and management. **Environ Manage**, v. 26, n. 6, p. 595-605, 2000.

LAI, Y. J.; LIU, T. Y.; HWANG, C. L. TOPSIS for MODM. **European Journal of Operational Research**, v. 76, n. 3, p. 486-500, 1994.

LE, P. *et al.* Aggregating GIS and MCDM to Optimize Wave Energy Converters Location in Tasmania, Australia. In: CASCALES, M. D. S. G., *et al.* **Soft Computing Applications for Renewable Energy and Energy Efficiency**. Hershey: IGI Global, 2015. Cap. 6, p. 141-164.

LEE, A. H. I.; CHEN, H. H.; KANG, H. Y. Multi-criteria decision making on strategic selection of wind farms. **Renewable Energy**, v. 34, n. 1, p. 120-126, 2009.

LEE, S. K.; MOGI, G.; KIM, J. W. The competitiveness of Korea as a developer of hydrogen energy technology: the AHP approach. **Energy Policy**, v. 36, n. 4, p. 1284-1291, 2008.

LEE, S. K.; YOON, Y. J.; KIM, J. W. A study on making a long-term improvement in the national energy efficiency and GHG control plans by the AHP approach. **Energy Policy**, v. 35, n. 5, p. 2862-2868, 2007.

LEMOS, C. F.; CALBETE, N. O. **Sistemas frontais que atuam no litoral de 1987-1995**. Edição Comemorativa 10 Anos. ed. [S.l.]: Climanálise, 1996.

LENEE-BLUHM, P.; PAASCH, R.; ÖZKAN-HALLER, H. T. Characterizing the wave energy resource of the US Pacific Northwest. **Renewable Energy**, v. 36, p. 2106-2119, 2011.

LI, Y.; YU, Y.-H. A synthesis of numerical methods for modeling wave energy converter-point absorbers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 6, p. 4352-4364, 2012.

LIANG, B. *et al.* Numerical modelling of the nearshore wave energy resources of Shandong peninsula, China. **Renewable Energy**, v. 57, p. 330-338, 2013.

LIANG, B. *et al.* 22-Year wave energy hindcast for the China East Adjacent Seas. **Renewable Energy**, v. 71, p. 200-207, 2014.

LIBERTI, L.; CARILLO, A.; SANNINO, G. Wave energy resource assessment in the Mediterranean, the Italian perspective. **Renewable Energy**, v. 50, p. 938-949, 2013.

LIN, C. A revised framework for deriving preference values from pairwise comparison. **European Journal of Operational Research**, v. 176, n. 2, p. 1145-1150, 2007.

LINKOV, I. *et al.* From comparative risk assessment to multi-criteria decision analysis and adaptive management: Recent developments and applications. **Environment International**, v. 32, n. 8, p. 1072-1093, 2006.

LÓPEZ, M.; VEIGAS, M.; IGLESIAS, G. On the wave energy resource of Peru. **Energy Conversion and Management**, v. 90, p. 31-40, 2015.

MACGILLIVRAY, A. *et al.* **Ocean energy technology: gaps and barriers**. Strategic Initiative for Ocean Energy (SI Ocean). [S.l.]. 2013.

MACKAY, E. B. L.; BAHAJ, A. S.; CHALLENOR, P. G. Uncertainty in wave energy resource assessment. Part 2: Variability and predictability. **Renewable Energy**, v. 35, p. 1809-1819, 2010.

MAGAGNA, D.; UIHLEIN, A. Ocean energy development in Europe: Current status and future perspectives. **International Journal of Marine Energy**, v. 11, p. 84-104, 2015.

MANN, L. D. Application of Ocean Observations & Analysis: The CETO Wave Energy Project. In: SCHILLER, A.; BRASSINGTON, G. B. **Operational Oceanography in the 21st Century**. [S.l.]: Springer Netherlands, 2011. Cap. 27, p. 721-729.

MARGHERITINI, L.; HANSEN, A. M.; FRIGAARD, P. A method for EIA scoping of wave energy converters. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 32, n. 1, p. 33-44, 2012.

MARINS, C. S.; SOUZA, D. O.; BARROS, M. D. S. O Uso do Método de Análise Hierárquica (AHP) na Tomada de Decisões Gerenciais - Um Estudo de Caso. **XLI SBPO 2009 - Pesquisa Operacional na Gestão do Conhecimento**, Porto Seguro, 2009. 1778-1788.

MARTINS, L. R.; COUTINHO, P. N. The Brazilian continental margin. **Earth Science Reviews**, v. 17, n. 1-2, p. 87-107, 1981.

MEADE, L. A.; PRESLEY, A. R&D project selection using the analytic network process. **IEEE Engineering Management**, v. 49, n. 1, p. 59-66, 2005.

MEDIAVILLA, D. G.; SEPÚLVEDA, H. H. Nearshore assessment of wave energy resource in central Chile (2009-2010). **Renewable Energy**, v. 90, p. 136-144, 2016.

MENDES, R. P. G.; CALADO, M. R. A.; MARIANO, S. J. P. S. Wave energy potential in Portugal - Assessment based on probabilistic description of ocean waves parameters. **Renewable Energy**, v. 47, p. 1-8, 2012.

MILES, J. W. On the generation of surface waves by shear flows. **J. Fluid Mech**, v. 3, p. 185-204, 1957.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Dados Georreferenciados. **Ministério do Meio Ambiente**, 2016. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/areas-protegidas/cadastronacional-de-ucs/dados-georreferenciados>>. Acesso em: 12 jun. 2016.

MIRZAEI, A.; TANGANG, F.; JUNENG, L. Wave energy potential assessment in the central and southern regions of the South China Sea. **Renewable Energy**, v. 80, p. 454-470, 2015.

MOLLISON, D.; PONTES, M. T. Assessing the Portuguese wave-power resource. **Energy**, v. 17, n. 3, p. 255-268, 1992.

MONALDO, F. Expected differences between buoy and radar altimeter estimates of wind speed and significant wave height implication on buoy-altimeter comparisons. **Journal of Geophysical Research**, v. 93, n. C3, p. 2285-2302, 1988.

MONTEFORTE, M.; LO RE, C.; FERRERI, G. B. Wave energy assessment in Sicily (Italy). **Renewable Energy**, v. 78, p. 276-287, 2015.

MOTA, P.; PINTO, J. P. Wave energy potential along the western Portuguese coast. **Renewable Energy**, v. 71, p. 8-17, 2014.

MUELLER, M. A. Electrical generators for direct drive wave energy converters. **IEE Proc. Gener. Trans. Distrib.**, v. 149, n. 4, p. 446-456, 2002.

MULTON, B. **Marine renewable energy handbook**. London: Wiley, 2012.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION'S. Glossary of Terms for Detailed Wave Information. **National Data Buoy Center**, 2017. Disponível em: <<http://www.ndbc.noaa.gov/waveobs.shtml>>. Acesso em: 12 Out. 2017.

NEILL, S. P.; HASHEMI, M. R. Wave power variability over the northwest European shelf seas. **Applied Energy**, v. 106, p. 31-46, 2013.

NIEUWKOOP, J. C. C. *et al.* Wave resource assessment along the Cornish coast (UK) from a 23-year hindcast dataset against buoy measurements. **Renewable Energy**, v. 58, p. 1-14, 2013.

NIGIM, K.; MUNIER, N.; GREEN, J. Pre-feasibility MCDM tools to aid communities in prioritizing local viable renewable energy sources. **Renewable Energy**, v. 29, n. 11, p. 1775-1791, 2004.

NOBRE, A. *et al.* Geo-spatial multi-criteria analysis for wave energy conversion system deployment. **Renewable Energy**, v. 34, p. 97-111, 2009.

OBERSCHMIDT, J. *et al.* Modified PROMETHEE approach for assessing energy technologies. **International Journal of Energy Sector Management**, v. 4, n. 2, p. 183-212, 2010.

ÖNÜT, S.; TUZKAYA, U. R.; SAADET, N. Multiple criteria evaluation of current energy resources for Turkish manufacturing industry. **Energy Conversion and Management**, v. 49, n. 6, p. 1480-1492, 2008.

ORTEGA, S.; OSORIO, A. F.; AGUDELO, P. Estimation of the wave power resource in the Caribbean Sea in areas with scarce instrumentation. Case study: Isla Fuerte, Colombia. **Renewable Energy**, v. 57, p. 240-248, 2013.

ÖZGER, M.; ALTUNKAYNAK, A.; SEN, Z. Stochastic wave energy calculation formulation. **Renewable Energy**, v. 29, p. 1747-1756, 2004.

PALMEIRA, A. C. P. A.; CAMARGO, R.; PALMEIRA, R. M. J. Efeito do detalhamento dos ventos na modelagem de agitação marítima no Oeste do Atlântico Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 1, p. 117-125, 2012.

PANICKER, N. N. Power resource estimate of ocean surface waves. **Ocean Engineering**, v. 3, p. 429-439, 1976.

PARKINSON, S. C. *et al.* Integrating ocean wave at large-scales: A study of the US Pacific Northwest. **Renewable Energy**, v. 76, p. 551-559, 2015.

PHILLIPS, O. M. On the generation of waves by turbulent wind. **J. Fluid Mech.**, v. 4, p. 417-445, 1957.

PIANCA, C.; MAZZINI, P. L. F.; SIEGLE, E. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 53-70, p. 58, 2010.

PILAVACHI, P. A. *et al.* Multi-criteria evaluation of hydrogen and natural gas fuelled power plant technologies. **Applied Thermal Engineering**, v. 29, n. 11-12, p. 2228-2234, 2009.

POHEKAR, S. D.; RAMACHANDRAM, M. Application of multi-criteria decision-making to sustainable energy planning—a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 8, p. 365–381, 2004.

POND, S.; PICKARD, G. **Introductory Dynamical Oceanography**. 1^a. ed. Oxford: Pergamon Press Ltd, 1978.

PONTES, M. T. Assessing the European wave energy resource. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, v. 120, n. 4, p. 226-231, 1998.

PORTILLA, J.; SOSA, J.; CAVALERI, L. Wave energy resources: Wave climate and exploitation. **Renewable Energy**, v. 57, p. 594-605, 2013.

PÖYHÖNE, M.; HÄMÄLÄINEN, R.; SALO, A. An experiment on the numerical modelling of verbal ratio statements. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**, v. 1, n. 6, p. 1-10, 1997.

QUILFEN, Y. *et al.* Calibration/Validation of an altimeter wave period model and application to TOPEX/Poseidon and Jason-1 Altimeters. **Marine Geodesy**, v. 27, n. 3-4, p. 535-549, 2004.

RAJU, V. S.; RAVINDRAN, M. Wave energy: potential and programme in India. **Renewable Energy**, v. 10, n. 2/3, p. 339-345, 1997.

REEVE, D. E. *et al.* An investigation of the impacts of climate change on wave energy generation: The Wave Hub, Cornwall, UK. **Renewable Energy**, v. 36, p. 2404-2413, 2011.

REIKARD, G.; ROBERTSON, B.; BIDLOT, J.-R. Combining wave energy with wind and solar: Short-term forecasting. **Renewable Energy**, v. 81, p. 442-456, 2015.

REMAC. Mapas batimétricos da margem continental brasileira. **Projeto REMAC-PETROBRÁS**. Rio de Janeiro: Série Projeto REMAC., 1975.

RENEWABLE ENERGY FOCUS. LIMPET wave power plant 10 years. **Renewable Energy Focus**, 2010. Disponível em: <<http://www.renewableenergyfocus.com/view/14267/limpet-wave-power-plant-10-years/>>. Acesso em: 11 Ago 2015.

RHINEFRANK, K. *et al.* Novel ocean energy permanent magnet linear generator buoy. **Renewable Energy**, v. 31, p. 1279-1298, 2006.

RICARTE BESERRA, E. **Avaliação de sítios para o aproveitamento dos recursos energéticos das ondas do mar**. Rio de Janeiro, Brasil: COOPE/UFRJ, 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Oceânica).

RICARTE BESERRA, E. *et al.* Princípios para implantação da usina piloto de energia das ondas e suas aplicações. **VIII Congresso Brasileiro de Defesa do Meio Ambiente**, Rio de Janeiro, Brasil, p. 19, 2005.

ROBERTSON, B. R. D.; HILES, C. E.; BUCKHAM, B. J. Characterizing the near shore wave energy resource on the west coast of Vancouver Island, Canada. **Renewable Energy**, v. 71, p. 665-678, 2014.

ROY, B. The optimisation problem formulation: Criticism and over stepping. **Journal of the Operational Research Society**, v. 6, n. 32, p. 427-436, 1981.

RUSU, E.; GUEDES SOARES, C. Numerical modelling to estimate the spatial distribution of the wave energy in the Portuguese nearshore. **Renewable Energy**, v. 34, n. 6, p. 1501-1516, 2009.

RUSU, E.; GUEDES SOARES, C. Wave energy assessments in the Azores islands. **Renewable Energy**, v. 45, p. 183-196, 2012.

RUSU, E.; GUEDES SOARES, C. Wave pattern around the Madeira Islands. **Energy**, v. 45, p. 771-785, 2012.

RUSU, E.; GUEDES SOARES, C. Coastal impact induced by a Pelamis wave farm operating in the Portuguese nearshore. **Renewable Energy**, v. 58, p. 34-49, 2013.

RUSU, E.; ONEA, F. Estimation of the wave energy conversion efficiency in the Atlantic Ocean close to the European islands. **Renewable Energy**, v. 85, p. 687-703, 2016.

SAATY, T. Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process. **Management Science**, v. 3, n. 15, p. 234-281, 1977.

SAATY, T. **The Analytic Process**. New York: McGraw-Hill, 1980.

SAATY, T. L. Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process. **Management Science**, v. 32, n. 7, p. 841-855, 1986.

SAFAEI MOHAMADABADI, H.; TICHKOWSKY, G.; KUMAR, A. Development of a multi-criteria assessment model for ranking of renewable and non-renewable transportation fuel vehicles. **Energy**, v. 34, n. 1, p. 112-125, 2009.

SAGA GIS BRASIL. Comunidade SAGA GIS Brasil. **SAGA GIS Brasil**, 2017. Disponível em: <<https://sagagisbrasil.wordpress.com/#ha-desenvolvedor-saga>>. Acesso em: 12 Out. 2017.

SAKET, A.; ETEMAD-SHAHIDI, A. Wave energy potential along the northern coasts of the Gulf of Oman, Iran. **Renewable Energy**, v. 40, p. 90-97, 2012.

SALMINEN, P.; HOKKANEN, J.; LAHDELMA, R. Comparing multicriteria methods in the context of environmental problems. **European Journal of Operational Research**, v. 104, n. 3, p. 485-496, 1998.

SAMPAIO, M. J. R. T. **Aplicação do modelo SWAN na caracterização da agitação marítima na zona adjacente a Pinheiro da Cruz**. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa - Instituto Superior Técnico, 2008. 65 p. Dissertação de Mestrado- Engenharia Civil.

SAN CRISTÓBAL, J. R. Multi-criteria decision-making in the selection of a renewable energy project in Spain: The Vikor method. **Renewable Energy**, v. 36, n. 2, p. 498-502, 2011.

SANNASIRAJ, S. A.; SUNDUR, V. Assessment of wave energy potential and its harvesting approach along the Indian coast. **Renewable Energy**, v. 99, p. 398-409, 2016.

SAULNIER, J.-B.; PREVOSTO, M.; MAISONDIEU, C. Refinements of sea state statistics for marine renewables: A case study from simultaneous buoy measurements in Portugal. **Renewable Energy**, v. 36, p. 2853-2865, 2011.

SAWYER, T. CETO Progress e Next Steps. **Cornegie Wave Energy**, 2015. Disponível em: <http://carnegiwave.com/wp-content/uploads/2015/10/151021_OEE-Carnegie_Website.pdf>. Acesso em: 11 Out. 2016.

SCHULZWEIDA, U. **CDO User's Guide**. [S.l.]: Climate Data Operators, v. Version 1.7.2, 2016. 200 p.

SEMEDO, A. *et al.* A Global View on the Wind Sea and Swell Climate and Variability from ERA-40. **Journal of Climate**, v. 24, n. 5, p. 1461-1479, 2011.

SI OCEAN. **Ocean Energy: State of the Art**. SI Ocean. [S.l.], p. 78. 2013.

SIERRA, J. P. *et al.* Wave energy assessment in Lanzarote (Spain). **Renewable Energy**, v. 55, p. 480-489, 2013.

SIERRA, J. P. *et al.* Wave energy potential along the Atlantic coast of Morocco. **Renewable Energy**, v. 96, p. 20-32, 2016.

SIERRA, J. P.; MÖSSO, C.; GONZÁLEZ-MARCO, D. Wave energy resource assessment in Menorca (Spain). **Renewable Energy**, v. 71, p. 51-60, 2014.

SILVA, D.; RUSU, E.; GUEDES SOARES, C. Evaluation of Various Technologies for Wave Energy Conversion in the Portuguese Nearshore. **Energies**, v. 6, p. 1344-1364, 2013.

SILVA, P. E. D. **Caracterização do padrão de ondas na costa do Brasil por meio de modelagem numérica**. São José dos Campos: Programa de Pós-Graduação em Meteorologia,

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2013. Dissertação (Mestrado em Meteorologia).

SISKOS, J.; HUBERT, P. Multi-criteria analysis of the impacts of energy alternatives: A survey and a new comparative approach. **European Journal of Operational Research**, v. 13, n. 3, p. 278-299, 1983.

SMITH, H. C. M.; HAVERSON, D.; SMITH, G. H. A wave energy resource assessment case study: Review, analysis and lessons learnt. **Renewable Energy**, v. 60, p. 510-521, 2013.

SOERENSEN, H. C.; WEINSTEIN, A. Ocean Energy: Position paper for IPCC. **IPCC Scoping Conference on Renewable Energy**, Lübeck, Germany, p. 8, Jan 2008.

SOOMERE, T.; EELSALU, M. On the wave energy potential along the eastern Baltic Sea coast. **Renewable Energy**, v. 71, p. 221-233, 2014.

SOUZA, R. D. A. **Escolha de tecnologia de conversão da energia das ondas em energia elétrica**. [S.l.]: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica - UFRG, 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica).

STILLWELL, W.; VON WINTERFELDT, D.; JOHN, R. Comparing hierarchical and non-hierarchical weighting methods for eliciting multiattribute value models. **Management Science**, v. 4, n. 33, p. 442-450, 1987.

STOPA, J. E. *et al.* Wave energy resource along the Hawaiian Island chain. **Renewable Energy**, v. 55, p. 305-321, 2013.

STOPA, J. E.; CHEUNG, K. F.; CHEN, Y.-L. Assessment of wave energy resource in Hawaii. **Renewable Energy**, v. 36, p. 554-567, 2011.

STRANGE, D. L. P. *et al.* Renewable energy resources: opportunities and constraints, 1990-2020. **World Energy Council**, p. 351-358, 1993.

TAHA, R. A.; DAIM, T. Multi-Criteria Applications in Renewable Energy Analysis, a Literature Review. In: DAIM, T.; OLIVER, T.; KIM, J. **Research and Technology Management in the Electricity Industry - Methods, Tools and Case Studies**. London: Springer-Verlag, 2013. Cap. 2, p. 17-30.

TEDD, J.; KOFOED, J. P. Measurements of overtopping flow time series on the Wave Dragon, wave energy converter. **Renewable Energy**, v. 34, p. 711-717, 2009.

TOPCU, Y. I.; ULENGIN, F. Energy for the future: An integrated decision aid for the case of Turkey. **Energy**, v. 29, n. 1, p. 137-154, 2004.

TRUJILLO, A. P.; THURMAN, H. V. **Essentials of Oceanography**. 10th. ed. [S.l.]: Pearson, 2011. 551 p.

TZENG, G.-H.; LIN, C.-W.; OPRICOVIC, S. Multi-criteria analysis of alternative-fuel buses for public transportation. **Energy Policy**, v. 33, n. 11, p. 1373-1383, 2005.

ULUTAŞ, B. H. Determination of the appropriate energy policy for Turkey. **Energy**, v. 30, n. 7, p. 1146-1161, 2005.

VELEDA, D. R. A. **Seasonal and intraseasonal variability of the western boundary regime off the Eastern Brazilian Coast**. Recife: Programa de Pós-Graduação em Oceanografia - UFPE, 2008. 150 p. Tese (Doutorado em Ciências na área de Oceanografia Física).

VENUGOPAL, V.; NEMALIDINNE, R. Wave resource assessment for Scottish waters using a large scale North Atlantic spectral wave model. **Renewable Energy**, v. 76, p. 503-525, 2015.

VICINANZA, D.; CONTESTABILE, P.; FERRANTE, V. Wave energy potential in the north-west of Sardinia (Italy). **Renewable Energy**, v. 50, p. 506-521, 2013.

WANG, J. J. *et al.* Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p. 2263–2278, 2009.

WANG, Z. *et al.* Assessments of wave energy in the Bohai Sea, China. **Renewable Energy**, v. 90, p. 145-156, 2016.

WATERS, R. *et al.* Wave climate off the Swedish west coast. **Renewable Energy**, v. 34, n. 6, p. 1600-1606, 2009.

WAVE ENERGY CENTRE. **Potencial e Estratégia de desenvolvimento da energia das ondas em Portugal**. Wave Energy Centre - Centro de Energia das Ondas. [S.l.], p. 72. 2004.

WAVEROLLER. Near-shore vs. Off-shore. **WaveRoller**, 2012. Disponível em: <<http://aw-energy.com/wave-energy-resources/near-shore-vs-off-shore>>. Acesso em: 08 Mar. 2016.

WEBER, M.; EISENFÜHR, F.; VON WINTERFELDT, D. The effects os spitting attributes on weights in multiattribute utility measurement. **Management Science**, v. 4, n. 34, p. 431-445, 1988.

WHITTAKER, T. J. T. *et al.* **Islay LIMPET Wave Power Plant**. The Queen's University of Belfast. [S.l.], p. 62. 2002. (JOR3-CT98-0312).

WIEGEL, R. L. **Oceanographical Engineering**. Mineola, New York: DOver Publications, 1992. 527 p.

WIMMLER, C. *et al.* Multi-Criteria Decision Support Methods for Renewable Energy Systems on Islands. **Journal of Clean Energy Technologies**, v. 3, n. 3, p. 185-195, 2015.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Guide to wave analysis and forecasting**. 2nd. ed. Geneva, Switzerland: Secretariat of the World Meteorological Organization, 1998.

WU, S.; LIU, C.; CHEN, X. Offshore wave energy resource assessment in the East China Sea. **Renewable Energy**, v. 76, p. 628-636, 2015.

YAAKOB, O. *et al.* Satellite-based wave data and wave energy resource assessment for South China Sea. **Renewable Energy**, v. 88, p. 359-371, 2016.

YOON, K. **Systems selection by multiple attribute decision making**. [S.l.]: Kansas State University, 1980.

ZHANG, D.; LI, W.; LIN, Y. Wave energy in China: Current status and perspectives. **Renewable Energy**, v. 34, p. 2089-2092, 2009.

ZHAO, D.; LI, S.; SONG, C. The comparison of altimeter retrieval algorithms of the wind speed and the wave period. **Acta Oceanologica Sinica**, v. 31, n. 3, p. 1-9, 2012.

ZHAO, J.; YANG, Z.; CHEN, S. **Multi-criteria evaluation of alternative power supply using analytic hierarchy process**. Sustainable Power Generation and Supply - SUPERGEN '09. Nanjing: IEEE. 2009. p. 1-7.

ZHOU, G. *et al.* Temporal-spatial distribution of wave energy: A case study of Beibu Gulf, China. **Renewable Energy**, v. 74, p. 344-356, 2015.

ZHOU, P.; ANG, B. W.; POH, K. L. Decision analysis in energy and environmental modeling: An update. **Energy**, v. 31, n. 14, p. 2604-2622, 2006.

ZODIATIS, G. *et al.* Wave energy potential in the Eastern Mediterranean Levantine Basin. An integrated 10-year study. **Renewable Energy**, v. 69, p. 311-323, 2014.

APÊNDICE A – ARTIGOS SOBRE POTENCIAL ONDOMOTRIZ

A seguir são listados os artigos sobre potencial ondomotriz identificados nos arquivos da revista *Renewable Energy* entre os anos de 1993 e 2016. Cada tabela corresponde ao continente em que a área de estudo está localizado.

- África

Tabela A1 - Artigos sobre potencial ondomotriz da África

Ano	Autor	Título
2016	Sierra <i>et al.</i>	Wave energy potential along the Atlantic coast of Morocco

Fonte: Autor.

- América do Norte

Tabela A2 - Artigos sobre potencial ondomotriz da América do Norte

Ano	Autor	Título
2016	Chang <i>et al.</i>	Numerical modelling of the effects of wave energy converter characteristics on nearshore wave conditions
2016	Cornejo-Bueno <i>et al.</i>	Significant wave height and energy flux prediction for marine energy applications: A grouping genetic algorithm - Extreme Learning Machine approach
2015	Parkinson <i>et al.</i>	Integrating ocean wave at large-scales: A study of th US Pacific Northwest
2015	Reikard, Robertson e Bidlot	Combining wave energy with wind and solar: Short-term forecasting
2014	García-Medina, Özkan-Haller e Ruggiero	Wave resource assessment in Oregon and southwest Washington, USA
2014	Hiles <i>et al.</i>	Wave energy resources near Hot Springs Cove, Canada
2014	Robertson, Hiles e Buckham	Characterizing the near shore wave energy resource on the west coast of Vancouver Island, Canada
2013	Stopa <i>et al.</i>	Wave energy resource along the Hawaiian Island chain
2011	Stopa, Cheung e Chen	Assessment of wave energy resource in Hawaii
2011	Lenée-Bluhm, Paasch e Özkan-Haller	Characterizing the wave energy resource of the US Pacific Northwest
2009	Defne, Haas e Fritz	Wave power potential along the Atlantic coast of the southeastern USA

Fonte: Autor.

- América do Sul

Tabela A3 - Artigos sobre potencial ondomotriz da América do Norte

Ano	Autor	Título
2016	Mediavilla e Sepúlveda	Nearshore assessment of wave energy resource in central Chile (2009-2010)
2013	Ortega, Osorio e Agudelo	Estimation of the wave power resource in the Caribbean Sea in areas with scarce instrumentation. Case study: Isla Fuerte, Colombia

Fonte: Autor.

- Ásia

Tabela A4 - Artigos sobre potencial ondomotriz da Ásia

Ano	Autor	Título
2016	Yaakob <i>et al.</i>	Satellite-based wave data and wave energy resource assessment for South China Sea
2016	Wang <i>et al.</i>	Assessments of wave energy in the Bohai Sea, China
2016	Sannasiraj e Sundur	Assessment of wave energy potential and its harvesting approach along the Indian coast
2015	Zhou <i>et al.</i>	Temporal-spatial distribution of wave energy: A case study of Beibu Gulf, China
2015	Kumar e Anoop	Wave energy resource assessment for the Indian shelf seas
2015	Wu, Liu e Chen	Offshore wave energy resource assessment in the East China Sea
2015	Mirzaei, Tangang e Juneng	Wave energy potential assessment in the central and southern regions of the South China Sea
2014	Liang <i>et al.</i>	22-Year wave energy hindcast for the China East Adjacent Seas
2013	Aoun, Harajli e Queffeuilou	Preliminary appraisal of wave power prospects in Lebanon
2013	Chiu, Huang e Tiao	The spatial and temporal characteristics of the wave energy resources around Taiwan
2013	Liang <i>et al.</i>	Numerical modelling of the nearshore wave energy resources of Shandong peninsula, China
2012	Saket e Etemad-Shahidi	Wave energy potential along the northern coasts of the Gulf of Oman, Iran
2012	Ching-Piao <i>et al.</i>	Study on the wave climate variation to the renewable wave energy assessment
2011	Abbaspour e Rahimi	Iran Atlas of offshore renewable energies
2009	Zhang, Li e Lin	Wave energy in China: Current status and perspectives
1997	Raju e Ravindran	Wave energy: potential and programme in India
1993	Alnaser	Estimation of energy from tide, wave, and sea water currents in Bahrain

Fonte: Autor.

- Europa

Tabela A5 - Artigos sobre potencial ondomotriz da Europa (continua)

Ano	Autor	Título
2016	Emmanouil <i>et al.</i>	10-year high resolution study of wind sea waves and wave energy assessment in the Greek offshore areas
2016	Gallagher <i>et al.</i>	The nearshore wind and wave energy potential of Ireland: A high resolution assessment of availability and accessibility
2016	Hashemi, Grilli e Neill	A simplified method to estimate tidal current effects on the ocean wave power resource
2016	Rusu e Onea	Estimation of the wave energy conversion efficiency in the Atlantic Ocean close to the European islands
2015	Monteforte, Lo Re e Ferreri	Wave energy assessment in Sicily (Italy)
2015	Bento, Martinho e Guedes Soares	Numerical modelling of the wave energy in Galway Bay
2015	Guillou e Chapalain	Numerical modelling of nearshore wave energy resource in the Sea of Iroise
2015	Venugopal e Nimalidinne	Wave resource assessment for Scottish waters using a large scale North Atlantic spectral wave model

Tabela A5 – Artigos sobre potencial ondomotriz da Europa (conclusão)

Ano	Autor	Título
2014	Gonçalves, Martinho e Guedes Soares	Assessment of wave energy in the Canary Islands
2014	Gonçalves, Martinho e Guedes Soares	Wave energy conditions in the western French coast
2014	Hashemi e Neill	The role of tides in shelf-scale simulations of the wave energy resource
2014	Mota e Pinto	Wave energy potential along the western Portuguese coast
2014	Sierra, Mösso e González-Marco	Wave energy resource assessment in Menorca (Spain)
2014	Soomere e Eelsalu	On the wave energy potential along the eastern Baltic Sea coast
2013	Barbariol <i>et al.</i>	Improving the assessment of wave energy resources by means of coupled wave-ocean numerical modeling
2013	Nieuwkoop <i>et al.</i>	Wave resource assessment along the Cornish coast (UK) from a 23-year hindcast dataset against buoy measurements
2013	Sierra <i>et al.</i>	Wave energy assessment in Lanzarote (Spain)
2013	Smith, Haverson e Smith	A wave energy resource assessment case study: Review, analysis and lessons learnt
2013	Vicinanza, Contestabile e Ferrante	Wave energy potential in the north-west of Sardinia (Italy)
2012	Dalton, Alcorn e Lewis	A 10 yer installation program for wave energy in Ireland: A case study sensitivity analysis on financial returns
2012	Rusu e Guedes Soares	Wave energy assessments in the Azores islands
2012	Mendes, Calado e Mariano	Wave energy potential in Portugal - Assessment based on probabilistic description of ocean waves parameters
2011	Reeve <i>et al.</i>	An investigation of the impacts of climate change on wave energy generation: The Wave Hub, Cornwaal, UK
2011	Iglesias e Carballo	Wave resource in El Hierro - an island towards energy self-sufficiency
2011	Saulnier, Prevosto e Maisondieu	Refinements of sea state statistics for marine renewables: A case study from simultaneous buoy measurements in Portugal
2010	Iglesias e Carballo	Wave energy and nearshore hot spots: The case of the SE Bay of Biscay
2010	Iglesias e Carballo	Wave energy resource in the Estaca de Bares area (Spain)
2009	Rusu e Guedes Soares	Numerical modelling to estimate the spatial distribution of the wave energy in the Portuguese nearshore
2009	Iglesias <i>et al.</i>	Wave energy potential in Galicia (NW Spain)
2009	Folley e Whittaker	Analysis of the nearshore wave energy resource
2009	Waters <i>et al.</i>	Wave climate off the Swedish west coast
2007	Henfridsson <i>et al.</i>	Wave energy potential in the Baltic Sea and the Danish part of the North Sea, with reflections on the Skagerrak
2006	Babarit <i>et al.</i>	Simulation of electricity supply of an Atlantic island by offshore wind turbines and wave energy converters associated with a medium scale local energy storage
2006	Bernhoff, Sjöstedt e Leijon	Wave energy resources in seltered sea areas: A case study of the Baltic Sea

Fonte: Autor.

- Oceania

Tabela A6 - Artigos sobre potencial ondomotriz da Oceania

Ano	Autor	Título
2016	Hemer <i>et al.</i>	A revised assessment of Australia's national wave energy resource
2012	Behrens <i>et al.</i>	Assessing the wave energy converter potential for Australian coastal regions
2010	Hughes e Heap	National-scale wave energy resource assessment for Australia

Fonte: Autor.

- Outros

Tabela A7 - Artigos sobre potencial ondomotriz de outros locais

Ano	Autor	Título
2015	Arena <i>et al.</i>	Wave climate analysis for the design of wave energy harvesters in the Mediterranean Sea
2014	Zodiatis <i>et al.</i>	Wave energy potential in the Eastern Mediterranean Levantine Basin. An integrated 10-year study
2013	Portilla, Sosa e Cavaleri	Wave energy resources: Wave climate and exploitation
2012	Gunn e Stock-Williams	Quantifying the global wave power resource
2012	Arinaga e Cheung	Atlas of global wave energy from 10 years of reanalysis and hindcast data

Fonte: Autor.

APÊNDICE B – TUTORIAL DE MAPEAMENTO NO SAGA®

Para o mapeamento diversas ferramentas computacionais foram utilizadas, dentre elas: MATLAB®, CDO, Notepad++ e SAGA. A seguir é descrito o procedimento utilizado para a realização do mapeamento.

A primeira etapa para o mapeamento é a obtenção dos dados. Foram utilizados os dados de reanálise do projeto ERA-Interim, obtidos junto à agência AVISO⁺ no formato *.grib, sendo quatro arquivos dos valores de média a cada seis horas para cada um dos parâmetros utilizados (H_s , T_e e Dir).

Em seguida, utilizando a ferramenta CDO, com o auxílio do Matlab® para automatizar o processo, cada um dos quatro arquivos de dados (00h, 06h, 12h e 18h) das três variáveis utilizadas forma unidos em um único arquivo através do comando *copy* do CDO.

A etapa seguinte foi o cálculo da potência da onda, a partir da Equação 26, e a divisão dos arquivos resultantes da união em outros quatro, com dados trimestrais para fornecer informações sazonais, através do comando *selmon*. Os quatro arquivos são divididos da seguinte forma: Dezembro-Janeiro-Fevereiro (DJF); Março-Abril-Maio (MAM); Junho-Julho-Agosto (JJA); e Setembro-Outubro-Novembro (SON).

Após isso, foram calculados os parâmetros estatísticos média, mínimo, máximo, 95 percentil e desvio padrão utilizando, respectivamente, os comandos *timmean*, *timmin*, *timmax*, *timpcl,95* e *timstd*.

Por fim, ainda utilizando o CDO, os arquivos na extensão *.grib são convertidos para *.txt através do comando *outputtab*. A Figura B1 sintetizada, a título de exemplo, o fluxograma da metodologia aplicada aos dados de período médio. Para as outras bases de dados e para os diversos parâmetros estatísticos analisados, o procedimento foi semelhante.

Figura B1 - Metodologia de processamento no CDO



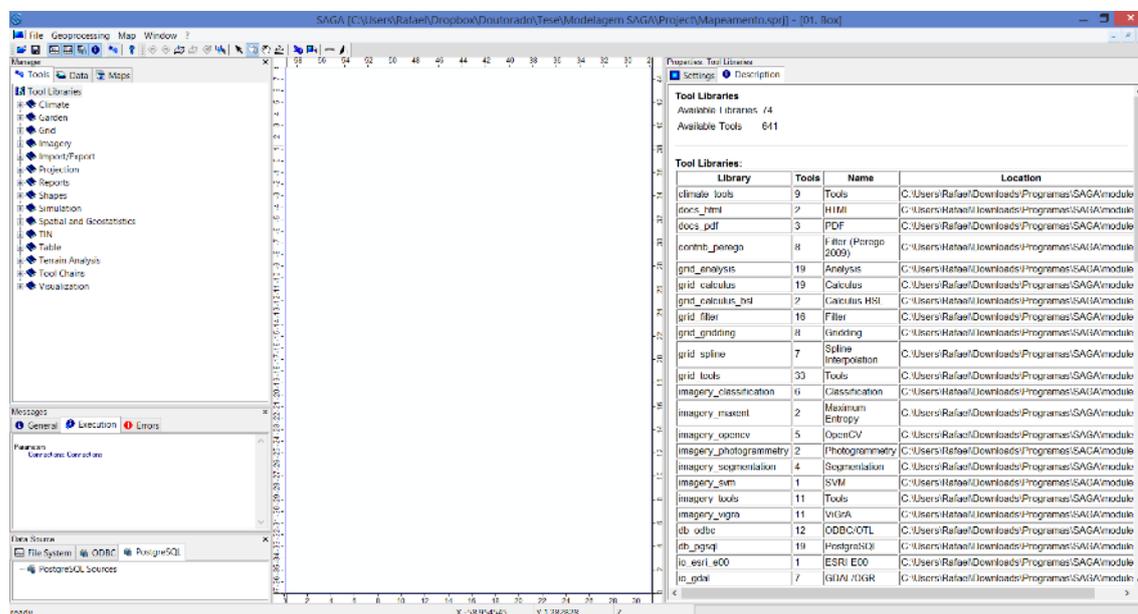
Fonte: Autor.

Após o processamento dos dados no CDO, cada um dos arquivos *.txt, com dados anuais e sazonais, foram utilizados junto ao software SAGA para a produção dos mapas. Porém, antes os dados no formato *.txt foram formatados em um programa de edição de texto para que

cada coluna esteja tabulada. Além disso é acrescentado um cabeçalho com o tipo de dado de cada coluna e os valores de exclusão são corrigidos para -99999. O valor -99999 foi escolhido por ser um valor utilizado pelo software SAGA para esse fim.

A tela inicial do software SAGA está apresentada na Figura B2. Na região superior esquerda da tela, têm-se a aba *Tools*, onde estão todas as funções disponíveis no programa, a aba *Data*, onde os arquivos abertos no programa ficam listados, e a aba *Maps* onde são listados os mapas criados. Na região central são mostrados os mapas. Na região direita da tela constam informações e opções de apresentação sobre o item selecionado, seja ele uma função, um dado, ou um mapa.

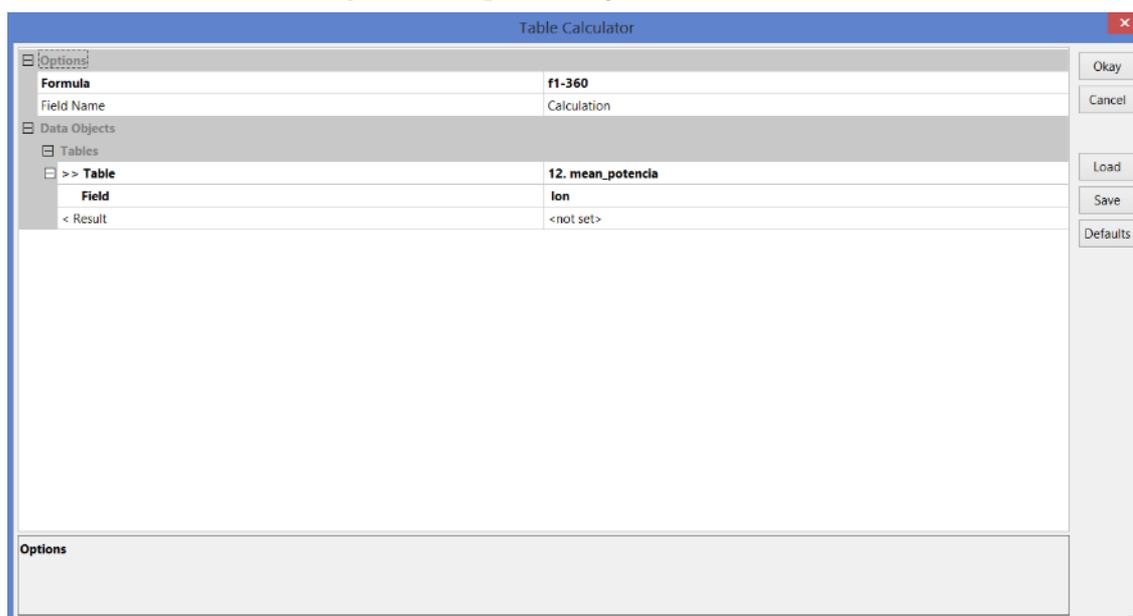
Figura B2 - Tela inicial do software SAGA



Fonte: Autor.

Os dados formatados são inseridos no SAGA como tabela. Como os dados de longitude obtidos no Era-Interim estão no padrão $0^{\circ}...360^{\circ}$ é realizada a conversão para o sistema $-180^{\circ}...180^{\circ}$. Essa conversão é realizada através do comando *Tool Libraries*→*Table*→*Calculus*→*Table Calculator*. A Figura B3 apresenta o input desta função. Nela é utilizada a equação $f1-360$ no campo *Formula* para realizar a conversão. A tabela é selecionada no campo *Table* e o campo a ser utilizado no lugar de $f1$ na fórmula é selecionado em *Field*. A coluna escolhida deve ser a das longitudes. O campo *Field Name* pode ser deixado como está, e o campo *Result* pode ser deixado como $\langle not\ set \rangle$.

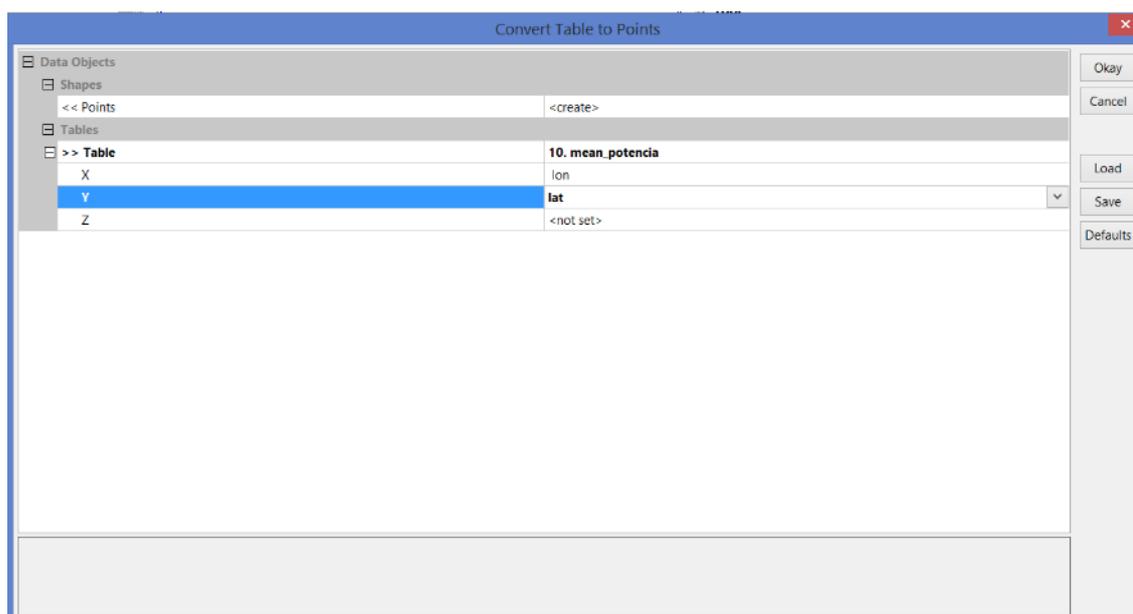
Figura B3 - Input da função *Table Calculator*



Fonte: Autor.

Em seguida a tabela georreferenciada é convertida em pontos através do comando *Tool Libraries*→*Shapes*→*Points*→*Convert Table to Points*. Ao selecionar essa opção, uma tela para input dos dados é aberta, conforme ilustra a Figura B4. Nela a opção *Points* é mantida como *<create>* para que um novo arquivo seja criado. Na opção *Table* é selecionada a tabela que será convertida, e nas opções *X* e *Y* são selecionadas as colunas da tabela que contenham, respectivamente, a longitude e a latitude dos pontos. A opção *Z* foi deixada desmarcada (*<not set>*).

Figura B4 - Input da função *Convert Table to Points*



Fonte: Autor.

Em seguida, uma grade com as mesmas dimensões da grade dos dados é construída utilizando o comando *Tool Libraries*→*Grid*→*Tools*→*Create Grid System*. Essa grade só precisará ser construída uma vez, e poderá ser utilizada em todos os mapeamentos seguintes. O input da função é apresentado na Figura B5.

Figura B5 - Input da função *Create Grid System*

Options	
Set extent by	
xMin	-59
yMin	-37
xMax	100
yMax	100
NX	31
NY	45
Cellsize	1
Adjust	Extent to CellSize
Use Offset	
<input checked="" type="checkbox"/> Use Offset	
X offset	0.5
Y offset	0.5
Initialization Value	1
Data Objects	
Shapes	
> Shape(s)	No objects
Grids	
> Grid(s)	No objects
Use Offset	
Boolean	
Apply offset?	

Fonte: Autor.

No *input* da função *Create Grid System*, a opção *Set extent by* é deixada como *xMin*, *yMin*, *NX*, *NY*. Dessa forma, a grade será criada a partir das coordenadas do ponto de menor valor (*xMin* e *yMin*), no caso, o vértice inferior esquerdo da grade, e pelo número de células na horizontal, *NX*, e na vertical, *NY*. O tamanho da célula é definido no campo *Cellsize*. Como os dados do ERA-Interim foram obtidos com resolução 1°x1°, o valor utilizado foi 1. Além disso, foi marcada a opção *Use Offset* para que os dados representem o centro da célula. Como o valor da célula escolhido foi 1, o valor de offset foi a metade, ou seja, 0,5, tanto na horizontal, *X offset*, quanto na vertical, *Y offset*.

Em seguida, utilizando a grade criada, os pontos criados na conversão da tabela dos dados são mapeados a partir de uma interpolação espacial. Dentre as opções disponíveis no software, foi escolhida a ponderada com o inverso da distância. O comando utilizado é o *Tool Libraries*→*Grid*→*Gridding*→*Inverse Distance Weighted*. O input de dados dela é apresentado na Figura B6.

No campo *Points* deve ser selecionado os pontos que se deseja interpolar. Já no campo *Attribute* o parâmetro que se deseja mapear é selecionado. Em *Target Grid System* é marcada a opção *grid or grid system*, e a grade criada anteriormente é selecionada no campo *Grid System*.

No campo *Target Grid* é mantido *<create>* para que uma nova grade com os dados mapeados seja criada. Em *Search Range* é selecionada a opção local, com *Maximum Search Distance* marcado como 2. Em *Number of Points* é selecionada a opção *all points within search distance*. O valor de *Minimum* é mantido como 1. Os demais campos relativos a interpolação são deixados como está na Figura B6.

Figura B6 - Input da função *Inverse Distance Weighted*

Section	Field	Value
Data Objects	>> Points	12. mean_potencia
	Attribute	media_anual
Options	Target Grid System	grid or grid system
	Grid System	1; 31x 45y; -58.5x -36.5y
	<< Target Grid	<create>
	Search Options	
Search Options	Search Range	local
	Maximum Search Distance	2
	Number of Points	all points within search distance
	Minimum	1
Distance Weighting	Weighting Function	inverse distance to a power
	Inverse Distance Weighting Power	2
	Inverse Distance Offset	<input type="checkbox"/>
	Data Objects	

Fonte: Autor.

Durante o processo de interpolação, as células vizinhas à alguns pontos sem dados acabam recebendo valores. Esses dados são excluídos através do comando *Tool Libraries*→*Grid*→*Calculus*→*Grid Calculator*. O input desse comando é apresentado na Figura B7.

Na opção *Grid system*, novamente é selecionado a grade criada anteriormente. Na opção *Grids* deve-se selecionar uma grade que vai servir de máscara e a grid que se deseja corrigir. Para o caso desse trabalho, foi criada uma grade contendo informações da batimetria região, utilizando dados do GEBCO. A ordem da escolha dos grids é importante na opção *Formula*. Assim, deve-se primeiro escolher a máscara e depois as grades com dados. Na opção *Formula*, a equação a ser utilizada é $g2/lt(g1,0)$, onde $g1$ é a primeira grade selecionada na opção *Grids*, ou seja, a máscara, e $g2$ é a grade de dados. Caso sejam selecionadas outras grades de dados, é só variar o valor de $g2$ para $g3$, $g4$, etc. Em *Name* coloca-se o nome da nova grade que será criada e seleciona-se a opção *Use NoData*.

Figura B7 - Input da função *Grid Calculator***Fonte: Autor.**

APÊNDICE C – MATRIZ DE POTÊNCIA DOS WEC UTILIZADOS

A seguir, são apresentadas as matrizes de potência dos 12 WEC utilizados neste trabalho.

- **Pelamis**

Tabela C1 - Matriz de potência do WEC Pelamis

<i>Pot</i> (kW)	<i>T_c</i> (s)																
<i>H_s</i> (m)	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13
1,0		22	29	34	37	38	38	37	35	32	29	26	23	21			
1,5	32	50	65	76	8	86	86	83	78	72	65	59	53	47	42	37	33
2,0	57	88	115	136	148	153	152	147	138	127	116	104	93	83	74	66	59
2,5	89	138	180	212	231	238	238	230	216	199	181	163	146	130	116	103	92
3,0	129	198	260	305	332	340	332	315	292	266	240	219	210	188	167	149	132
3,5		270	354	415	438	440	424	404	377	362	326	292	260	230	215	202	180
4,0			462	502	540	546	530	499	475	429	384	366	339	301	267	237	213
4,5			544	635	642	648	628	590	562	528	473	432	382	356	338	300	266
5,0				739	726	731	707	687	670	607	557	521	472	417	369	348	328
5,5				750	750	750	750	750	737	667	658	586	530	496	446	395	355
6,0					750	750	750	750	750	750	711	633	619	558	512	470	415
6,5					750	750	750	750	750	750	750	743	658	621	579	512	481
7,0						750	750	750	750	750	750	750	750	676	613	584	525
7,5							750	750	750	750	750	750	750	750	686	622	593
8,0								750	750	750	750	750	750	750	750	690	625

Fonte: Adaptado de Silva, Rusu e Guedes Soares (2013, p. 1361).

- **AquaBuoy**

Tabela C2 - Matriz de potência do WEC AquaBuoy

<i>Pot</i> (kW)	<i>T_p</i> (s)											
<i>H_s</i> (m)	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1,0			8	11	12	11	10	8	7			
1,5		13	17	25	27	26	23	19	15	12	12	7
2,0		24	30	44	49	47	41	34	28	23	23	12
2,5		37	47	69	77	73	64	54	43	36	36	19
3,0		54	68	99	111	106	92	77	63	51	51	27
3,5			93	135	152	144	126	105	86	70	70	38
4,0				122	176	198	188	164	137	112	91	49
4,5				223	250	239	208	173	142	115	115	62
5,0				250	250	250	250	214	175	142	142	77
5,5				250	250	250	250	250	211	172	172	92

Fonte: Adaptado de Silva, Rusu e Guedes Soares (2013, p. 1360).

- Wave Dragon

Tabela C3 - Matriz de potência do Wave Dragon

<i>Pot</i> (kW)	<i>T_p</i> (s)												
<i>H_s</i> (m)	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	160	250	360	360	360	360	360	360	320	280	250	220	180
2	640	700	840	900	1190	1190	1190	1190	1070	950	830	710	590
3		1450	1610	1750	2000	2620	2620	2620	2360	2100	1840	1570	1310
4			2840	3220	3710	4200	5320	5320	4430	3930	3440	2950	2460
5				4610	5320	6020	7000	7000	6790	6090	5250	3950	3300
6					6720	7000	7000	7000	7000	7000	6860	5110	4200
7						7000	7000	7000	7000	7000	7000	6650	5740

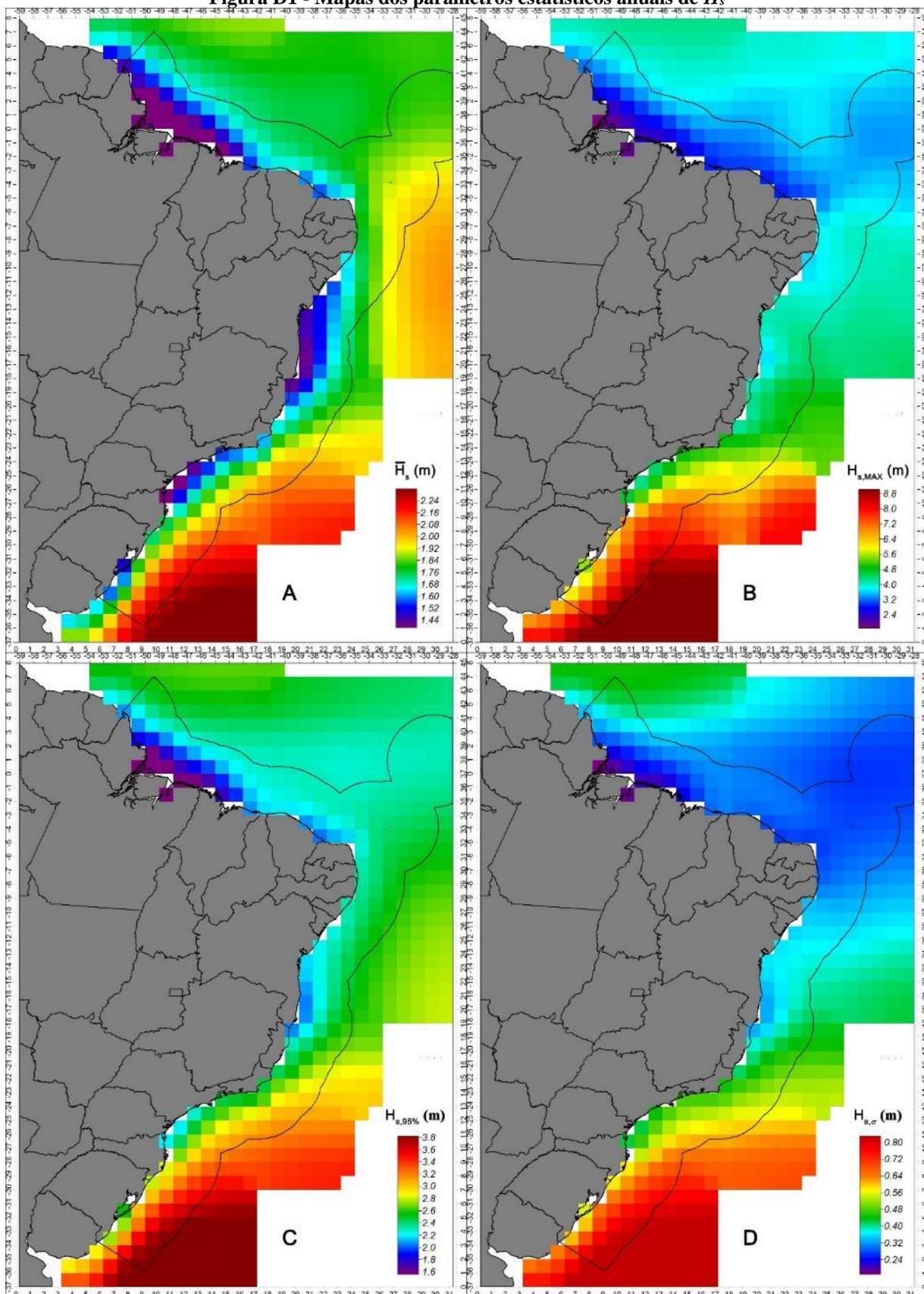
Fonte: Adaptado de Silva, Rusu e Guedes Soares (2013, p. 1361).

APÊNDICE D - ATLAS DO RECURSO ONDOMOTRIZ

Nesta sessão são apresentados os seguintes mapas:

- Mapa da média anual de H_s (Figura D1);
- Mapa do máximo anual de H_s (Figura D1);
- Mapa do 95 percentil anual de H_s (Figura D1);
- Mapa do desvio padrão anual de H_s (Figura D1);
- Mapa da média anual de T_e (Figura D2);
- Mapa do máximo anual de T_e (Figura D2);
- Mapa do 95 percentil anual de T_e (Figura D2);
- Mapa do desvio padrão anual de T_e (Figura D2);
- Mapa da média anual da potência ondomotriz (Figura D3);
- Mapa do máximo anual da potência ondomotriz (Figura D3);
- Mapa do 95 percentil anual da potência ondomotriz (Figura D3);
- Mapa do desvio padrão anual da potência ondomotriz (Figura D3);
- Mapa da média sazonal de H_s (Figura D4);
- Mapa da média sazonal de T_e (Figura D5);
- Mapa da média sazonal da potência ondomotriz (Figura D6).

Figura D1 - Mapas dos parâmetros estatísticos anuais de H_s



(a) Máximo de H_s , (b) mínimo de H_s , (c) 95 percentil de H_s , e (d) desvio padrão de H_s . A linha contínua indica o limite da ZEE. Fonte: Autor.

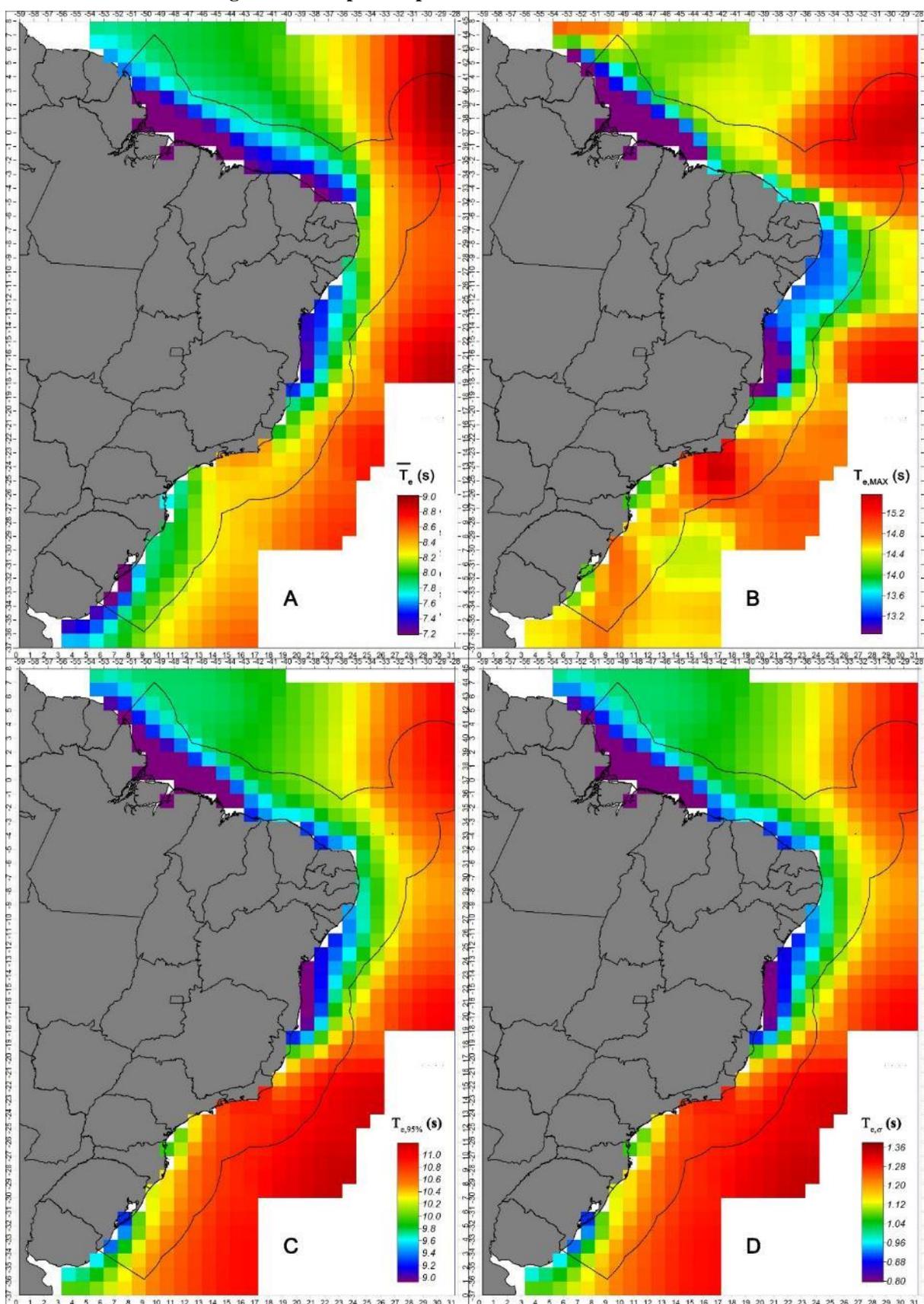
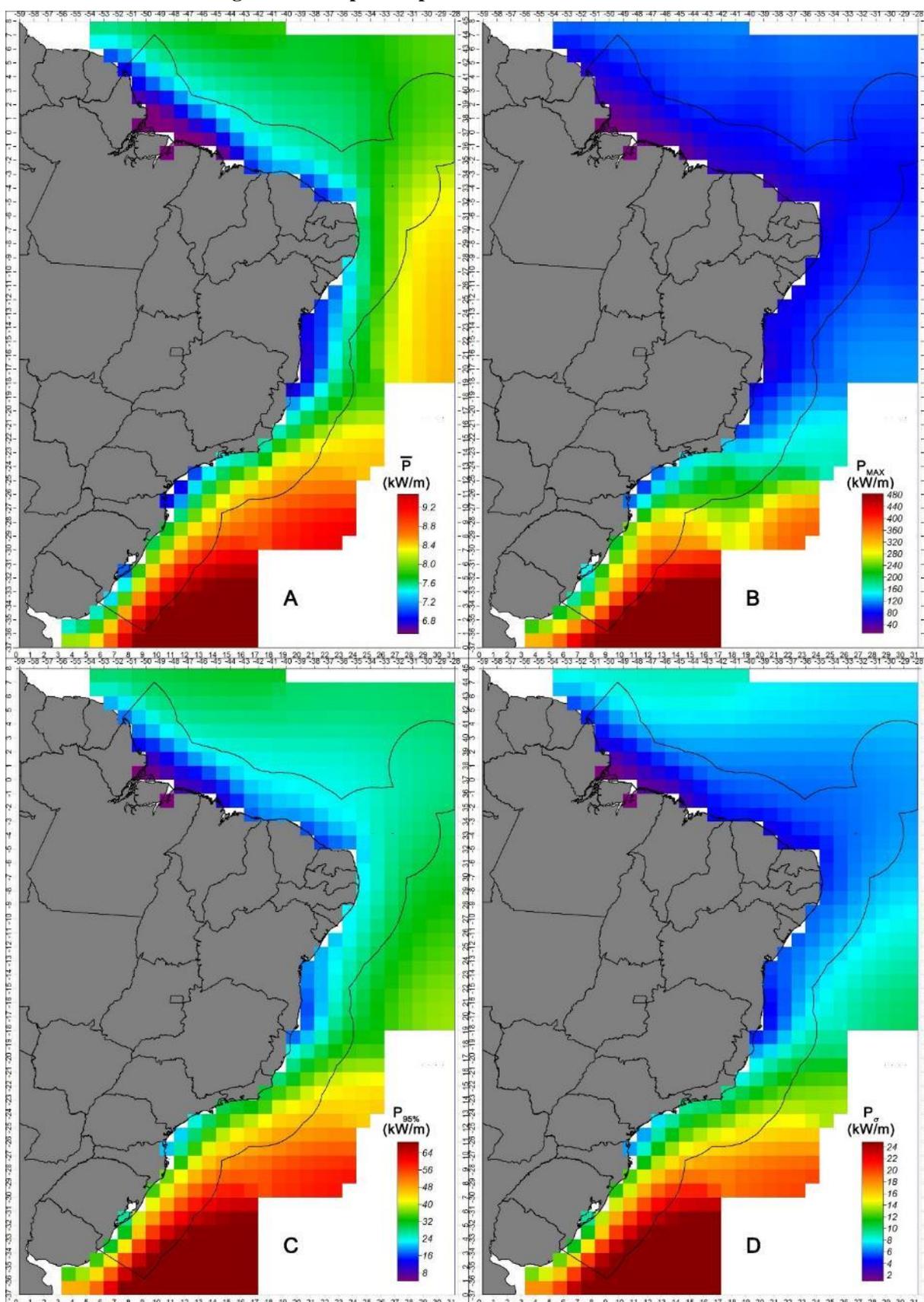
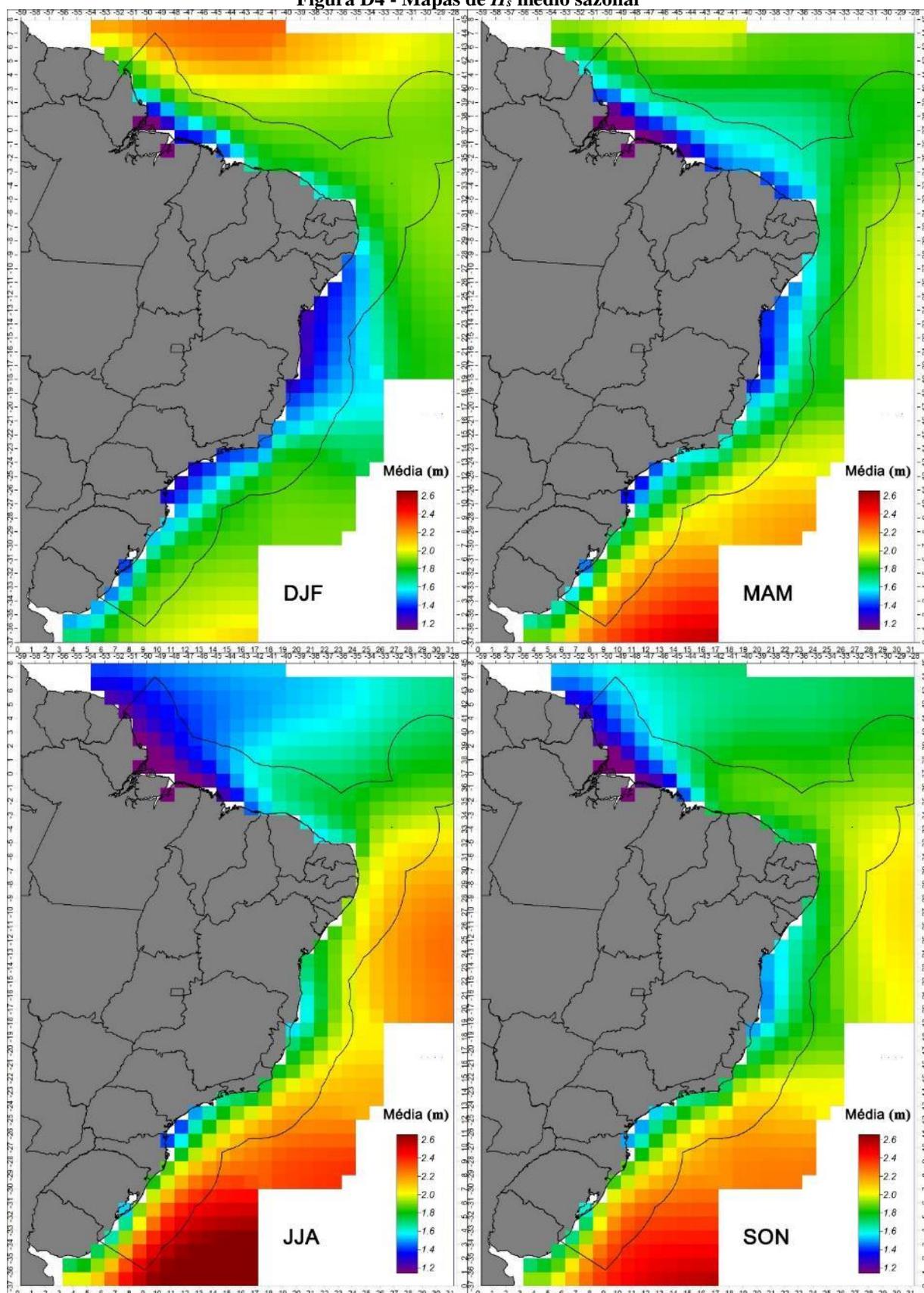
Figura D2 - Mapas dos parâmetros estatísticos anuais de T_e (a) $T_{e,MAX}$, (b) $T_{e,MIN}$, (c) $T_{e,95\%}$, e (d) $T_{e,\sigma}$ A linha contínua indica o limite da ZEE. Fonte: Autor.

Figura D3 - Mapas dos parâmetros estatísticos anuais de P



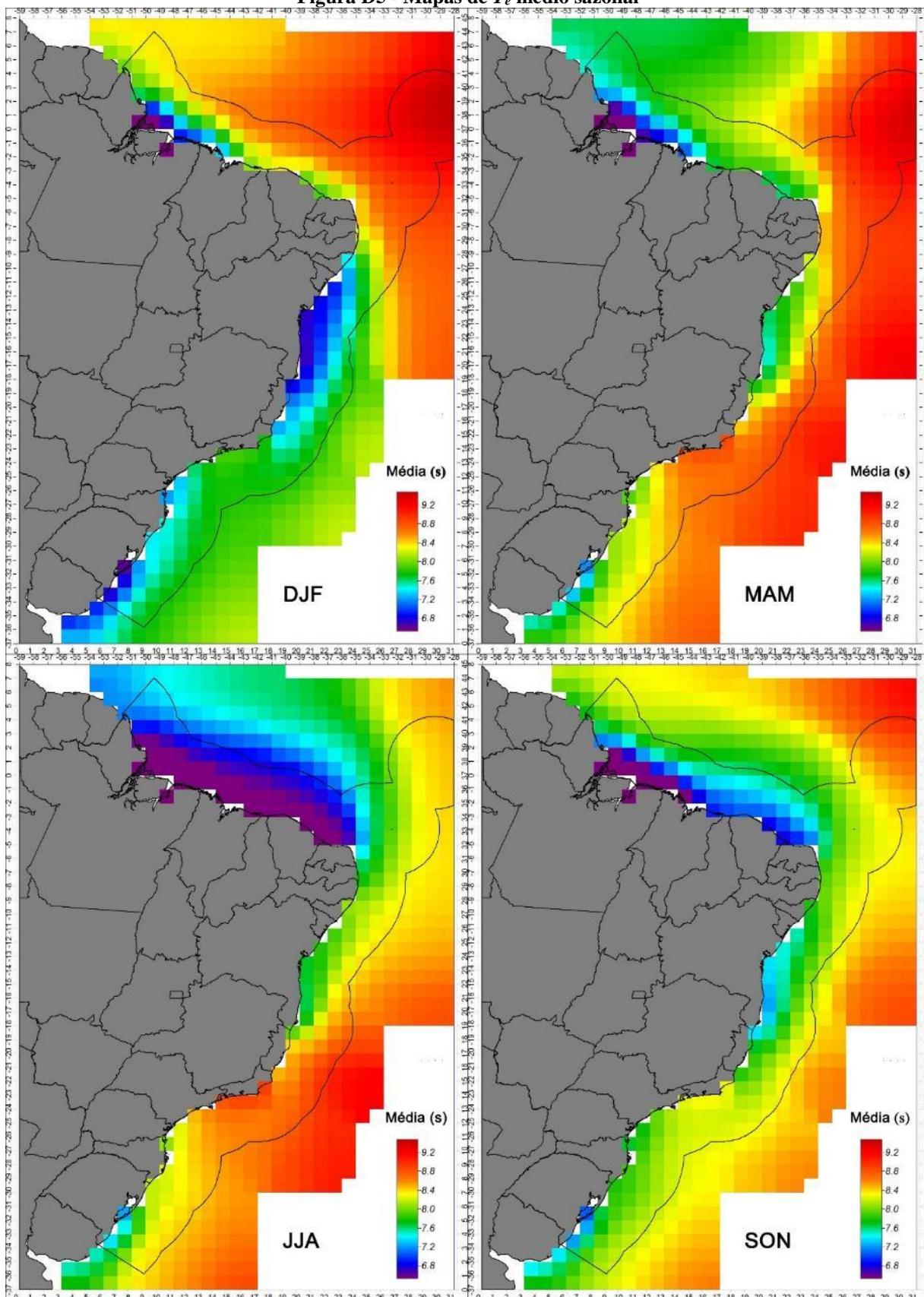
A linha contínua indica o limite da ZEE. Fonte: Autor.

Figura D4 - Mapas de H_s médio sazonal



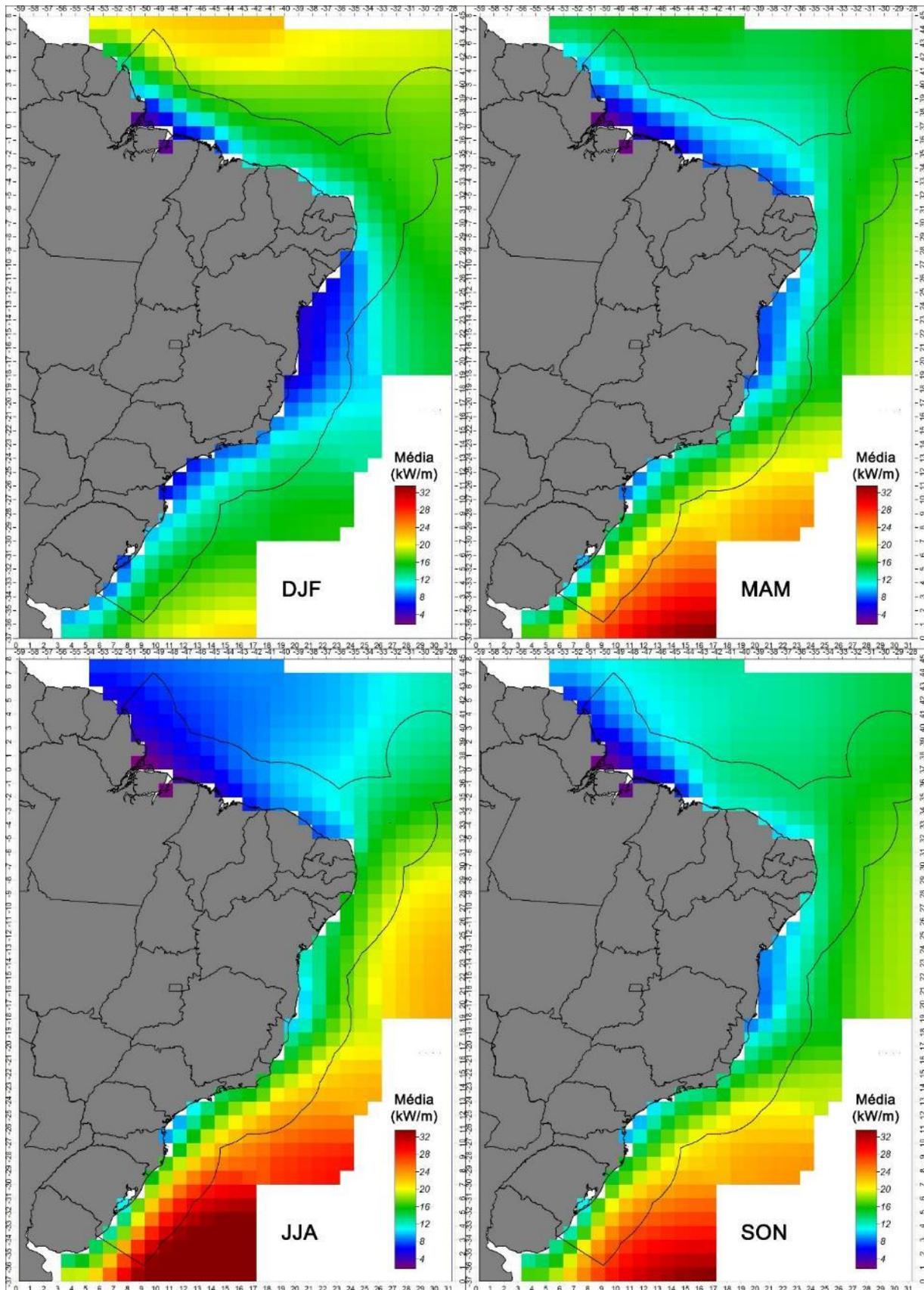
Média de H_s nos trimestres DJF, MAM, JJA e SON. A linha contínua indica o limite da ZEE. Fonte: Autor.

Figura D5 - Mapas de T_e médio sazonal



T_e médio nos trimestres DJF, MAM, JJA e SON. A linha contínua indica o limite da ZEE. Fonte: Autor.

Figura D6 - Mapas de P médio sazonal



A linha contínua indica o limite da ZEE. Fonte: Autor.

APÊNDICE E - ATLAS DO DESEMPENHO DOS WEC

Nesta sessão são apresentados os seguintes mapas:

- Mapa da potência elétrica média do Pelamis (Figura E1);
- Mapa da potência elétrica média do AquaBuoy (Figura E2);
- Mapa da potência elétrica média do Wave Dragon (Figura E3);
- Mapa da produção elétrica anual do Pelamis (Figura E4);
- Mapa da produção elétrica anual do AquaBuoy (Figura E5);
- Mapa da produção elétrica anual do Wave Dragon (Figura E6);
- Mapa do fator de capacidade do Pelamis (Figura E7);
- Mapa do fator de capacidade do AquaBuoy (Figura E8);
- Mapa do fator de capacidade do Wave Dragon (Figura E9);

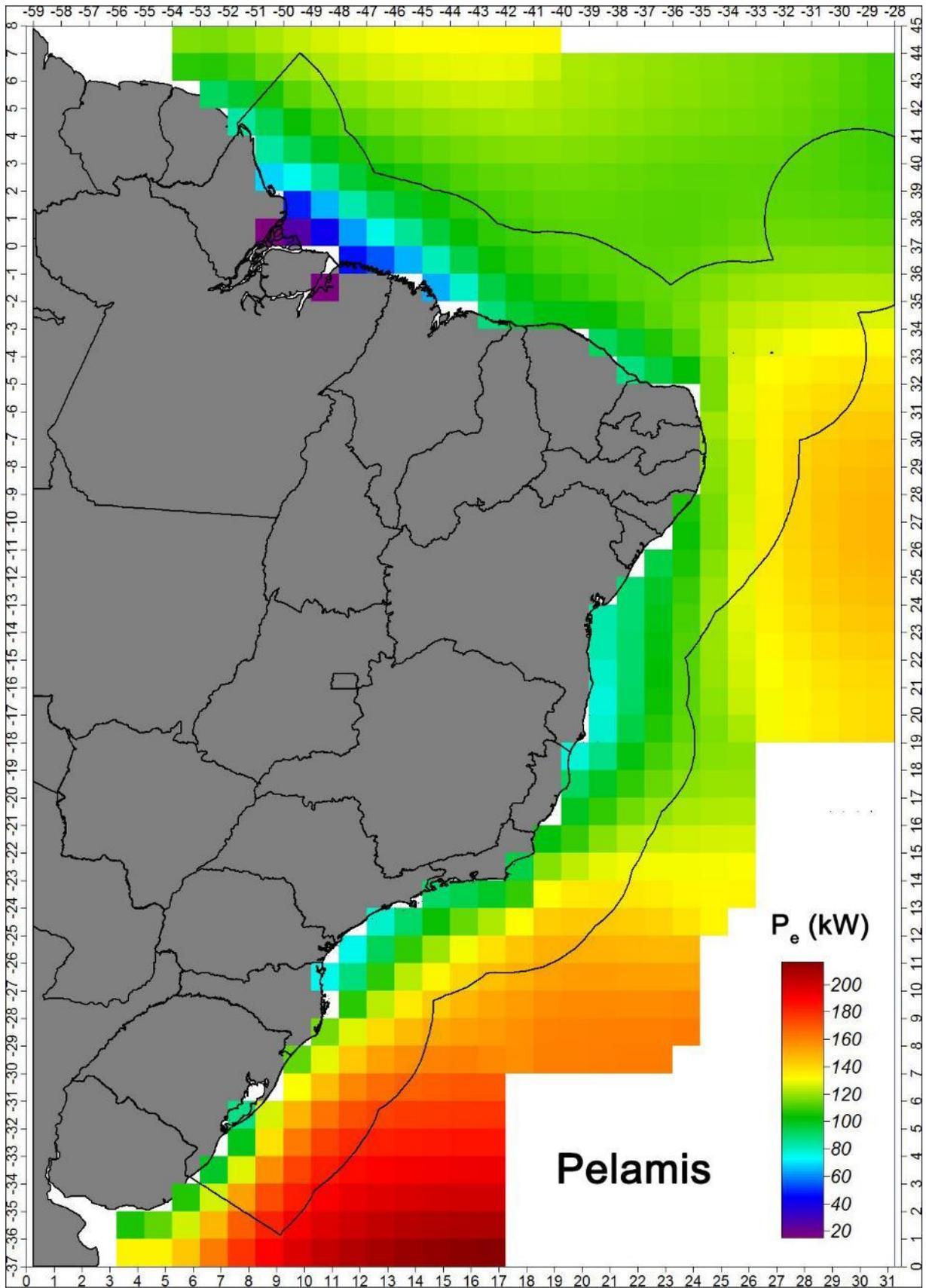
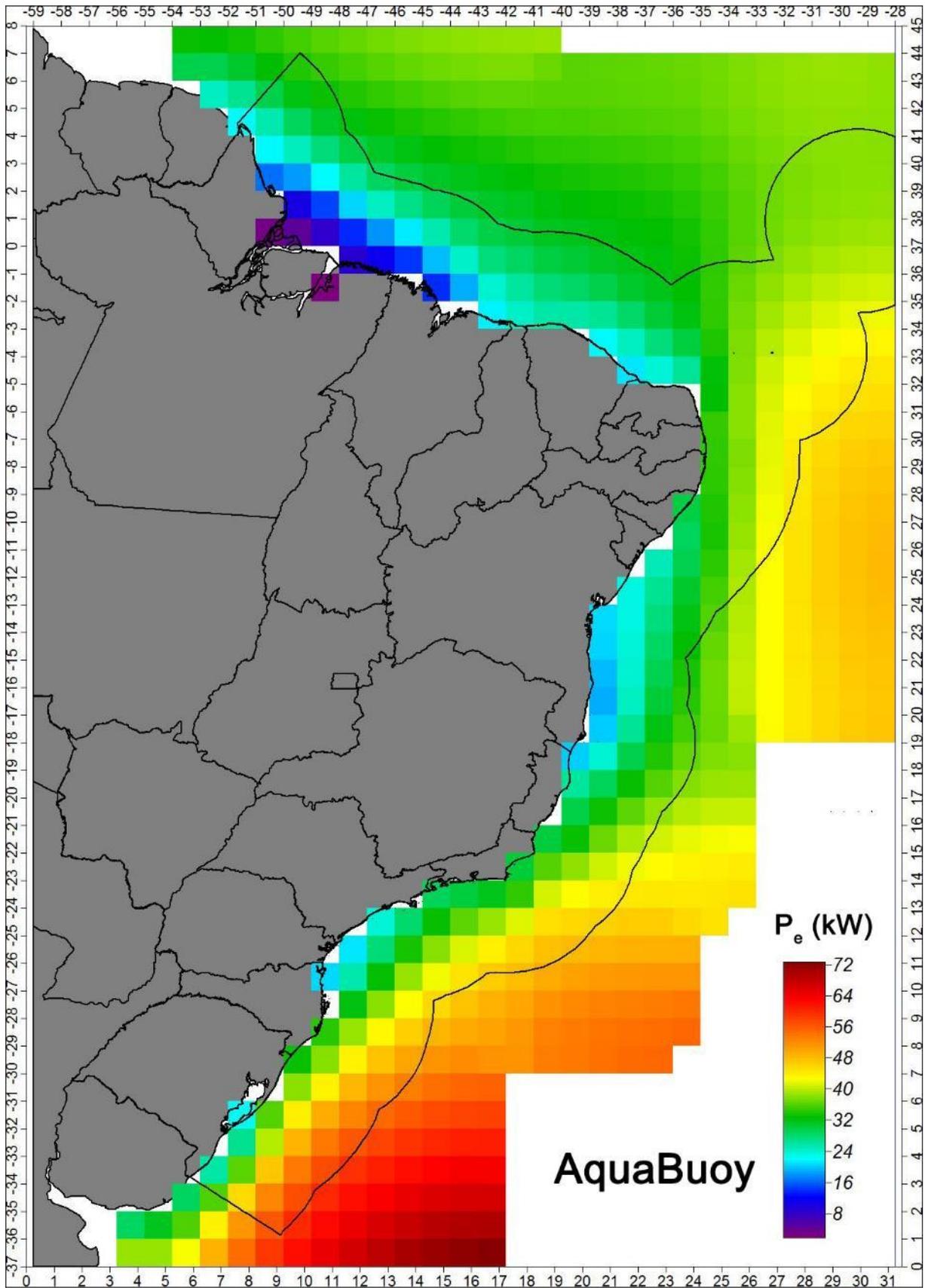
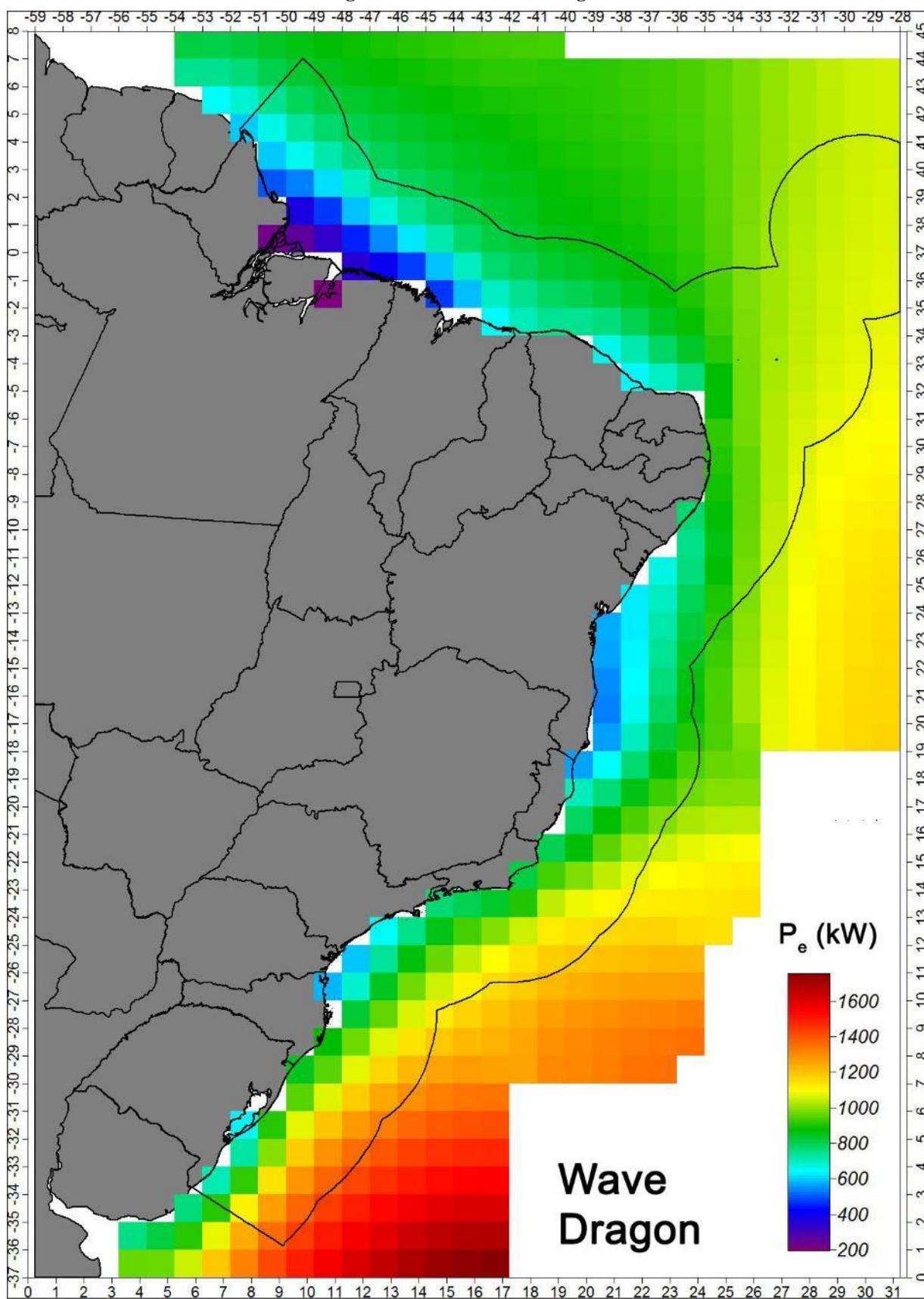
Figura E1 – P_E do Pelamis

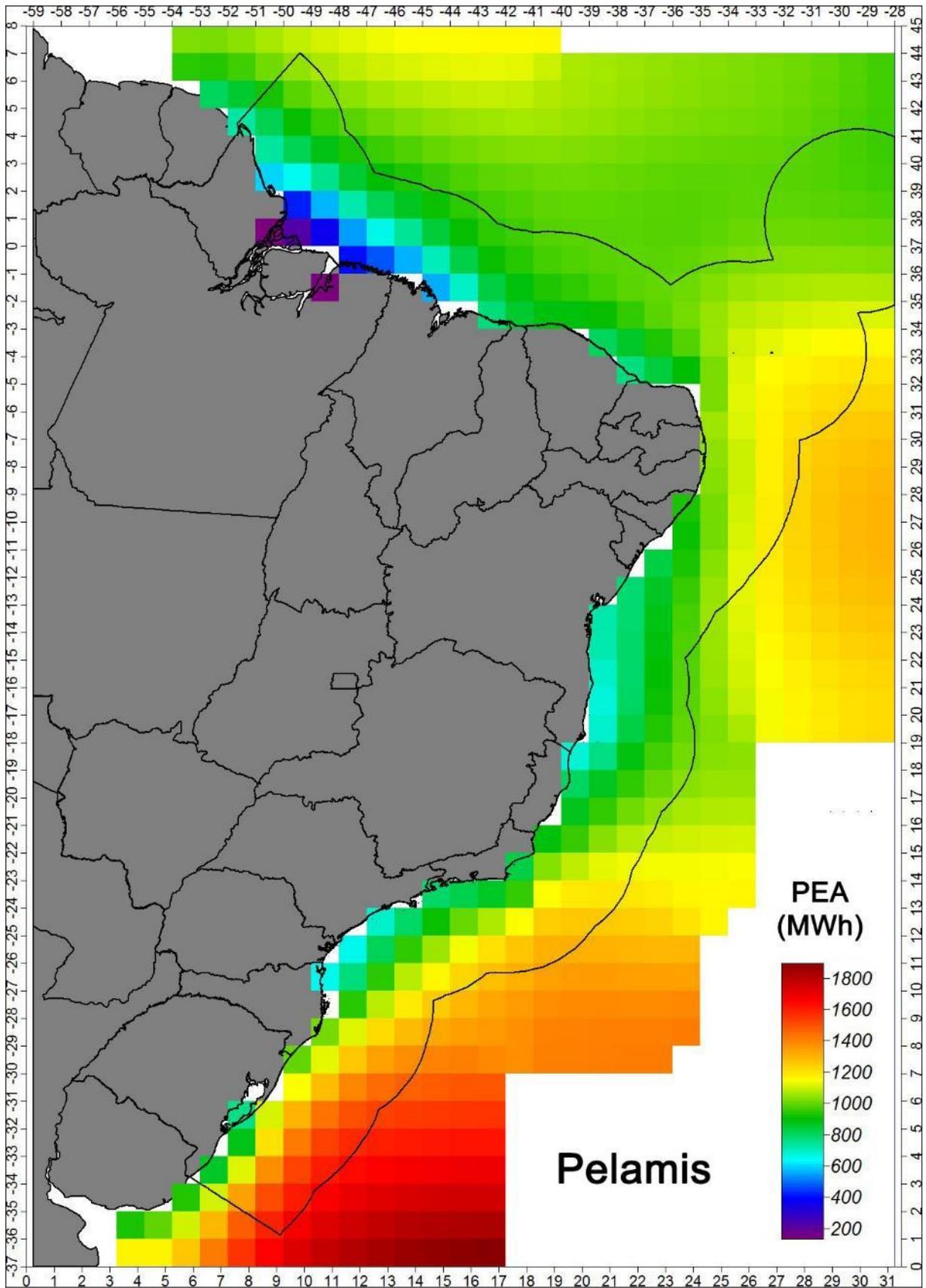
Figura E2 – P_E do AquaBuoy

A linha contínua indica o limite da ZEE. Fonte: Autor.

Figura E3 – P_E do Wave Dragon

A linha contínua indica o limite da ZEE. Fonte: Autor.

Figura E4 - PEA do Pelamis



A linha contínua indica o limite da ZEE. Fonte: Autor.

Figura E5 - PEA do AquaBuoy

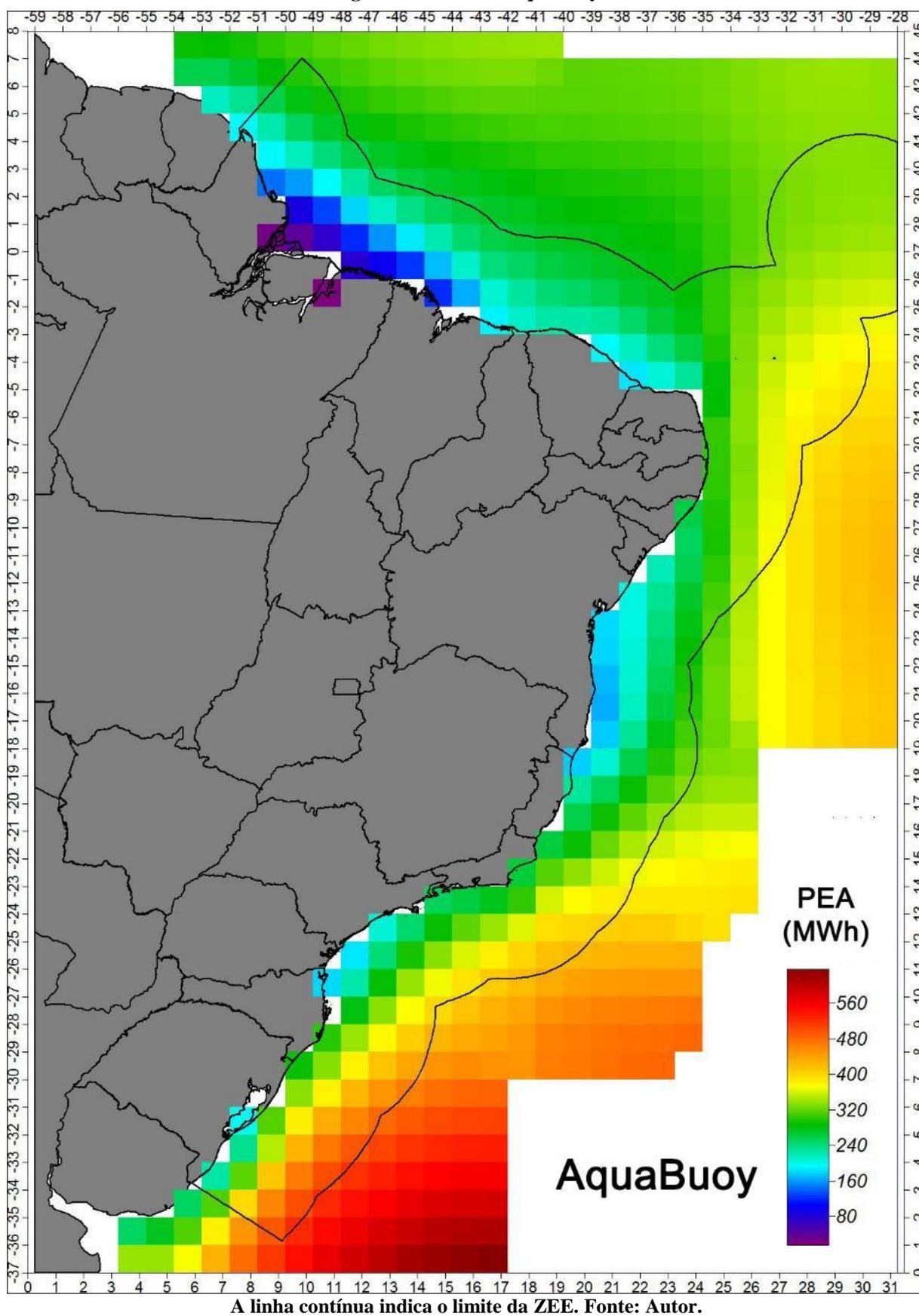


Figura E6 - PEA do Wave Dragon

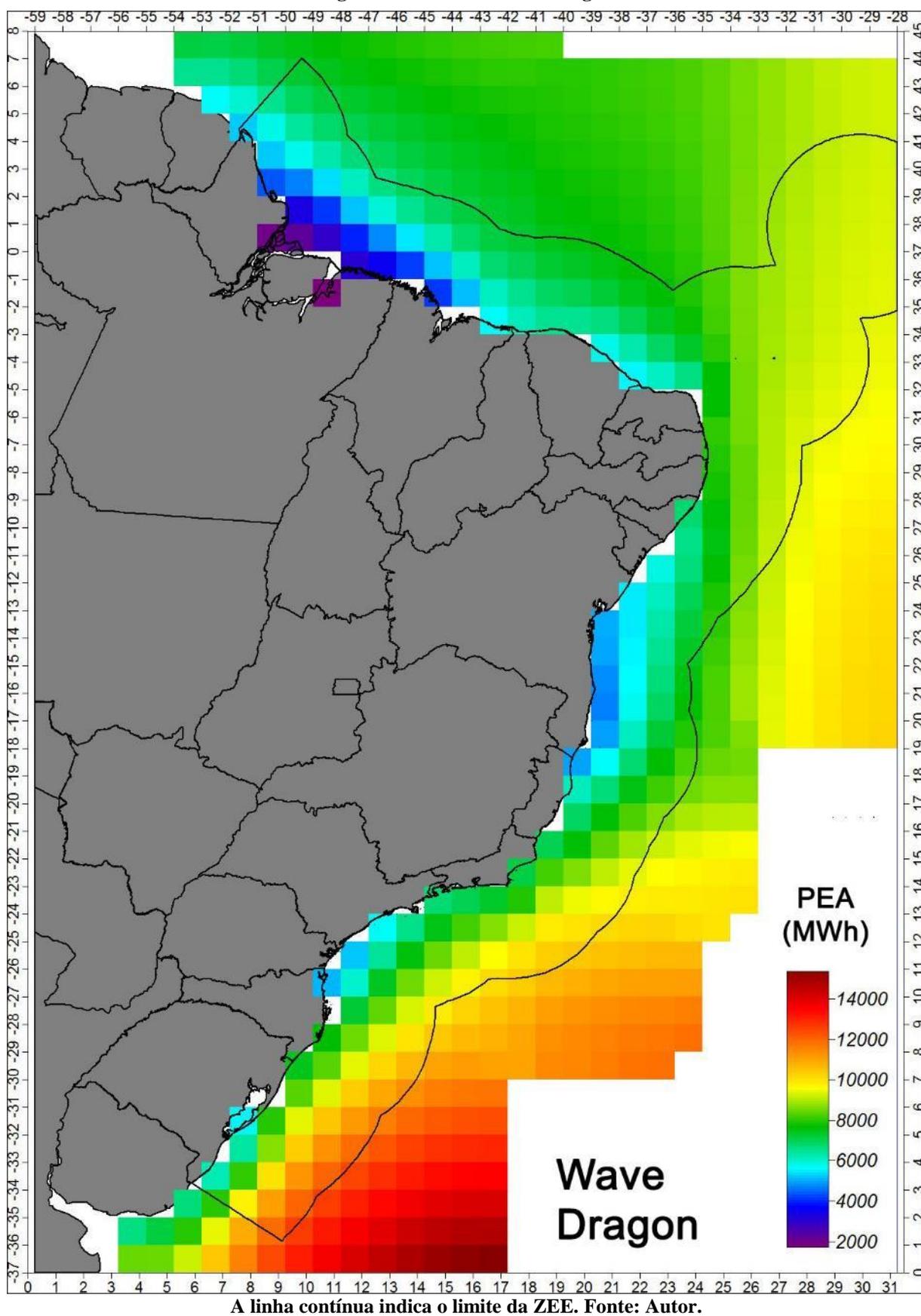


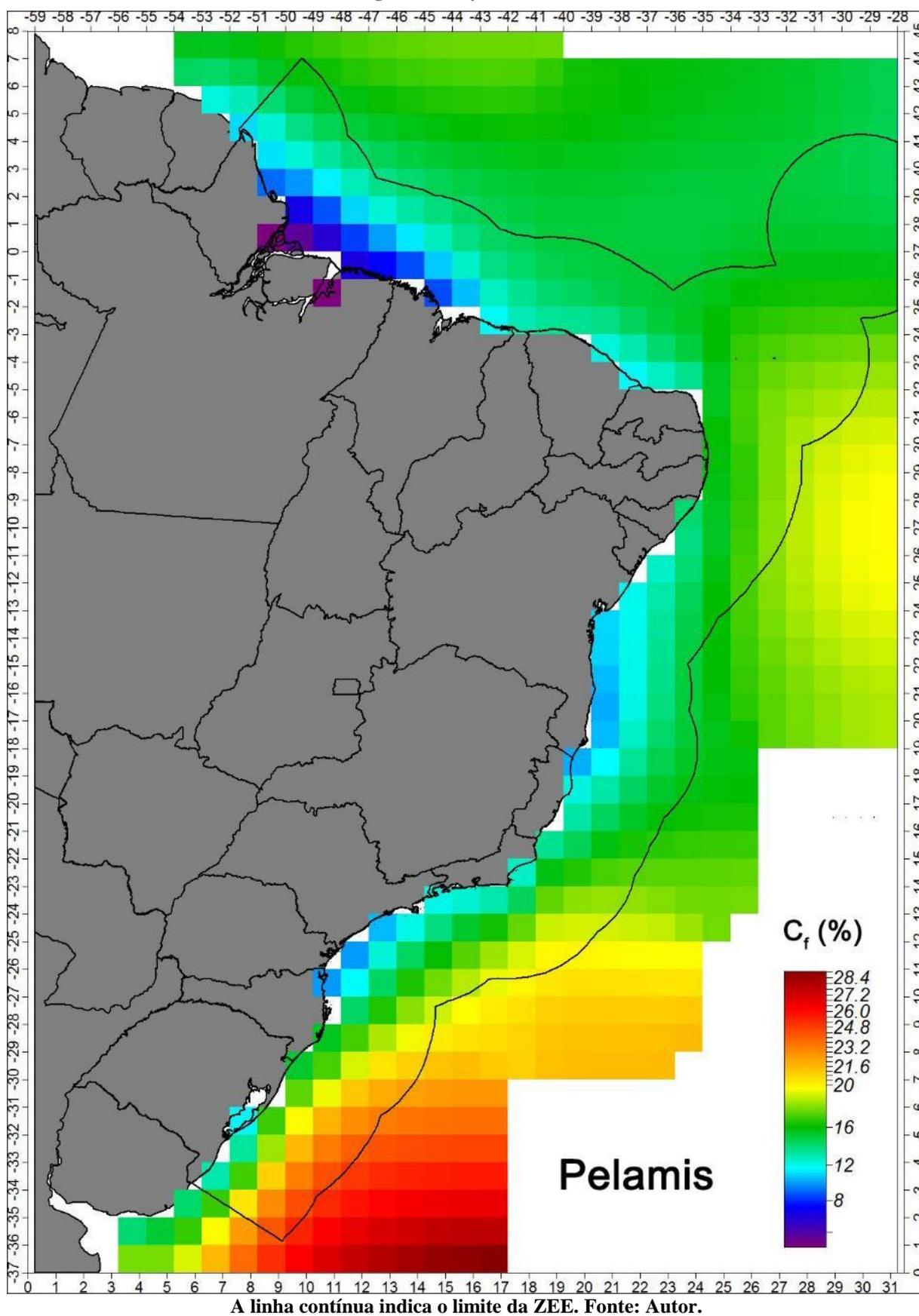
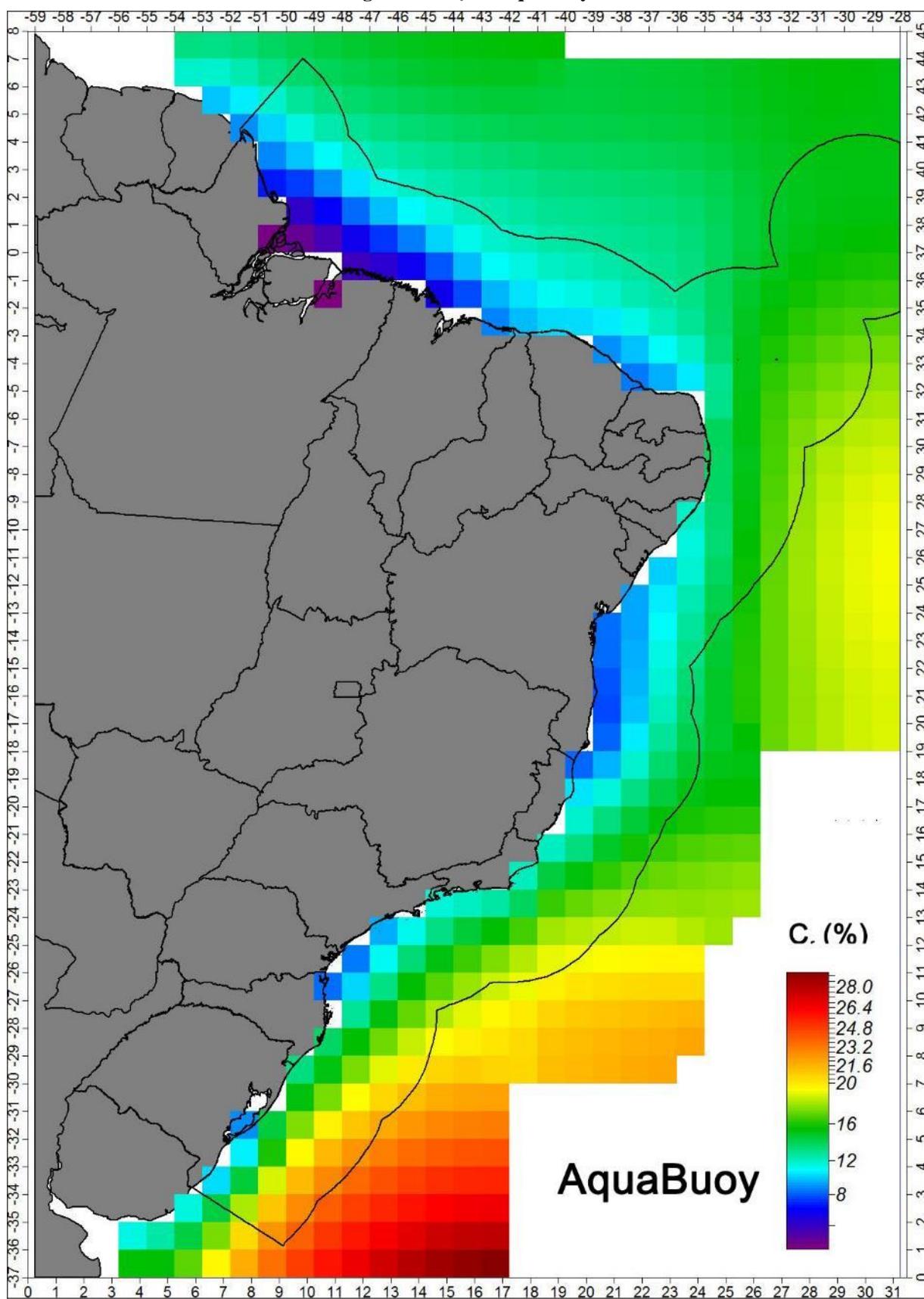
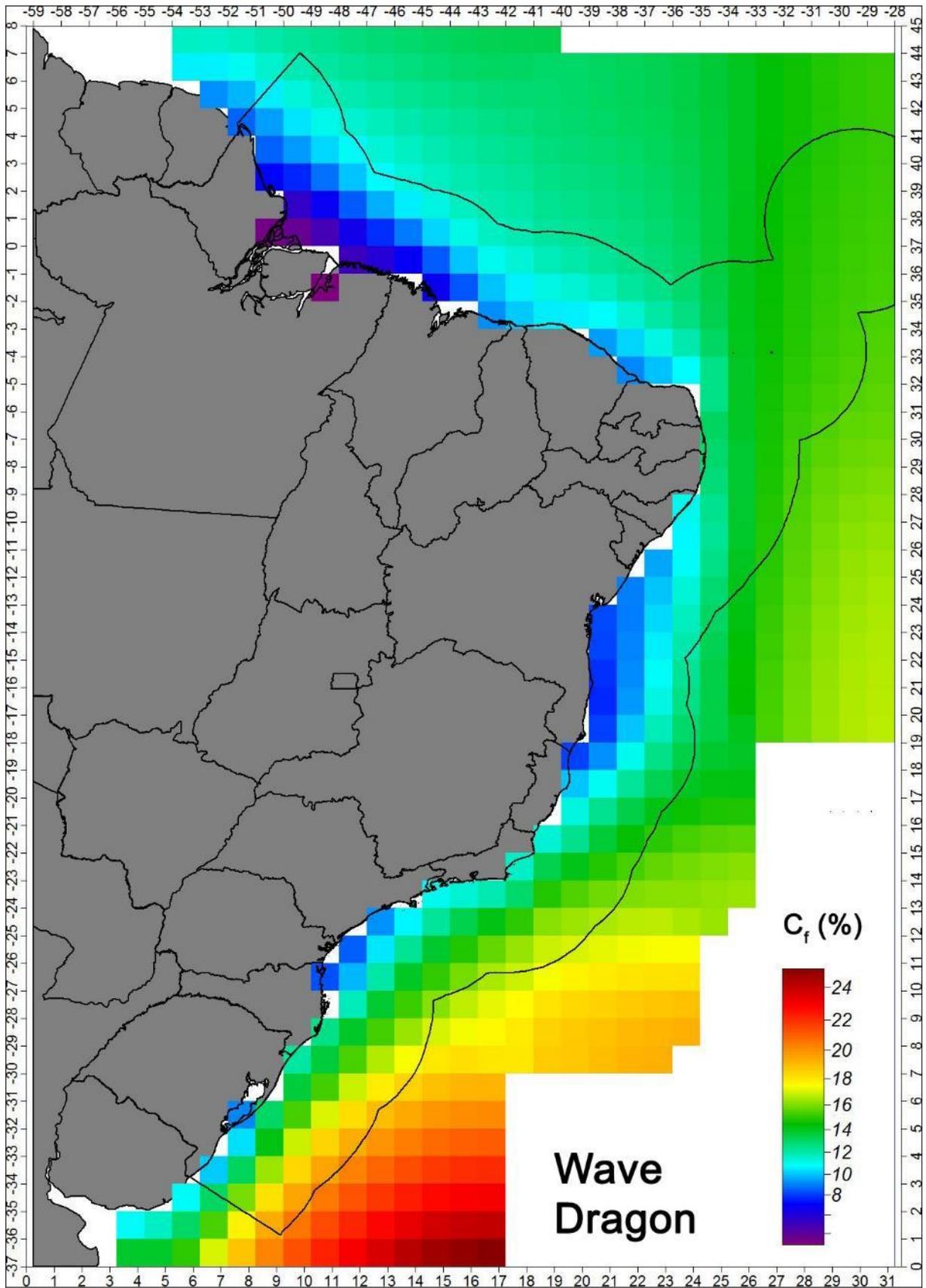
Figura E7 - C_f do Pelamis

Figura E8 - C_f do AquaBuoy

A linha contínua indica o limite da ZEE. Fonte: Autor.

Figura E9 - C_f do Wave Dragon

A linha contínua indica o limite da ZEE. Fonte: Autor.

APÊNDICE F – DADOS UTILIZADOS NAS ANÁLISES

Tabela F1 – Características da área de estudo

Ponto	Latitude	Longitude	Profundidade (m)	Distância em relação a costa (km)	Distância em relação ao porto mais próximo (km)	Área de proteção ambiental
P1	5°00' N	50°00' O	-2316	151,40	235,31	Não
P2	4°00' N	49°00' O	-486	206,20	270,98	Não
P3	3°00' N	48°00' O	-365	247,34	291,81	Não
P4	2°00' N	47°00' O	-1141	210,35	212,57	Não
P5	1°00' N	46°00' O	-725	161,05	180,42	Não
P6	1°00' N	45°00' O	-3551	187,05	225,35	Não
P7	0°00'	44°00' O	-2296	149,27	174,31	Não
P8	1°00' S	43°00' O	-2720	121,47	174,78	Não
P9	2°00' S	42°00' O	-1901	60,34	72,76	Não
P10	2°00' S	41°00' O	-1423	77,57	82,22	Não
P11	2°00' S	40°00' O	-2263	75,69	127,55	Não
P12	2°00' S	39°00' O	-3230	117,11	141,61	Não
P13	3°00' S	38°00' O	-2506	88,27	85,93	Não
P14	4°00' S	37°00' O	-2153	75,78	76,88	Não
P15	4°00' S	36°00' O	-356	99,73	93,77	Não
P16	5°00' S	35°00' O	-455	51,30	77,78	Não
P17	6°00' S	34°00' O	-4310	121,70	136,37	Não
P18	7°00' S	34°00' O	-3699	94,59	98,55	Não
P19	8°00' S	34°00' O	-2277	95,98	102,14	Não
P20	9°00' S	34°00' O	-3574	126,92	128,12	Não
P21	10°00' S	35°00' O	-3431	80,19	90,58	Não
P22	11°00' S	36°00' O	-2677	66,61	96,18	Não
P23	12°00' S	37°00' O	-2728	64,55	89,79	Não
P24	13°00' S	38°00' O	-2374	28,83	59,40	Não
P25	14°00' S	38°00' O	-3286	104,45	111,70	Não
P26	15°00' S	38°00' O	-3528	117,73	122,29	Não
P27	16°00' S	37°00' O	-4032	220,22	226,02	Não
P28	17°00' S	38°00' O	-2123	131,80	140,49	Não
P29	18°00' S	37°00' O	-3582	252,03	261,39	Não
P30	19°00' S	37°00' O	-3593	278,27	284,80	Não
P31	20°00' S	38°00' O	-1467	206,97	216,99	Não
P32	20°00' S	39°00' O	-1631	97,69	102,24	Não
P33	21°00' S	40°00' O	-1320	59,73	68,90	Não
P34	22°00' S	40°00' O	-288	113,61	118,45	Não
P35	23°00' S	41°00' O	-116	80,63	105,01	Não
P36	24°00' S	42°00' O	-1109	93,28	89,91	Não
P37	24°00' S	43°00' O	-392	87,86	96,91	Não
P38	24°00' S	44°00' O	-151	70,24	83,45	Não
P39	25°00' S	45°00' O	-156	90,15	108,92	Não
P40	26°00' S	46°00' O	-188	163,92	167,65	Não
P41	26°00' S	47°00' O	-111	116,17	164,17	Não
P42	27°00' S	47°00' O	-169	164,95	186,85	Não
P43	28°00' S	48°00' O	-101	57,41	78,95	Não
P44	29°00' S	48°00' O	-222	96,87	97,52	Não
P45	30°00' S	49°00' O	-115	91,38	119,24	Não
P46	31°00' S	50°00' O	-115	54,48	75,37	Não
P47	32°00' S	50°00' O	-521	109,59	147,06	Não
P48	33°00' S	50°00' O	-1012	168,26	189,31	Não
P49	34°00' S	51°00' O	-1728	175,87	189,07	Não

Fonte: Autor.

Tabela F2 - Análise estatística de H_s

Ponto	Média (m)	Máximo (m)	95% (m)	σ (m)	$H_s > 2m$ (%)
P1	1,66	3,68	2,41	0,41	21,07
P2	1,64	3,59	2,35	0,38	18,29
P3	1,62	3,45	2,27	0,35	15,01
P4	1,60	3,36	2,18	0,32	11,70
P5	1,58	3,23	2,09	0,29	8,22
P6	1,64	3,48	2,17	0,31	11,92
P7	1,62	3,25	2,13	0,29	10,30
P8	1,65	3,08	2,18	0,30	12,75
P9	1,63	2,95	2,17	0,31	11,89
P10	1,67	3,02	2,18	0,30	13,73
P11	1,67	2,96	2,17	0,29	13,03
P12	1,72	3,08	2,25	0,30	17,56
P13	1,70	2,99	2,21	0,30	15,40
P14	1,64	3,04	2,12	0,28	10,45
P15	1,72	3,14	2,22	0,28	16,12
P16	1,63	2,91	2,06	0,24	7,42
P17	1,81	3,61	2,32	0,28	21,87
P18	1,77	3,69	2,28	0,28	17,65
P19	1,73	3,72	2,28	0,29	16,23
P20	1,76	3,77	2,36	0,32	19,40
P21	1,62	3,52	2,26	0,34	12,92
P22	1,55	3,63	2,21	0,34	10,40
P23	1,54	4,02	2,22	0,35	10,32
P24	1,42	3,98	2,11	0,35	7,25
P25	1,44	4,12	2,14	0,36	7,79
P26	1,43	3,93	2,11	0,35	7,09
P27	1,60	4,17	2,31	0,37	13,23
P28	1,46	3,62	2,10	0,33	6,84
P29	1,67	4,51	2,42	0,39	17,88
P30	1,73	4,85	2,52	0,42	21,71
P31	1,73	4,52	2,55	0,43	22,37
P32	1,63	4,30	2,39	0,40	15,77
P33	1,48	3,58	2,13	0,35	8,15
P34	1,74	4,42	2,54	0,43	24,11
P35	1,79	5,07	2,64	0,46	27,77
P36	1,87	5,81	2,82	0,51	33,76
P37	1,76	5,60	2,71	0,51	26,65
P38	1,64	5,16	2,57	0,49	20,48
P39	1,72	5,56	2,72	0,53	25,43
P40	1,73	5,71	2,77	0,54	25,78
P41	1,55	4,85	2,47	0,48	15,52
P42	1,71	6,45	2,76	0,55	24,36
P43	1,77	6,78	2,83	0,57	27,50
P44	1,86	7,68	3,00	0,62	33,51
P45	1,80	6,44	2,90	0,60	30,90
P46	1,84	6,59	3,03	0,64	33,87
P47	1,97	7,18	3,30	0,71	40,96
P48	2,10	7,46	3,59	0,78	46,86
P49	2,06	7,37	3,57	0,79	44,02
Média	1,69	4,43	2,45	0,41	19,05

Fonte: Autor.

Tabela F3 - Análise estatística de P e coeficientes de variabilidade temporal

Ponto	Potência ondomotriz média anual (kW/m)	Potência ondomotriz máxima (kW/m)	95 percentil (kW/m)	Desvio padrão (kW/m)	COV	SV	MV
P1	11,57	81,84	24,91	6,98	0,60	1,00	1,13
P2	11,16	76,23	23,63	6,54	0,59	0,97	1,09
P3	10,75	71,98	22,23	6,06	0,56	0,92	1,02
P4	10,33	67,12	20,59	5,47	0,53	0,83	0,91
P5	9,80	63,98	18,83	4,85	0,50	0,73	0,82
P6	10,75	77,94	20,80	5,49	0,51	0,73	0,82
P7	10,39	66,98	19,55	5,02	0,48	0,61	0,73
P8	10,57	62,92	19,65	4,94	0,47	0,51	0,65
P9	9,93	52,33	18,20	4,49	0,45	0,49	0,66
P10	10,51	57,82	19,12	4,75	0,45	0,48	0,66
P11	10,57	55,88	18,90	4,62	0,44	0,42	0,60
P12	11,40	63,10	20,39	4,98	0,44	0,35	0,54
P13	10,82	54,40	19,13	4,60	0,42	0,33	0,51
P14	10,15	55,64	18,11	4,42	0,44	0,40	0,54
P15	11,25	65,88	19,76	4,72	0,42	0,31	0,47
P16	10,11	44,25	16,93	3,72	0,37	0,21	0,32
P17	13,39	61,51	22,63	4,94	0,37	0,14	0,21
P18	12,72	63,58	21,59	4,75	0,37	0,21	0,28
P19	12,21	68,47	21,53	4,92	0,40	0,41	0,46
P20	12,87	78,72	23,68	5,64	0,44	0,49	0,53
P21	10,67	71,51	21,48	5,56	0,52	0,73	0,78
P22	9,58	65,50	20,02	5,37	0,56	0,80	0,86
P23	9,35	68,52	20,11	5,54	0,59	0,82	0,88
P24	7,97	65,88	17,82	5,07	0,64	0,85	0,91
P25	8,04	70,82	17,87	5,08	0,63	0,81	0,87
P26	7,96	65,00	17,28	4,80	0,60	0,76	0,81
P27	10,54	79,90	22,43	6,11	0,58	0,69	0,73
P28	8,25	55,54	17,16	4,59	0,56	0,63	0,69
P29	12,04	91,55	26,22	7,24	0,60	0,62	0,65
P30	13,15	106,80	29,45	8,25	0,63	0,60	0,64
P31	13,30	108,67	30,46	8,78	0,66	0,57	0,62
P32	11,45	89,50	26,17	7,49	0,65	0,56	0,62
P33	9,12	69,41	20,28	5,77	0,63	0,49	0,61
P34	13,25	103,86	30,26	8,84	0,67	0,47	0,60
P35	14,29	129,62	33,64	10,13	0,71	0,49	0,61
P36	15,92	208,45	38,52	12,01	0,75	0,50	0,62
P37	14,40	194,46	35,80	11,26	0,78	0,51	0,64
P38	12,73	154,50	32,02	10,15	0,80	0,51	0,66
P39	13,78	166,24	34,67	11,02	0,80	0,48	0,66
P40	13,88	176,84	35,53	11,44	0,82	0,45	0,64
P41	10,73	123,27	27,02	8,54	0,80	0,38	0,62
P42	13,39	219,81	34,68	11,33	0,85	0,42	0,62
P43	14,18	247,92	36,78	12,21	0,86	0,44	0,62
P44	15,62	308,31	40,69	14,13	0,90	0,49	0,64
P45	14,52	222,39	37,34	12,70	0,87	0,44	0,63
P46	15,13	222,73	39,50	13,43	0,89	0,39	0,62
P47	17,80	280,26	48,08	16,73	0,94	0,45	0,65
P48	20,63	301,08	57,65	20,44	0,99	0,50	0,67
P49	19,93	300,83	56,70	20,49	1,03	0,48	0,64
Média	12,10	115,50	26,85	7,89	0,62	0,55	0,67

Fonte: Autor.

Tabela F4 – Parâmetros de produção e desempenho dos WEC analisados

Ponto	Potência elétrica média (kW)			Produção anual de energia (MWh)			Fator de capacidade (%)		
	Aqua Buoy	Pelamis	Wave Dragon	Aqua Buoy	Pelamis	Wave Dragon	Aqua Buoy	Pelamis	Wave Dragon
P1	29,78	106,07	744,04	260,86	929,15	6517,78	11,91	14,14	10,63
P2	28,65	102,89	729,51	250,97	901,32	6390,48	11,46	13,72	10,42
P3	27,45	99,36	719,72	240,44	870,43	6304,76	10,98	13,25	10,28
P4	26,14	96,33	708,38	229,02	843,84	6205,37	10,46	12,84	10,12
P5	24,54	92,52	687,45	214,93	810,44	6022,10	9,81	12,34	9,82
P6	26,91	98,81	745,40	235,75	865,59	6529,66	10,77	13,18	10,65
P7	25,62	96,54	729,06	224,41	845,71	6386,60	10,25	12,87	10,42
P8	25,57	99,28	733,53	224,00	869,67	6425,76	10,23	13,24	10,48
P9	23,43	95,50	686,78	205,28	836,62	6016,20	9,37	12,73	9,81
P10	24,97	99,19	724,35	218,75	868,94	6345,27	9,99	13,23	10,35
P11	25,26	99,87	733,84	221,32	874,88	6428,41	10,11	13,32	10,48
P12	27,39	106,99	778,80	239,98	937,25	6822,33	10,96	14,27	11,13
P13	25,66	103,13	742,76	224,81	903,43	6506,59	10,27	13,75	10,61
P14	23,94	95,76	709,95	209,69	838,83	6219,19	9,57	12,77	10,14
P15	26,84	106,16	775,16	235,13	929,98	6790,43	10,74	14,15	11,07
P16	24,74	97,24	732,29	216,68	851,85	6414,84	9,89	12,97	10,46
P17	34,69	121,49	918,44	303,86	1064,22	8045,53	13,87	16,20	13,12
P18	33,20	115,85	888,55	290,81	1014,80	7783,67	13,28	15,45	12,69
P19	32,19	112,91	850,93	281,96	989,07	7454,15	12,88	15,05	12,16
P20	34,02	115,88	882,65	297,99	1015,12	7732,05	13,61	15,45	12,61
P21	27,81	100,44	722,46	243,63	879,84	6328,79	11,12	13,39	10,32
P22	24,17	92,55	647,21	211,72	810,77	5669,59	9,67	12,34	9,25
P23	23,31	90,26	628,58	204,23	790,67	5506,36	9,33	12,03	8,98
P24	19,31	77,73	542,16	169,19	680,92	4749,31	7,73	10,36	7,75
P25	19,33	79,60	543,57	169,32	697,27	4761,65	7,73	10,61	7,77
P26	19,35	78,99	540,65	169,50	691,96	4736,08	7,74	10,53	7,72
P27	27,07	97,39	708,32	237,11	853,16	6204,92	10,83	12,99	10,12
P28	20,46	81,72	561,23	179,27	715,87	4916,40	8,19	10,90	8,02
P29	30,82	103,99	799,54	270,01	910,96	7003,99	12,33	13,87	11,42
P30	33,24	108,57	862,49	291,21	951,07	7555,39	13,30	14,48	12,32
P31	33,07	108,03	865,73	289,71	946,36	7583,81	13,23	14,40	12,37
P32	28,46	96,27	758,19	249,27	843,32	6641,75	11,38	12,84	10,83
P33	22,33	79,59	619,61	195,64	697,17	5427,80	8,93	10,61	8,85
P34	32,32	108,76	856,57	283,08	952,75	7503,55	12,93	14,50	12,24
P35	34,67	113,67	909,61	303,68	995,77	7968,18	13,87	15,16	12,99
P36	38,55	123,33	990,18	337,69	1080,40	8673,99	15,42	16,44	14,15
P37	34,92	110,02	911,16	305,89	963,75	7981,76	13,97	14,67	13,02
P38	30,97	96,59	818,64	271,29	846,14	7171,32	12,39	12,88	11,69
P39	33,89	108,68	870,40	296,90	952,00	7624,75	13,56	14,49	12,43
P40	34,20	110,81	871,38	299,59	970,66	7633,28	13,68	14,77	12,45
P41	26,54	90,66	706,69	232,46	794,17	6190,64	10,61	12,09	10,10
P42	32,87	109,17	843,04	287,92	956,36	7385,03	13,15	14,56	12,04
P43	34,67	115,69	883,76	303,72	1013,46	7741,77	13,87	15,43	12,63
P44	37,89	127,88	951,50	331,92	1120,23	8335,10	15,16	17,05	13,59
P45	35,48	122,41	895,11	310,84	1072,31	7841,19	14,19	16,32	12,79
P46	36,69	128,74	918,64	321,39	1127,75	8047,27	14,68	17,17	13,12
P47	43,08	146,89	1050,86	377,34	1286,73	9205,50	17,23	19,58	15,01
P48	49,44	163,91	1189,81	433,13	1435,86	10422,75	19,78	21,85	17,00
P49	47,73	159,11	1153,06	418,10	1393,81	10100,79	19,09	21,21	16,47

Fonte: Autor.

ANEXO A – PUBLICAÇÕES

Neste anexo são apresentadas as publicações do autor realizadas durante o período de Doutorado diretamente relacionados com o objeto da pesquisa.

- **Capítulo de livro publicado**

ESPINDOLA, R. L.; ANDRADE, P. V. F.; ARAÚJO, A. M. Theoretical analysis of mechanical energy conversion by a point absorber WEC using reanalysis wave data. In: GUEDES SOARES, C.; SANTOS, T. A.: (Org.). **Maritime Technology and Engineering III**. 1ª ed. Londres: CRC Press, 2016, v. II, p. 1103-1109.

- **Trabalhos completos publicados em anais de congressos**

ESPINDOLA, R. L.; ARAUJO, A. M. Validação de Dados de Onda de Reanálise do ERA-Interim para Estimativa do Potencial Energético das Ondas. In: VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2016, Belo Horizonte. VI Congresso Brasileiro de Energia Solar - Anais 2016, 2016.

ANDRADE, P. V. F. ; ESPINDOLA, R. L. Análise Teórica da Produção de um Conversão de Energia Ondomotriz do Tipo Absorvedor Pontual. In: VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2016, Belo Horizonte. VI Congresso Brasileiro de Energia Solar - Anais 2016, 2016.

ESPINDOLA, R. L.; ANDRADE, P. V. F. ; ARAUJO, A. M. Theoretical analysis of mechanical energy conversion by a point absorber WEC using reanalysis wave data. In: 3rd International Conference on Maritime Technology and Engineering - MARTECH 2016, 2016, Lisboa, Portugal. Proceedings of the 3rd International Conference on Maritime Technology and Engineering (MARTECH 2016, Lisbon, Portugal, 4-6 July 2016), 2016. p. 1103-1109.

- **Artigo completo publicado em periódico**

ESPINDOLA, R. L.; ARAÚJO, A. M. Wave energy resource of Brazil: An analysis from 35 years of ERA-Interim reanalysis data. PLoS One, v. 12, p. e0183501, 2017. (Qualis A1)

Theoretical analysis of mechanical energy conversion by a point absorber WEC using reanalysis wave data

R.L. Espindola & P.V.F. Andrade
Rural Federal University of Semi-Arid, Caraiúbas, Brazil

A.M. Araújo
Federal University of Pernambuco, Recife, Brazil

ABSTRACT: Wave energy is a clean and renewable resource, with good predictability and high power density when compared to others renewable resources like solar and wind. Brazil is in a position to take advantage of this resource for the history of using renewable resources and for having an extensive coastline. However, only a few studies were conducted in the country in this field. Thus, this paper presents a theoretical analysis of the mechanical energy conversion of a wave energy converter (WEC) for four sites on the coast of Rio Grande do Norte/RN in Brazil. The device analyzed was a point absorber type. A mathematical analysis found in the literature and information about waves from the ERA-Interim reanalysis project was used to determine the frequency of wave occurrence and the mechanical power and mechanical energy matrices. With these results the total annual mechanical power was determinate. The minimum annual mechanical power found was 1.43 GWh/year and the maximum 1.59 GWh/year. Minimum and maximum mechanical efficiency also was determinate and the average was 6.17% and 9.00%, respectively.

1 INTRODUCTION

Fossil fuels have always been the focus of the global energy matrix. In 2000, they represent 86.6% of said matrix. In 2013, despite a small reduction, they still represented 86.3% (BP, 2014). Due to the oil crisis in 1970s and the discovery of combustion products' harmful effects to the environment, new sources that can supply men's power needs, but are less detrimental to the environment have been researched. Therefore, the search for clean and renewable energy sources has been intensified, with research advancing in many fields, such as solar, wind, biomass and marine energy, among others.

A good example of a renewable source is wave energy. According to Thorpe (2014), the available wave energy in the world is 2 TW, and the power density of this source is more than 15 to 20 times bigger than solar and wind power (Wavemill Energy Corp, 2011).

Brazil is a country with a vast coastline, about 7300 km of extension (Tessler & Goya, 2005). In light of this, utilizing this coastline for alternate sources of energy generation is largely considered. However, until this day, only one attempt of using this technology has been done in the country, a prototype for research by COPPE/UFRJ installed at the Pecém harbour, in the state of Ceará (Ricarte *et al.*, 2005).

The lack of investment, research and the fact that Brazil has small waves in their coast compared to

Europe, these are the main reasons for poor development of wave energy in the country. The small waves end up being one of the reasons for the investment been so low, as investors recognize that they will not yield significant power, especially when compared to established sources (Gonçalves *et al.* 2008).

Even though relatively small, Brazilian waves are constant and largely one-way, different from the European fierce waves. According Tessler & Goya (2005), South and Southeast waves have a period of 10 to 16 seconds and height of 1 to 4 meters, while the North and Northeast ones have between 5 and 10 seconds and 1 to 2 meters in the same characteristics. Less power in the wave may be useful because of a lower maintenance cost for the conversion device. In addition, the constancy of the wave may end up yielding approximate powers if well utilized.

Thus, the aim of this paper is to perform a theoretical analysis of mechanical energy that could be harnessed using a wave energy converter (WEC) of the point absorber type, installed off the coast of Brazil, more specifically in the Northeast coast. For this purpose, wave data from the reanalysis project ERA-Interim was used.

2 TYPES OF WAVE ENERGY DEVICES

There are more than 1500 patents for WEC according to Costa (2004). These devices can be classified

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

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

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

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

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

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

1. INTRODUÇÃO

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

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

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

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

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

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

2. DISPOSITIVOS DE CONVERSÃO ONDOMOTRIZ

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

VALIDAÇÃO DE DADOS DE ONDA DE REANÁLISE DO ERA-INTERIM PARA ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DAS ONDAS

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

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

Alex Maurício Araújo – ama@ufpe.br

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Mecânica

Resumo. Este trabalho é um esforço de validação dos dados de reanálise do projeto ERA-Interim necessários para estimativa do potencial energético das ondas. Para tanto, foram realizadas análises estatísticas destes dados, comparando-os com dados obtidos de medição indireta por sensoriamento remoto pelo satélite de altimetria Jason-2/OSTM. Uma vez que os satélites de altimetria não medem o período da onda, foram utilizadas duas metodologias diferentes para estimar esses valores, a fim de serem utilizados na comparação. Como resultado, obteve-se uma correlação aceitável, uma vez que, para sete dos oito pontos analisados, o bias manteve-se abaixo de -0,16, e o coeficiente de Pearson próximo ou superior a 0,7. Os outros parâmetros também indicaram bons resultados, como índice de dispersão sempre inferior a 0,25, RMSE em geral baixo e com a razão dos desvios padrão não se afastando muito do valor 1. Com relação ao período da onda os resultados não foram conclusivos, mas a análise qualitativa indica uma tendência entre as séries de dados.

Palavras-chave: Validação; Altura Significativa da Onda, Período da Onda

1. INTRODUÇÃO

Há algumas décadas o mundo busca encontrar soluções energéticas ambientalmente sustentáveis. Para isso, um grande esforço científico em pesquisas sobre energia eólica, solar, de biomassas, de ondas, e de outras fontes renováveis vem sendo feito. Por estar disponível, praticamente, ao redor de todo o mundo, a energia das ondas vem se mostrando bastante promissora. Além disso, o fato de ser uma fonte regular de energia e de ser mais previsível que outras fontes, como a eólica e a solar, contribuem para essa boa expectativa na sua utilização (Cruz, 2008).

Em escala global, diversos mapeamentos dessa fonte vêm sendo realizados desde a década de 1960. Podem ser citados como exemplo os trabalhos de Kinsman (1965), Pond e Pickard (1978), e mais recentemente os de Gunn e Stock-Williams (2012) e Arinaga e Cheung (2012).

Por abrangerem uma dimensão espacial muito grande, os estudos feitos a nível global apenas dão indicativos do potencial de cada região, sendo necessárias análises locais para uma melhor precisão do potencial existente. Na Europa diversos estudos vêm sendo realizados. Podemos citar como exemplos recentes: Vicinanza (2013), Gonçalves *et al.* (2014) e Kasiulis *et al.* (2015). Já o potencial energético dos outros continentes, comparativamente à Europa, foi pouco investigado. São exemplos de estudos na Ásia os trabalhos de Aoun *et al.* (2013), Liang *et al.* (2014). Nas Américas os de Hiles *et al.* (2014), Robertson *et al.* (2014). Na Oceania o de Behrens *et al.* (2012), além de trabalhos que envolvem regiões abrangendo mais de um continente, como os de Aydogan *et al.* (2013) e Zodiatis *et al.* (2014).

De acordo com Cruz e Sarmiento (2004), esse tipo de energia é atrativo para ilhas e países com vasta extensão litorânea. O Brasil se encaixa nesse perfil, uma vez que é um país continental que apresenta uma faixa litorânea de mais de 7.000 km, onde se encontram 73% da sua população. Além disso ele possui uma ZEE (Zona Econômica Exclusiva) de mais de 3,6 milhões de km², aonde apenas áreas pontuais vêm sendo exploradas e, em geral, pela atividade petrolífera (Oliveira Filho, 2011).

Historicamente, o Brasil é um grande utilizador de fontes renováveis de energia como a hidroelétrica, fonte predominante na sua matriz. Porém, apesar de todo o seu litoral e da sua ZEE, poucos estudos visando o aproveitamento energético das ondas têm sido feitos. Pode-se citar, dentre esses poucos esforços o convênio entre a COPPE/RJ, Eletrobrás e Governo do Estado do Ceará, a fim de desenvolver e instalar a primeira usina de Energia das Ondas das Américas (Ricarte *et al.*, 2005).

Gonçalves *et al.* (2008) apresentam como motivos para a falta de estudos sobre aproveitamento da energia das ondas no Brasil a ausência de dados sobre o potencial energético do mar, a dificuldade de atração de investidores e a ausência de mecanismos institucionais, que incluam projetos de investimentos nesse tipo de geração de energia em programas de incentivos ao desenvolvimento de energias alternativas.

Essa falta de dados é resultado dos poucos estudos que têm sido realizados com o objetivo de caracterizar o potencial de que o país dispõe nessa área. Dentre estes poucos estudos podemos citar: o feito por Estefen (2003), que apresenta o potencial da costa entre as latitudes 19° S a 32° S; o feito por Ricarte (2007), onde é caracterizado o potencial da costa cearense; e outros dois trabalhos, o de Carvalho (2010) e o de Souza (2011), onde são feitos levantamentos do potencial de toda a costa brasileira.

RESEARCH ARTICLE

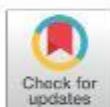
Wave energy resource of Brazil: An analysis from 35 years of ERA-Interim reanalysis data

Rafael Luz Espindola^{1,2*}, Alex Mauricio Araújo²

1 Rural Federal University of Semi-Arid—Campus Caraiúbas, Caraiúbas, Rio Grande do Norte, Brazil,

2 Department of Mechanical Engineering, Federal University of Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brazil

* rafael.espindola@ufersa.edu.br



Abstract

This paper presents a characterization of the wave power resource and an analysis of the wave power output for three (AquaBuoy, Pelamis and Wave Dragon) different wave energy converters (WEC) over the Brazilian offshore. To do so it used a 35 years reanalysis database from the ERA-Interim project. Annual and seasonal statistical analyzes of significant height and energy period were performed, and the directional variability of the incident waves were evaluated. The wave power resource was characterized in terms of the statistical parameters of mean, maximum, 95th percentile and standard deviation, and in terms of the temporal variability coefficients COV, SV e MV. From these analyses, the total annual wave power resource available over the Brazilian offshore was estimated in 89.97 GW, with largest mean wave power of 20.63 kW/m in the southernmost part of the study area. The analysis of the three WEC was based in the annual wave energy output and in the capacity factor. The higher capacity factor was 21.85% for Pelamis device at the southern region of the study area.

OPEN ACCESS

Citation: Espindola RL, Araújo AM (2017) Wave energy resource of Brazil: An analysis from 35 years of ERA-Interim reanalysis data. PLoS ONE 12(8): e0183501. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183501>

Editor: Vanesa Magar, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, División de Física Aplicada, MEXICO

Received: February 20, 2017

Accepted: August 4, 2017

Published: August 17, 2017

Copyright: © 2017 Espindola, Araújo. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Data Availability Statement: The data underlying this study are third party data taken from the public database provided by ECMWF. The authors confirm that they did not have any special access privileges to these data that others would not have. To access the public database you need to have an account on ECMWF web site. Registration can be done via the following link: <https://apps.ecmwf.int/registration/>. After registration, you will receive a key that will allow you to have access to the database. In this study, the authors used the ERA-Interim database, which can be accessed at the

Introduction

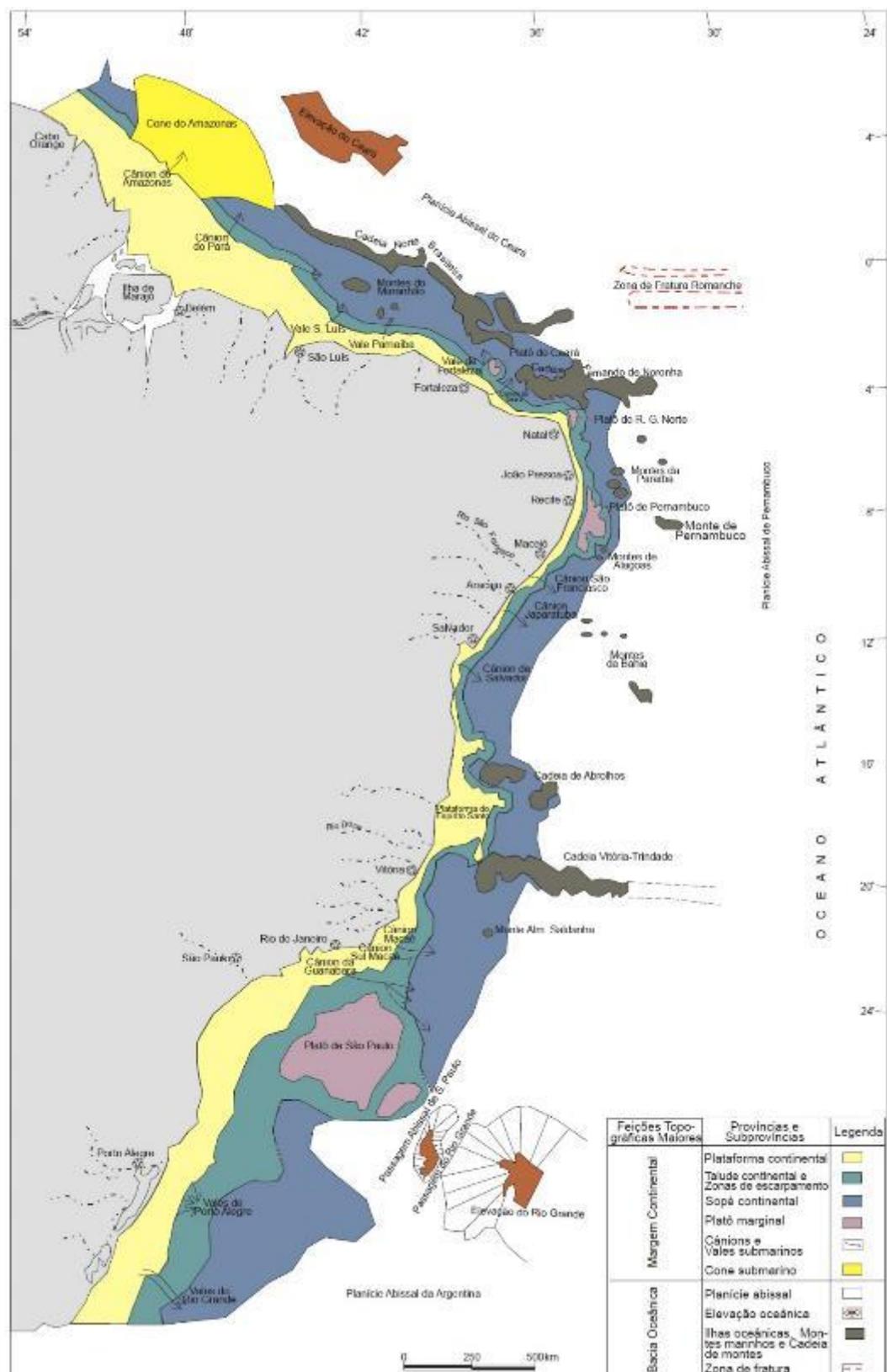
In recent decades, the world has been seeking to find environmentally sustainable energy solutions. For this, a great scientific effort in research on wind, solar, biomasses, wave and other renewable sources have been done. On a global scale, several wave power assessments have been done since the 1960s. It can be cited as examples the works [1,2].

Because of the large spatial dimension covered, studies done globally are only indicative of the potential of each region, requiring local analysis for better accuracy. In Europe, several studies have been conducted, for example, [3–7]. In the other continents, the number of researches are smaller. In Asia, the works [8,9] can be mentioned, in the Americas [10,11], in Oceania [12,13], in Africa [14] and in more than one continent [15,16].

Zhou *et al.* [17] classified the wave power assessments based on the data sources such as: traditional buoy data-based method, altimeter data-based method and wind data-based method. The last class include the works that use wave models such as WAM (Wave Model), WW3 (WaveWatch-III), SWAN (Simulated Waves Nearshore), etc. Nowadays, wave models are the most used method for wave power assessment because it allows a much more

ANEXO B – MORFOLOGIA DA MARGEM CONTINENTAL

Figura B1 - Mapa Preliminar das Províncias Morfológicas da Margem Continental Brasileira.



Fonte: Coutinho (2005 apud REMAC, 1975)