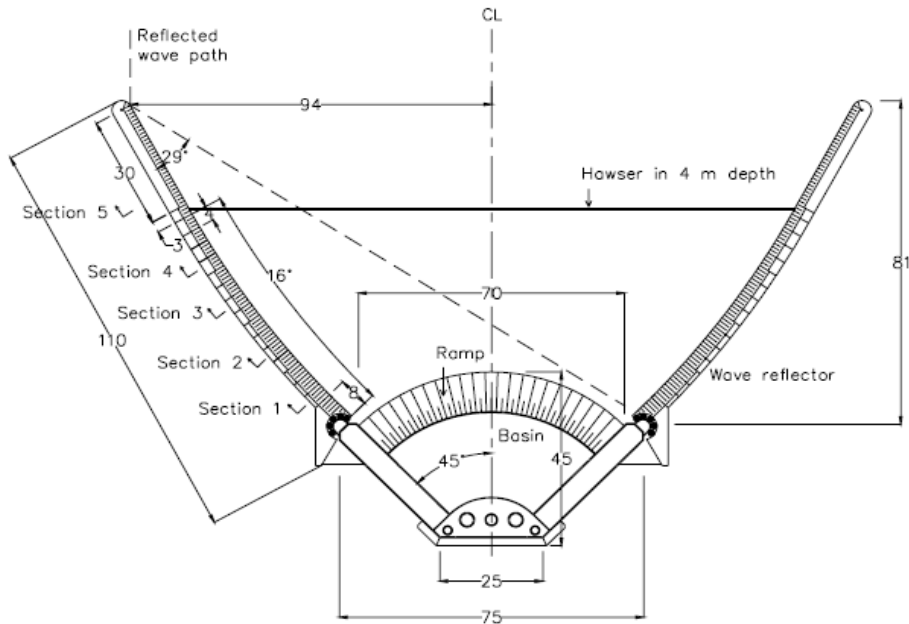




ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Eletrotécnica de Energia e Automação



Estudo do Galgamento em Conversor de Ondas Oceânicas

ISA ALONSO RODRIGUES
(Licenciada em Engenharia Eletrotécnica)

Trabalho Final de Mestrado para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica – Ramo de Energia

Orientadores:

Prof^a. Cristina Inês Camus

Prof. Eduardo Adelino Mateus Nunes Eusébio

Júri:

Presidente: Prof. Luís Manuel Dos Santos Redondo

Vogais: Prof. Victor Manuel Fernandes Mendes

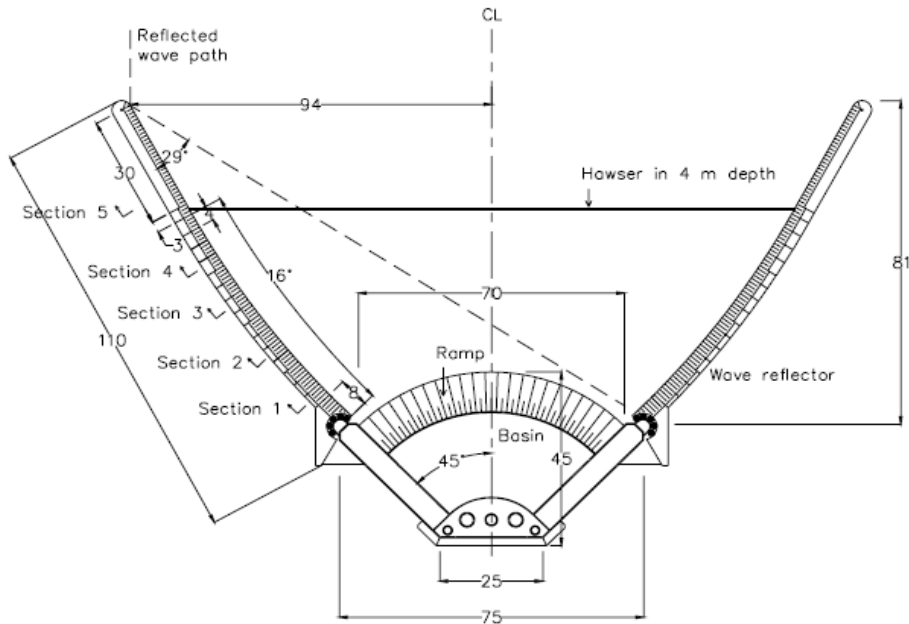
Outubro de 2017



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Eletrotécnica de Energia e Automação



Estudo do Galgamento em Conversor de Ondas Oceânicas

ISA ALONSO RODRIGUES
(Licenciada em Engenharia Eletrotécnica)

Trabalho Final de Mestrado para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica – Ramo de Energia

Orientadores:

Prof.^ª Cristina Inês Camus

Prof. Eduardo Adelino Mateus Nunes Eusébio

Júri:

Presidente: Prof. Luís Manuel Dos Santos Redondo

Vogais: Prof. Victor Manuel Fernandes Mendes

Outubro de 2017

Dissertação realizada sob orientação de:

Professora Cristina Inês Camus

Professora Adjunta da Área Departamental
de Engenharia de Eletrotécnica de Energia e Automação

Professor Eduardo Adelino Mateus Nunes Eusébio

Professor Adjunto da Área Departamental
de Engenharia Eletrotécnica de Energia e Automação

Resumo

Nesta dissertação é apresentada uma metodologia que tem como principal finalidade descrever e calcular a potência produzida de um conversor elétrico de ondas oceânicas, mais especificamente um dispositivo de galgamento (*WD - Wave Dragon*), em regime *offshore* e a sua colocação em território português - Leixões.

Numa fase inicial da dissertação serão descritos alguns conversores e as suas características, seguindo-se uma introdução teórica das ondas regulares e irregulares e, posteriormente será exposta e calculada a influência dos refletores na onda incidente, energia e caudal transposto.

Por fim, será calculada a potência expectável para um certo estado de mar na zona de Leixões se fosse colocado o *WD*.

Este estudo permite avaliar a complexidade e imprevisibilidade das ondas, analisar o comportamento do conversor consoante as suas características de construção, dimensão e requisitos.

Palavra-chave:

Galgamento

Rampa

Refletores

Turbina

Abstract

This dissertation presents a methodology that aims to describe and calculate the power produced by an oceanic waves electrical converter, more specifically an overtopping device (WD – Wave Dragon) in an offshore regime and its placement in portuguese territory in the area of Leixões.

On an initial phase of the work some converters and their features will be described followed by a theoretical introduction to regular and irregular waves. Then the influence of reflectors on the incidental wave, energy and overtop flow will be exposed and calculated.

In the final phase will be calculated the expected power for a certain state of the sea around Leixões if the WD was used there.

This work allowed to evaluate the complexity and unpredictability of the waves, analyze the performance of the converter according to its building features, dimension and requirements of the technology used.

Keywords:

Wave Dragon

Slope

Reflectors

Turbine

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à minha família pelo seu apoio e motivação para concluir o presente projeto, em especial à minha mãe pela sua sabedoria, compreensão e ajuda.

Agradeço, ainda, aos meus orientadores, Prof^a. Cristina Camus e Prof. Eduardo Eusébio pela sua disponibilidade e colaboração no projeto desenvolvido, assim como à Prof^a. Fátima Piedade que muito me ajudou na concretização.

Não posso esquecer o apoio dos meus amigos que, nos momentos bons e menos bons, sempre souberam “empurrar-me”, incentivando-me para seguir em frente, conquistando sonhos e cumprindo objetivos.

Índice

Índice de tabelas.....	xi
Índice de figuras.....	xiii
Lista de acrónimos.....	xv
Lista de símbolos.....	xvii
1 Introdução.....	3
1.1 Enquadramento.....	3
1.2 Motivação.....	3
1.3 Os oceanos como fonte de energia.....	4
1.4 Objetivos.....	7
1.5 Estrutura do documento.....	7
1.6 Notação.....	8
2 Aproveitamento da energia das ondas.....	11
2.1 Benefícios dos WEC.....	11
2.2 Desafios inerentes à tecnologia.....	11
2.2.1 DESAFIO ESTÉTICO.....	11
2.2.2 VARIAÇÃO DE DENSIDADE ENERGÉTICA.....	12
2.2.3 DIFICULDADES DE RENTABILIDADE.....	12
2.3 Tipos de aplicações de WEC.....	12
2.3.1 VANTAGENS E DESVANTAGENS CONSOANTE A LOCALIZAÇÃO.....	13
2.3.2 TIPOS DE WEC.....	13
2.3.3 MODOS DE OPERAÇÃO.....	14
2.4 Métodos PTO (<i>Power Take-Off</i>).....	22
2.4.1 TURBINAS.....	22
2.4.2 HIDRÁULICO.....	23
2.4.3 GERADORES LINEARES.....	24
3 Teoria linear.....	29
3.1 Introdução.....	29
3.2 A onda - objeto de estudo.....	29
3.3 Caracterização do movimento ondulatório.....	31
3.3.1 CARACTERÍSTICAS DO RECURSO E SUAS EQUAÇÕES.....	32

4 Teoria irregular	41
4.1 Introdução.....	41
4.2 Agrupamento de ondas	41
4.3 Ondas de superfície	43
4.3.1 DISTRIBUIÇÃO ENERGÉTICA DAS ONDAS.....	46
4.3.2 VARIÂNCIA.....	48
4.3.3 MOMENTOS ESPECTRAIS	49
4.3.4 IDEALIZAÇÃO MATEMÁTICA DOS ESPECTROS.....	51
4.3.5 REFRAÇÃO, DIFRAÇÃO E REFLEXÃO.....	54
5 Refletores e galgamento ou “overtopping”	59
5.1 Tratamento de dados.....	60
5.1.1 LOCALIZAÇÃO	60
5.2 Constituição do <i>Wave Dragon</i>	64
5.2.1 ESQUEMA DE DESIGN DOS REFLETORES	66
5.2.2 SELEÇÃO ESQUEMÁTICA FINAL DOS REFLETORES	67
5.2.3 CONSIDERAÇÃO DE ELEVÇÃO E ENERGIA.....	70
5.3 Fatores de otimização do galgamento.....	74
5.3.1 PARÂMETROS DE GALGAMENTO	74
5.3.2 CONCEITO DE STEEPNESS OU DECLIVE	74
5.3.3 QUEBRA (IRIBARREN).....	75
5.3.4 ÂNGULO DE INCIDÊNCIA (B)	76
5.3.5 NÍVEL DO MAR.....	76
5.3.6 EFEITO DO VENTO NO MOMENTO DO GALGAMENTO	76
5.3.7 PERMEABILIDADE E RUGOSIDADE	76
5.3.8 FATOR BERMA	76
5.3.9 ESTUDO TEÓRICO DA DESCARGA	77
5.3.10 DESIGN DA RAMPA.....	78
5.3.11 ANÁLISE DE DADOS	81
5.4 Turbinas.....	84
5.4.1 CONDIÇÕES DE FUNCIONAMENTO DAS TURBINAS	85
5.4.2 COMPORTAMENTO DA DESCARGA.....	85

5.4.3	TIPO DE TURBINAS DISPONÍVEIS.....	86
5.4.4	CARACTERÍSTICAS DA TURBINA KAPLAN BULB.....	87
5.4.5	MÚLTIPLAS TURBINAS	88
5.4.6	POTÊNCIAS	90
5.4.7	ESTIMATIVA DA POTÊNCIA ANUAL PRODUZIDA PELO WD	95
6	Conclusões	101

Índice de tabelas

TABELA 2.1 – VANTAGENS E DIFERENÇAS ONSHORE E OFFSHORE WEC.	13
TABELA 3.1 – TABELA DE VELOCIDADE DE CRISTA OU CELERIDADE CONSOANTE A PROFUNDIDADE OCEÂNICA.	35
TABELA 3.2 – TABELA DE VELOCIDADE DE GRUPO CONSOANTE A PROFUNDIDADE OCEÂNICA.....	35
TABELA 3.3 – TABELA DE POTÊNCIA CONSOANTE A PROFUNDIDADE OCEÂNICA.	37
TABELA 5.1 – TABELA DE DE INPUTS EM ESTUDO.	63
TABELA 5.2 – DIMENSÕES E POTÊNCIAS EXISTENTES PARA CONSTRUÇÃO [33].	65
TABELA 5.3 – RELAÇÃO DE ALTURA SIGNIFICATIVA DAS ONDAS COM ÂNGULO DE INÍCIO E RELAÇÃO DE ABERTURA.....	68
TABELA 5.4 – VALORES TEÓRICOS DE ENERGIA, COEFICIENTES DE REFLEXÃO.	72
TABELA 5.5 – DIMENSÕES DA RAMPA CONSOANTE OS VALORES DE ALFA (A).	79
TABELA 5.6 – VALORES DE IRIBARREN PARA CADA INPUT.	79
TABELA 5.7 – RELAÇÃO DE VALORES DE RC E Q PARA OS INPUTS EM ESTUDO SEM INFLUÊNCIA DOS REFLETORES.	81
TABELA 5.8 – QUANTIDADE DE ONDAS INCIDENTES NECESSÁRIAS PARA ENCHER O RESERVATÓRIO DE 8000000L (INPUT).	82
TABELA 5.9 - RELAÇÃO DE VALORES DE RC E Q PARA O INPUT 2 EM ESTUDO COM A INFLUÊNCIA DOS REFLETORES.....	83
TABELA 5.10 – QUANTIDADE DE ONDAS INCIDENTES NECESSÁRIAS PARA ENCHER O RESERVATÓRIO DE 8000000L (INPUT 2).	84
TABELA 5.11 – COMPARAÇÃO ENTRE SINGLE UNREGULATED E DOUBLE TURBINES [40].	87
TABELA 5.12 – VALORES DE POTÊNCIA PARA INPUT 1 SEM REFLETOR.....	92
TABELA 5.13 – VALORES DE POTÊNCIA PARA INPUT 2 COM REFLETOR.....	93
TABELA 5.14 – RELAÇÃO DE TEMPOS DE DESCARGA DE 2000m ³ VS ÚMERO DE TURBINAS ATIVAS.	95
TABELA 5.15 – TEMPOS DE ENCHIMENTO DE CADA INPUT 1 2, SEM E COM REFLETORES.	96
TABELA 5.16 – NÚMERO DE DESCARGAS ANUAIS.....	96
TABELA 5.17 - CÁLCULO DE EXEMPLO DE POTÊNCIA ANUAL.	97
TABELA 5.18 – CÁLCULO DE POTÊNCIA ANUAL PARA TODOS OS INPUTS ESTUDADOS, COM E SEM INFLUÊNCIA DOS REFLETORES.....	97

Índice de figuras

FIGURA 1.1 - DENSIDADE MÉDIA ANUAL DE ENERGIA DAS ONDAS KW/M [4].	6
FIGURA 2.1 DESENHO ILUSTRATIVO DO ARCHIMEDES WAVE SWING (AWS) [8].	14
FIGURA 2.2 DESENHO ILUSTRATIVO DE UM WAVEROLLER [10].	16
FIGURA 2.3 DESENHO ILUSTRATIVO DE UMA CAO [11].	17
FIGURA 2.4 DESENHO ILUSTRATIVO DE UM WAVE DRAGON [1].	18
FIGURA 2.5 IMAGEM ILUSTRATIVA DO PELAMIS [12].	19
FIGURA 2.6 FOTO DO PELAMIS [13].	20
FIGURA 2.7 – CONTROLO PELAMIS [1].	21
FIGURA 2.8 – ESQUEMA ILUSTRATIVO DOS MÉTODOS DE CONVERSÃO [7].	22
FIGURA 2.9 – MODELO REPRESENTATIVO DE UM SISTEMA HIDRÁULICO [7].	23
FIGURA 2.10 – FIGURA ILUSTRATIVA DO FUNCIONAMENTO DE UM GERADOR LINEAR [7].	24
FIGURA 3.1 – MOVIMENTO CIRCULAR DA PARTÍCULA À PASSAGEM DA ONDA [16].	30
FIGURA 3.2 MOVIMENTO DAS PARTÍCULAS NUMA ONDA OCEÂNICA EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE [16].	30
FIGURA 3.3 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE UMA ONDA PERIÓDICA [18].	31
FIGURA 4.1 – ONDA ESTACIONÁRIA.	41
FIGURA 4.2 – SOMATÓRIO DE DUAS ONDAS NO MESMO SENTIDO 1.	42
FIGURA 4.3 – SOMATÓRIO DE DUAS ONDAS NO MESMO SENTIDO 2.	42
FIGURA 4.4 – RESULTADO DA SOMA DE ONDAS COM DIFERENTES AMPLITUDES, COMPRIMENTOS E DIREÇÕES [24].	43
FIGURA 4.5 – REGISTO DE UMA BÓIA ONDÓGRAFO DE LEIXÕES DISPONÍVEL NO SITE DO INSTITUTO HIDROGRÁFICO DE PORTUGAL.	44
FIGURA 4.6 – INFORMAÇÃO DISPONÍVEL NUM REGISTO DE ELEVAÇÃO [27].	45
FIGURA 4.7 – ESPETRO DE ENERGIA DE ONDA AO LONGO DA FREQUÊNCIA [24].	49
FIGURA 4.8 – ESPETRO PM E JONSWAP [28].	53
FIGURA 4.9 – DIFRAÇÃO E INTERFERÊNCIA NA PROPAGAÇÃO DA ONDA INCIDENTE EM OBSTÁCULO COM UMA ABERTURA E SEGUNDO OBSTÁCULO COM DUAS ABERTURAS [29].	54
FIGURA 5.1 – DADOS DO ONDÓGRAFO DE LEIXÕES – DIA 06 DE SETEMBRO DE 2016 [32].	60
FIGURA 5.2 - EXEMPLO DE TP NA ZONA COSTEIRA DE PORTUGAL COM A SUA REGULAÇÃO DE COR – DIA 16 DE JANEIRO DE 2017 [33].	61
FIGURA 5.3 – PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE PERÍODO DE PICO ENTRE OS MESES DE OUTUBRO DE 2015 E MARÇO DE 2016 - ONDÓGRAFO DE LEIXÕES.	62
FIGURA 5.4 – PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE ALTURA SIGNIFICATIVA ENTRE OS MESES DE OUTUBRO DE 2015 E MARÇO DE 2016 - ONDÓGRAFO DE LEIXÕES.	62
FIGURA 5.5 – RELAÇÃO ENTRE A ALTURA SIGNIFICATIVA E O PERÍODO DE PICO PARA OS MESES DE OUTUBRO DE 2015 A MARÇO DE 2016 - ONDÓGRAFO DE LEIXÕES.	63
FIGURA 5.6 – ESQUEMA BASE DO WD COM AS MEDIDAS APRESENTADAS NO DOCUMENTO [35] APLICADAS AO MODELO EFM [31].	65

FIGURAS 5.7 – EXEMPLOS DE DESIGNS DE REFLETORES NÃO FUNCIONAIS [31].	66
FIGURA 5.8 – PADRÃO DE REFLEXÃO DO DESIGN DO WD PROPOSTO POR EFM, COM UMA CONSTANTE CURVATURA DE 1.0° E RELAÇÃO DE ABERTURA DE 2,62 E RELAÇÃO ANGULAR DE 0,64 [31].	67
FIGURA 5.9 – RELAÇÃO ENTRE A ALTURA DE ONDA: RELAÇÃO DE ABERTURA E RELAÇÃO DE ANGULAR PARA ONDAS INCIDENTES COM $T_p=3s$ [31].	68
FIGURA 5.10 – RELAÇÃO ENTRE O ÂNGULO DE CURVATURA E O ÂNGULO DE ALTERAÇÃO DE CURVATURA, SENDO OS PONTOS VERMELHOS REFERENTES AOS ESQUEMAS DAS FIGURAS 5.7 E A VERDE REFERENTE AO MODELO DA FIGURA 5.8, QUE É O APRESENTADO PELA EFM [30].	69
FIGURA 5.11 – IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DOS REFLETORES [31].	70
FIGURA 5.12 – ESQUEMA DE COMPREENSÃO PARA O ESTUDO DA TRANSMISSÃO ENERGÉTICA.	70
FIGURA 5.13- RELAÇÃO ENTRE A ALTURA SIGNIFICATIVA DA ONDA À ENTRADA E À SAÍDA DOS REFLETORES.	73
FIGURA 5.14 – RÁCIO DE ALTURA SIGNIFICATIVA.	73
FIGURA 5.15 – TIPOS DE QUEBRA CONSOANTE O DECLIVE [38].	75
FIGURA 5.16 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO GALGAMENTO [39].	78
FIGURA 5.17 – Q_1 VS R_c PARA OS INPUTS SEM INFLUÊNCIA DO REFLETOR.	82
FIGURA 5.18 - Q_1 VS R_c PARA OS INPUTS COM A INFLUÊNCIA DO REFLETOR.	83
FIGURA 5.19 – DIAGRAMA DE MODELOS MAIS COMUNS DE TURBINAS E A SUA RELAÇÃO COM ALTURA DE QUEDA [40].	86
FIGURA 5.20 – EFICIÊNCIA DAS TURBINAS PARA INSTALAÇÃO SIMPLES OU MÚLTIPLA VS CAUDAL MÉDIO [40].	88
FIGURA 5.21 – RELAÇÃO ENTRE O FLUXO, A ALTURA DE QUEDA E O RENDIMENTO [40].	89
FIGURA 5.22 – RELAÇÃO ENTRE O CAUDAL TURBINADO E O NÍVEL DE DEPÓSITO [40].	90
FIGURA 5.23 – RELAÇÃO DE POTÊNCIA ESTIMADA VS R_c VS HMO PARA WD SEM REFLETORES.	94
FIGURA 5.24 – RELAÇÃO DE POTÊNCIA ESTIMADA VS R_c VS HMO PARA WD COM REFLETORES.	94

Lista de acrónimos

2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões
AC	Alternative Current
AWS	<i>Archimedes Wave Swing</i>
DC	Direct Current
IHP	Instituto Hidrográfico Português
NMM	Nível Médio do Mar
OTEC	<i>Ocean Thermal Energy Conversion</i>
PM	Pierson-Moskovitz
PP	<i>Power Piramide</i>
PTO	<i>Power Take-Off</i>
Var	Variância
WD	<i>Wave Dragon</i>
WEC	<i>Wave Energy Converter</i>
WP	<i>Wave Plane</i>
WRA	<i>Wave Dragon Reflection Area</i>

Lista de símbolos

Letra	Unidade	Descrição
a	[s]	Valor limite inferior do intervalo da amostra
a_n	[Hz]	Amplitude de frequência associado à série de cossenos de <i>Fourier</i>
Ap	[m ²]	Área de aplicação
a_Q	[-]	Amplitude de frequência da fórmula de Van der Meer e Janssen (1995)
b	[s]	Valor limite superior do intervalo da amostra
b_n	[Hz]	Coefficientes da série associado à serie de senos de <i>Fourier</i>
b_Q	[-]	Coefficiente empírico da fórmula de Van der Meer e Janssen (1995)
c	[m/s ²]	Velocidade da crista
C	[m]	Crista
C1	[m]	Cateto adjacente referente às dimensões da rampa
C2	[m]	Cateto oposto referente às dimensões da rampa
Ca	[m]	Cava
C_g	[m/s ²]	Velocidade de grupo
$E_{f,d}$	[J/m/s]	Energia acima do nível <i>d</i>
E_k	[J]	Energia cinética
E_p	[J]	Energia potencial
E_w	[J/m]	Energia total
f	[Hz]	Frequência
f^p	[Hz]	Frequência de pico
f_s	[Hz]	Frequência de amostragem
g	[m/s ²]	Aceleração da gravidade
h	[m]	Condição de fundo, profundidade
H	[m]	Altura onda
Hip	[m]	Hipotenusa referente às dimensões da rampa
H_m	[m]	Altura média da onda
H_{max}	[m]	Altura máxima da onda
H_{mo}	[m]	Altura significativa
$H_{mo,entrada}$	[m]	Altura significativa de entrada nos refletores
$H_{mo,saida}$	[m]	Altura significativa de saída dos refletores ou aproximação à rampa
H_t	[m]	Altura de queda
i	[-]	Vetor unitário segundo <i>Ox</i>
j	[-]	Vetor unitário segundo <i>Oy</i>

k	[-]	Vetor unitário segundo Oz
κ	$[m^{-1}]$	Número de onda
Kr,En	[-]	Coefficiente refração energético <i>input n</i>
Kr,Hn	[-]	Coefficiente refração de altura significativa do <i>input n</i>
Lmin	[m]	Cota mínima de água no reservatório
L_p	[m]	Comprimento de onda de pico
m	[kg]	Massa
m_{-1}	$[m^2s]$	Primeiro valor espectral negativa
m_0	$[m^2]$	Momento espectral zero
N	[-]	Número de amostras
P	[Pa]	Pressão
P_a	[Wh/ano]	Energia anual
P_f	[W/m]	Potência total por metro de onda
Pgalg	[kW]	Potência de galgamento
P_{Hid}	[kW]	Potência hidráulica
P_{est}	[kW]	Potência estimada
P_{act}	[kW]	Potência atual
q	$[m^3/s/m]$	Média de descarga de onda por largura
Q	[-]	Valor médio de descarga
Q_n	$[m^3/s]$	Caudal nominal da turbina
Rc	[m]	Cota vertical entre a altura media do mar e o ponto mais elevado da rampa
Rh	[-]	Rácio de altura significativa
Smeio	[m]	Largura da secção do meio
Slados	[m]	Largura da secção das laterais
$S_n(f)$	[Hz]	Variância por unidade de frequência
S_{om}	[-]	Declividade segundo valores médios
S_{op}	[-]	Declividade segundo valores de pico
t	[s]	Valor dimensão de tempo
T	[s]	Período da onda
\bar{T} ou T_m	[s]	Período médio
T_c	[s]	Período médio entre picos
T_e	[s]	Período de energia
T_p	[s]	Período de pico
T_z	[s]	Período médio dos zeros ascendentes
u_1	[-]	Onda incidente
u_2	[-]	Onda refletida
u_3	[-]	Onda transmitida

u	$[m/s^{-1}]$	Componente velocidade segundo eixo x
v	$[m/s]$	Velocidade
v	$[m/s^{-1}]$	Componente velocidade segundo eixo y
v	$[cm^2/s]$	Viscosidade
V	$[-]$	Vetor velocidade
W	$[m]$	Largura da rampa
ω	$[rad/s]$	Velocidade angular
w	$[m/s^{-1}]$	Componente velocidade segundo eixo z
w	$[^\circ]$	Dispersão
α	$[^\circ]$	Ângulo de rampa com a horizontal
β	$[^\circ]$	Ângulo de incidência
Δf	$[-]$	Resolução espectral
η	$[m]$	Elevação da superfície livre
η_t	$[-]$	Rendimento global da turbina
η_m	$[-]$	Rendimento mecânico
η_v	$[-]$	Rendimento Volumétrico
σ	$[-]$	Desvio padrão
σ^2	$[-]$	Variância
γ	$[-]$	Jonswap fator específico
γ_r	$[-]$	Coefficiente de berma na fórmula de descarga da teoria de Van der Meer e Janssen (1995)
γ_b	$[-]$	Coefficiente de profundidade na fórmula de descarga da teoria de Van der Meer e Janssen (1995)
γ_h	$[-]$	Coefficiente de rugosidade na fórmula de descarga da teoria de Van der Meer e Janssen (1995)
γ_δ	$[-]$	Coefficiente de ângulo de ataque na fórmula de descarga da teoria de Van der Meer e Janssen (1995)
λ	$[m]$	Comprimento de onda
λ_0	$[m]$	Comprimento de onda de momento zero
λ_m	$[m]$	Comprimento de onda médio
\emptyset	$[m/s^2]$	Velocidade potencial
ϵ	$[-]$	Largura de banda
ξ	$[-]$	Número de Iribarren
ξ_{om}	$[-]$	Número de Iribarren segundo valores médios
ξ_{op}	$[-]$	Número de Iribarren segundo valores de pico
ρ	$[kg/m^3]$	Massa específica de água

Capítulo 1

Introdução

Breve enquadramento do tema e estrutura da presente dissertação.

1 Introdução

1.1 Enquadramento

A energia, independentemente da sua fonte, sempre foi de importância vital para o ser humano. Nomeadamente, no mundo ocidentalizado, dito desenvolvido, o nível de qualidade de vida exige quase recursos energéticos sem limites. Neste sentido, é necessário e importante o desenvolvimento de outras fontes de energia, para além das usadas, que possam ser limpas/saudáveis, e, ao mesmo tempo, que sejam um recurso infindável e sobretudo universal.

Os avanços científicos devem-se, muitas vezes, a interesses e à conjuntura socioeconómica de determinado(s) governo/país(es). O estudo das ondas oceânicas teve início no final dos anos 70, inícios dos anos 80 do século XX, devido à crise petrolífera que obrigou os diversos estados a desenvolverem programas que dessem resposta à crise energética.

Hoje, em pleno século XXI e graças a quase duas décadas de negociações, movidas pela importante tarefa de salvar o nosso planeta da sua morte prematura e evitar a extinção da humanidade, causada pelos níveis de poluição emergentes e exponencialmente crescentes, foi estabelecido o Protocolo de Quioto. Este é um tratado jurídico internacional que tem como primordial objetivo limitar as emissões qualificadas de gases com efeito de estufa dos países desenvolvidos, que promovem alterações climáticas e o aumento do nível médio do mar. Apesar das críticas ao protocolo, este permitiu a discussão pública, bem como a tomada de consciência para estes problemas tão graves e, assim, dar azo a uma maior busca de conversores energéticos nomeadamente os derivados das ondas oceânicas.

1.2 Motivação

A escolha de determinadas temáticas depende dos interesses e motivações pessoais. O mar sempre me despertou grande fascínio, não só pela sua força e imensidão mas, por tudo o que representa. Deve-se, provavelmente às minhas origens açorianas, tendo vivido grande parte da vida perto do mar. Mas a escolha também recaiu neste tema porque se vive tempos de mudança em que as energias limpas desempenharão um papel fundamental.

A Terra, designada por planeta azul, porque tem cerca de 70% de território ocupado pela água, é um dos maiores mistérios da humanidade, pela riqueza e potencialidades que encerra. Algumas dessas potencialidades passam seguramente pelos oceanos ao nível não

só da fauna e da flora, mas também pela possibilidade de exploração de recursos energéticos.

Graças ao atual avanço tecnológico consegue-se perceber melhor o seu potencial, ou seja, após o estudo, análise e compreensão das dinâmicas deste recurso, a água, sabe-se, hoje que se pode obter uma forma limpa, segura e sobretudo rentável e inesgotável de energia.

1.3 Os oceanos como fonte de energia

Com uma dimensão de 70% da superfície do globo terrestre a água é uma das maiores fontes energéticas do mundo, 95% desta é água salgada proveniente dos oceanos e mares. Tendo em consideração tão elevado recurso e o crescente interesse por esta fonte energética várias questões se colocam de imediato: Será possível converter em energia útil este recurso? Será suficientemente relevante, em termos económicos, para despertar o interesse e, conseqüentemente, o investimento de governos e grupos económicos? Enquanto energia limpa será fator preferencial de investigação?

Neste momento, a Europa representa, respetivamente, cerca de 50% e 45% do desenvolvimento de mecanismos de conversão de energia das marés e das ondas de superfície. Portugal é o 11º país com maior área marítima de todo o mundo. Esta área corresponde a 18.7 vezes a sua área terrestre, ou seja, 1.720.560Km² de área com a sua jurisdição. Portugal tem um excelente potencial para investimento na extração de energia através das energias associadas a: energia das marés, gradiente térmico (correntes de convecção), gradiente de salinidade, correntes de marés e das ondas (elevação das ondas de superfície).

- Energia das marés: também designada por energia maremotriz é gerada através da diferença de alturas entre marés (energia potencial). As marés são influenciadas pelos campos gravitacionais da Lua e do Sol e pela rotação da terra. Este comportamento permite que se considere a construção de barragens fixas ou flutuantes, em estuários ou oceanos a vários quilómetros da costa, constituídas por comportas e grupos de turbinas e geradores elétricos. O desnível entre a maré cheia e a maré baixa pode atingir até quinze metros. A existência deste desnível de água, a montante e a jusante da barragem, origina um caudal

de água que, por abertura das comportas e forçado pela ação da gravidade, aciona as turbinas [1].

- Energia associada ao gradiente térmico: esta forma de energia é obtida através da diferença da temperatura existente entre a água de superfície (água quente) e as profundezas do oceano (água fria). Através de processos de conversão designados por *Ocean Thermal Energy Conversion* (OTEC), é possível, para além de gerar eletricidade, apoiar a aquacultura em águas profundas, climatização do ambiente (refrigeração e ar condicionado), assim como auxiliar o crescimento dos produtos hortofrutícolas e a extração mineral. Para o melhor funcionamento do OTEC a diferença de temperatura entre a água de superfície e de fundo deve rondar os 20°C. Uma grande vantagem do sistema OTEC é a produção de água dessalinizada. Por exemplo, uma central OTEC de 2 MW pode produzir cerca de 14.118.3 m³ de água doce [1], [2].
- Energia associada ao gradiente de salinidade: o princípio subjacente à energia de gradiente de salinidade (ou energia osmótica) é que existe uma diferença de entropia entre a água salgada e a água doce que pode ser explorada para produção de energia. Este processo de conversão é constituído por câmaras alternadas, separadas por membranas semipermeáveis que permitem a migração dos iões de sal, por osmose, através da membrana semipermeável, criando assim, uma corrente de baixa voltagem. As moléculas da água serão forçadas a passar através da membrana para o lado da água salgada. À medida que as moléculas da água passam através da membrana a pressão hidrostática irá aumentar no lado da água salgada até um máximo de 26 bars². Esta água pressurizada é utilizada para acionar uma turbina e produzir eletricidade [3].
- Energia associada às correntes de maré: é o movimento horizontal (fluxo) alternado que a água transcreve periodicamente consoante a subida e descida da maré. A energia cinética presente nas correntes de maré pode ser transformada em energia elétrica por conceitos semelhantes aos utilizados na energia eólica recorrendo ao uso de turbinas de eixo horizontal ou vertical, instaladas à superfície ou emersas por sistemas flutuantes ou fixos ao fundo oceânico [1].
- Energia proveniente das ondas: a origem desta forma de energia criada pela ação do vento na superfície do oceano é o resultado da redistribuição da radiação solar na atmosfera. A energia cinética criada pelo movimento das moléculas de água e da energia potencial criada pela massa de água que se encontra acima do nível do solo pode ser transformada em energia elétrica de diversos métodos. Para tal, recorre-se à utilização de tecnologias

relacionadas com o tipo de movimento (rotativo e de translação), dos métodos de extração de energia (hidráulicos, mecânicos, pneumáticos e elétricos), de localização (na costa, próximo da costa e longe da costa) e de posição (em terra, flutuantes e emersos) [1].

A energia das ondas em conjunto com a energia das marés constituem as mais vantajosas formas de conversão da energia oceânica. Prevê-se que, a curto-médio prazo, estejam comercialmente desenvolvidas. Estudos indicam que em 2050 esteja instalado 100GW de energia proveniente destes dois recursos. Os diversos projetos de conversores de energia de superfície designados por *Wave Energy Converters* (WEC) ainda estão numa fase de desenvolvimento muito inicial. Assim, terão, ainda, de provar a sua rentabilidade para subsistir no mercado tão competitivo como o da energia [4].

Comparando o recurso energético das ondas oceânicas em águas profundas, com a produção elétrica produzida globalmente, o *World Energy Council* concluiu que o oceano é um ótimo recurso e deve ser explorado. As ondas oceânicas estão avaliadas entre 8 000-80 000 *TWh* [5] comparadas com a produção elétrica global de 23 000 *TWh* estimado para 2020 [6].

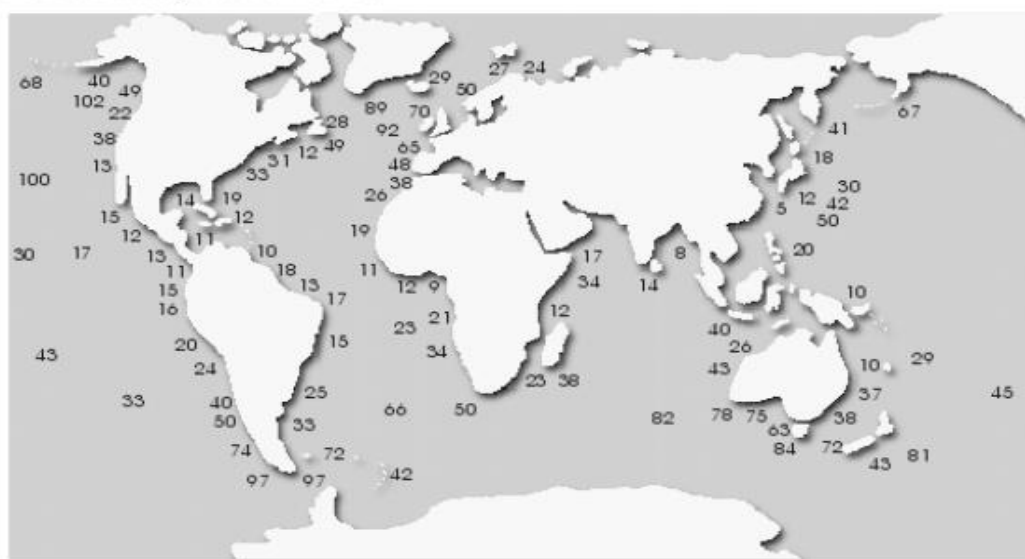


Figura 1.1 - Densidade média anual de energia das ondas kW/m [4].

Tal como verificado na figura 1.1 a costa portuguesa possui condições privilegiadas para o desenvolvimento e aproveitamento da energia das ondas pois, para além de possuir um recurso abundante é estimado um valor de $48 kW/m$ de frente de onda.

A energia das ondas detém o maior número de projetos em atividade, cerca de 70 em diferentes fases de prospeção, desde ensaios em tanques, modelos à escala, pré-

comercialização e construção. A Europa é líder no desenvolvimento da tecnologia proveniente das ondas de superfície, destacando-se o Reino Unido como a região que mais contribui para esta posição. Estima-se que o recurso disponível na Europa seja de 300GW, só em Portugal são 21GW [1].

1.4 Objetivos

Esta dissertação tem como âmbito de estudo as energias renováveis, em particular, a sua aplicação na produção da energia elétrica utilizando um conversor de ondas de superfície. Neste contexto, foram definidos como objetivos:

- Analisar os principais sistemas utilizados atualmente para o aproveitamento da energia das ondas;
- Expor o funcionamento do conversor *Wave Dragon* através do método de galgamento;
- Demonstrar a influência dos refletores do conversor *Wave Dragon*;
- Apresentar a importância da rampa de galgamento.

Por último, é exposto o método da descarga e apresentada uma estimativa da capacidade de produção anual de potência deste sistema de conversão, quando aplicado em território português.

1.5 Estrutura do documento

A presente dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos. Os quatro primeiros capítulos apresentam conceitos de introdução teórica, com o objetivo de auxiliar a interpretação do estudo desenvolvido. No quinto capítulo descreve-se a contribuição realizada no âmbito científico. No capítulo 6 são expostas as conclusões da dissertação e, no final, apresentam-se as referências à documentação consultada.

No capítulo 1, através de uma abordagem geral, é realizado o enquadramento das energias renováveis, da energia das ondas e a sua geração. É, igualmente, referida a motivação e o objeto de estudo que impulsionaram a realização da presente dissertação e, por fim, é exposta a notação utilizada neste documento.

No capítulo 2 são apresentadas, de forma breve, mas clara, as diversas tecnologias utilizadas relativamente ao tema da presente dissertação: os diversos PTO – *Power Take Off*, as vantagens, as desvantagens, bem como as suas diferenças de conversão.

Nos capítulos 3 e 4 são descritas, respetivamente, a teoria linear e a teoria irregular das ondas oceânicas, os fatores que influenciam o seu desenvolvimento, a sua elevação sobre o nível médio do mar, as equações, coeficientes influentes na compreensão dos capítulos seguintes.

No capítulo 5 são explicadas as origens dos dados utilizados no presente documento, as condições teóricas de aplicação do equipamento *Wave Dragon*, em estudo pormenorizado, a influência dos refletores nas ondas incidentes e o estudo do galgamento com e sem influência dos refletores. São, ainda, apresentados os cálculos da estimativa de potência anual produzida deste sistema de conversão.

No último capítulo, o sexto, são apresentadas as conclusões decorrentes do estudo elaborado e indicados possíveis desenvolvimentos futuros.

1.6 Notação

No presente documento a identificação de referências bibliográficas será apresentada entre parêntesis retos [], a numeração de expressões é apresentada entre parêntesis curvos () e terá dois algarismos, o primeiro referente ao número do capítulo em que este se encontra e o segundo representa o número da equação em cada capítulo. Em relação às figuras e tabelas estas são apresentadas igualmente com dois algarismos com referência ao capítulo em que são apresentadas e numeradas de forma sequencial. A seguir ao índice de tabelas e figuras são apresentadas as listas de acrónimos e símbolos. Expressões em língua estrangeira são apresentadas em formato itálico.

As referências bibliográficas estão apresentadas de acordo com a norma do *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, IEEE.

Capítulo 2

Aproveitamento energético das ondas

Neste capítulo será efetuada uma descrição teórica dos diversos tipos de WEC, as suas vantagens e os vários métodos de *Power Take Off* e as suas características.

2 Aproveitamento da energia das ondas

Apesar do grande avanço tecnológico, ainda se está numa fase muito inicial no que concerne à conversão de energia oceânica. Os principais motivos para este atraso devem-se, nomeadamente, a questões de financiamento, ao ambiente de aplicação e à viabilidade da rede.

Os elementos chave que as equipas de desenvolvimento precisam de ter mais presente são a rentabilidade e o desempenho dos equipamentos.

2.1 Benefícios dos WEC

O recurso a WEC é uma mais-valia relativamente a outros métodos de conversão, devendo-se ao facto de as ondas de superfície oferecerem a maior densidade energética de todos os recursos renováveis conhecidos e um menor impacto ambiental. 90% do tempo os conversores estão a fornecer energia à rede em comparação com os 20/30% da energia eólica ou solar e a variação das ondas oceânicas é sazonal acompanhando a demanda de energia nesses períodos [7].

2.2 Desafios inerentes à tecnologia

2.2.1 *Desafio estético*

A questão estética está diretamente relacionada com o rigoroso ambiente de aplicação dos conversores.

Apesar dos WEC serem desenhados para terem a melhor interação mecânica e elétrica e melhorarem a sua eficiência/rendimento ao máximo através de mecanismos auxiliares, no estudo da recolha de informação para fabrico do equipamento é necessário não se basear somente na densidade média ou na frequência de ressonância das ondas que ocorrem nessa zona do planeta [5]. É, também, necessário encontrar formas de mitigar o ambiente altamente corrosivo dos sistemas a operar na superfície oceânica.

O oceano é capaz de produzir ondas de extrema densidade energética, de elevadas amplitudes e de direções aleatórias. O investimento efetuado no equipamento tem de ser garantidamente protegido através de robustez ou flexibilidade para essas condições climáticas adversas, que raramente ocorrem, mas caso aconteçam, podem inviabilizar o projeto.

Em conversores colocados *nearshore* ou mesmo *onshore* existe outra questão inerente a estas aplicações, ou seja, o impacto visual na zona costeira. Geralmente são colocados vários entraves governamentais, legais ou mesmo de segurança que não permitirão a multiplicação/agrupamento de WEC no mesmo local.

2.2.2 *Variação de densidade energética*

As ondas oceânicas variam de amplitude e período de uma para outra, como variam de uma tempestade à calmaria. Apesar de existirem satélites que preveem no espaço de 24/48h a densidade média das ondas até chegarem à costa, os WEC têm de acompanhar a restante variação de densidade (em curto espaço de tempo), para fornecer à rede a melhor qualidade de energia elétrica sem perdas. Normalmente, é efetuado através de retificadores ou baterias [5].

De modo a fornecer um bom sinal à rede energética o sistema tem de converter um movimento oscilatório aleatório, altamente forte e lento num movimento de acionamento para o gerador.

2.2.3 *Dificuldades de rentabilidade*

Tal como detetada noutros dispositivos de recolha energética *offshore* a manutenção e reparação destes equipamentos é extremamente difícil. São várias as dificuldades apresentadas e de diferente complexidade, provocando entraves no desenvolvimento destes projetos, considerados cada vez menos rentáveis devido ao dispendioso investimento após produção, nomeadamente: a dificuldade de transporte de material de reparação/substituição (extremamente pesado...), a instabilidade oceânica e o próprio equipamento que muitas vezes tem de ser retirado para reparação em terra, obrigando à paragem do equipamento e, conseqüentemente, da produção energética [5].

2.3 Tipos de aplicações de WEC

Existem vários tipos de aplicação de conversores e variadíssimos métodos de conversão. De seguida, serão apresentados alguns conversores consoante o seu método de aplicação e recolha de dados, assim como as suas vantagens e desvantagens.

2.3.1 *Vantagens e desvantagens consoante a localização*

Tabela 2.1 – Vantagens e diferenças onshore e offshore WEC.

<i>Onshore / Shoreline</i>	<i>Offshore</i>
Vantagens	
Perto da rede de distribuição	Ondas de grande densidade energética
Facilidade de manutenção	Alta potência
Menor robustez de construção	
Fabrico mais barato	
Desvantagens	
Influência das marés	Necessitam de grande robustez
Proibida a produção em massa devido a leis de conservação da costa e da natureza	Mais caros
Ondas de pouca densidade energética	Manutenção mais complicada
Pouca potência	

2.3.2 *Tipos de WEC*

Tipo A – Atenuadores

São caracterizados pela sua colocação paralela à direção das ondas predominantes.

Exemplo: Pelamis, PS frog e SEAREV.

Tipo B – Pontos de absorção

São caracterizados por uma estrutura flutuante que se movimenta através do eixo Oz através da diferença de pressão. A sua orientação relativamente à onda predominante é indiferente.

Exemplo: *Power buoy*.

Tipo C – Terminadores

São caracterizados pelo seu eixo principal ser colocado perpendicularmente à onda predominante.

Exemplo: *Salter's duck*.

2.3.3 Modos de operação

2.3.3.1 Submergível de variação de pressão (corpos oscilantes submersos)

Exemplo: *Archimedes Wave Swing (AWS)*.

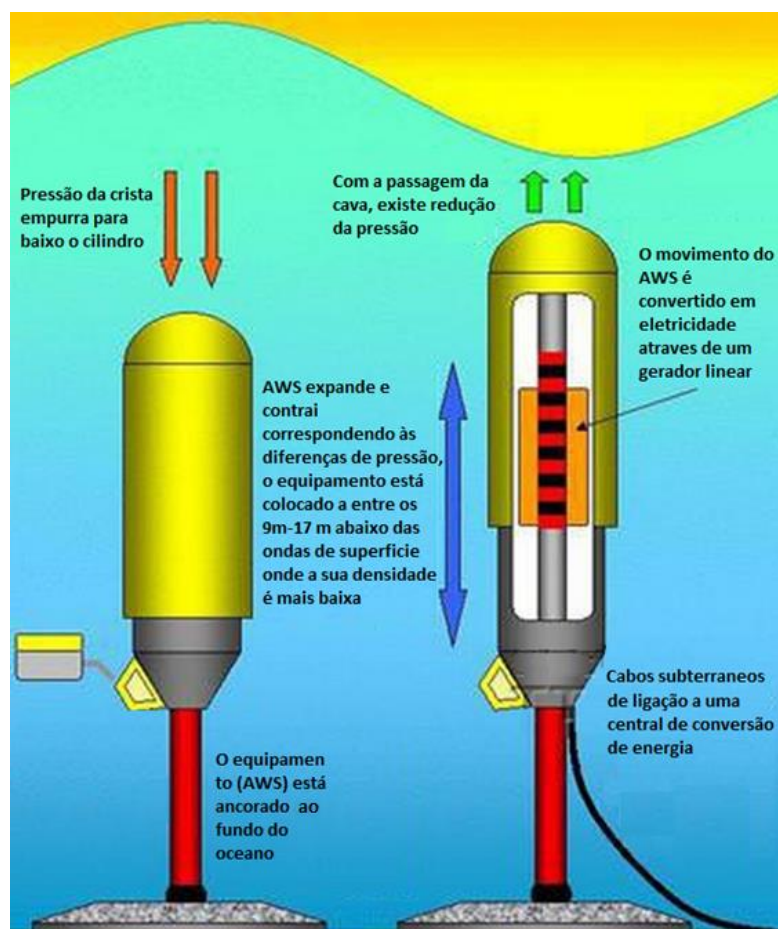


Figura 2.1 Desenho ilustrativo do Archimedes Wave Swing (AWS) [8].

O AWS foi originalmente desenvolvido pela *Teamwork technology BV (NL)*. Atualmente os direitos são propriedade da *AWS Ocean Energy Ltd (UK)*.

Este dispositivo, fixo no fundo do mar/oceano, utiliza as diferenças de pressão entre a passagem da crista e a cava da onda de superfície para recolher a energia.

O equipamento é constituído por uma câmara cilíndrica oca (cheia de ar) e um cilindro superior móvel acoplado. Com o aproximar da crista a pressão no topo da estrutura

aumenta, fazendo com que o cilindro móvel comprima o ar dentro da câmara, até que exista igualdade de pressões.

De acordo com os estudos realizados em [9], quando a crista da massa de água passa pelo dispositivo realiza pressão sobre o cilindro móvel, forçando a compressão do ar no interior do cilindro estacionário. À medida que esta compressão aumenta a pressão do ar cresce de tal forma que passa a efetuar uma contra força ao movimento descendente do cilindro superior. Ajustando a quantidade de ar e a massa do cilindro flutuante, o sistema pode acionar um pneumático (suspensão) e produzir uma energia de ressonância com uma certa frequência de onda.

O AWS tem dois modos de funcionamento, consoante a amplitude das ondas. Este controlo existe porque a força de amortecimento limite de compressão e descompressão suportável pelo motor linear não pode ser ultrapassado, existindo para o efeito blocos de borracha cujo objetivo é rapidamente retardar o movimento do flutuador com a passagem de ondas de elevada amplitude.

Assim, consoante a amplitude o sistema adquire um funcionamento diferente para manter a sua integridade e, ao mesmo tempo, ter o maior aproveitamento possível da energia, através de um sistema hidráulico auxiliar de amortecimento.

Após a instalação do equipamento será necessário efetuar a ligação do AWS ao conversor que está colocado na costa/praias mais próxima (a vários *km*'s de distância). Esse conversor transforma a corrente de oscilação gerada pela AWS de modo a compatibilizá-lo com a tensão e frequência da rede.

A grande vantagem deste equipamento é não estar sujeito às condições externas, como os equipamentos flutuantes e não provoca impacto visual dado que está debaixo de água.

Desvantagens:

- A manutenção.
- Ondas de pouca densidade energética.

2.3.3.2 *Conversor de corpo oscilante (corpos oscilantes submersos)*

Exemplo: *WaveRoller*.

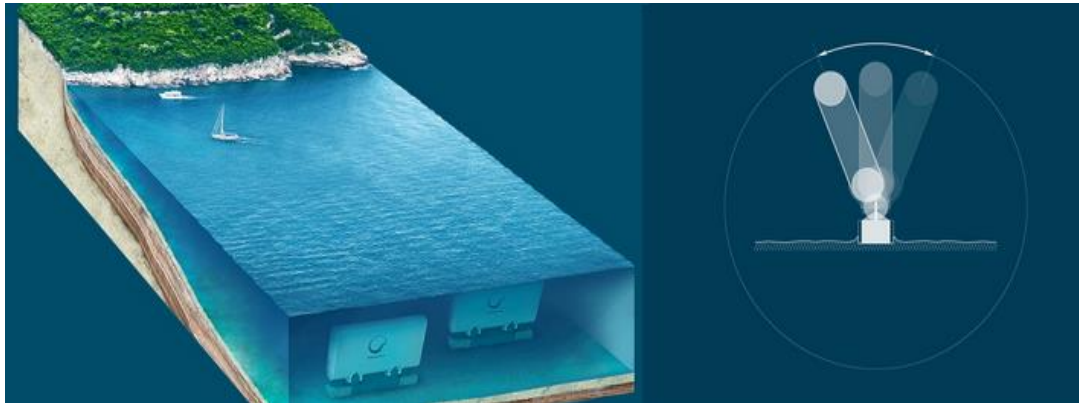


Figura 2.2 Desenho ilustrativo de um *WaveRoller* [10].

Este equipamento está ancorado no fundo do oceano e completamente submerso, baseando a sua conversão no movimento orbital das moléculas de água no fundo do mar (figura 2.2).

Em águas mais rasas esse movimento circular é perturbado, passando a descrever um movimento mais elíptico do que circular, ou seja, o fundo do mar oferece resistência à sua passagem e as ondas perdem energia/intensidade (descrito no ponto 3.1 deste documento).

A *AW-Energy Ltd* é uma empresa finlandesa que desenvolve o conceito patentado e o produto *WaveRoller*. Segundo [10] o equipamento é composto por um defletor articulado posicionado perpendicularmente à direção das ondas predominantes, conforme a passagem da massa de água o defletor move-se para a frente e para trás acionando as bombas hidráulicas de pistão ligadas ao painel, bombeando os fluídos hidráulicos para um circuito hidráulico fechado. Todos os elementos do circuito hidráulico estão instalados numa estrutura hermética dentro do dispositivo e não estão expostos ao ambiente marinho. Os fluidos de alta pressão são canalizados para um motor hidráulico que aciona um gerador elétrico. A eletricidade gerada por esta central de energia renovável é depois ligada à rede elétrica através de um cabo submerso.

Para maximizar a captação de energia, o equipamento é colocado de modo a que a dobradiça fique alinhada com o centro de pressão da onda incidente.

O *WaveRoller* tem um conceito de aplicação por módulos, ou seja, a potência instalada é dada pelo conjunto de módulos (tal como nos painéis solares/fotovoltaicos), não existindo limite de aplicação dos respetivos módulos.

A potência gerada por um único dispositivo *WaveRoller* pode variar entre os 500 e os 1000 kW. O *WaveRoller* é aplicado em águas pouco profundas, aproximadamente entre 8-20m de profundidade e entre 0,3 – 2km's da costa.

2.3.3.3 Coluna de Água Oscilante (CAO), estrutura fixa

Exemplo: CAO.

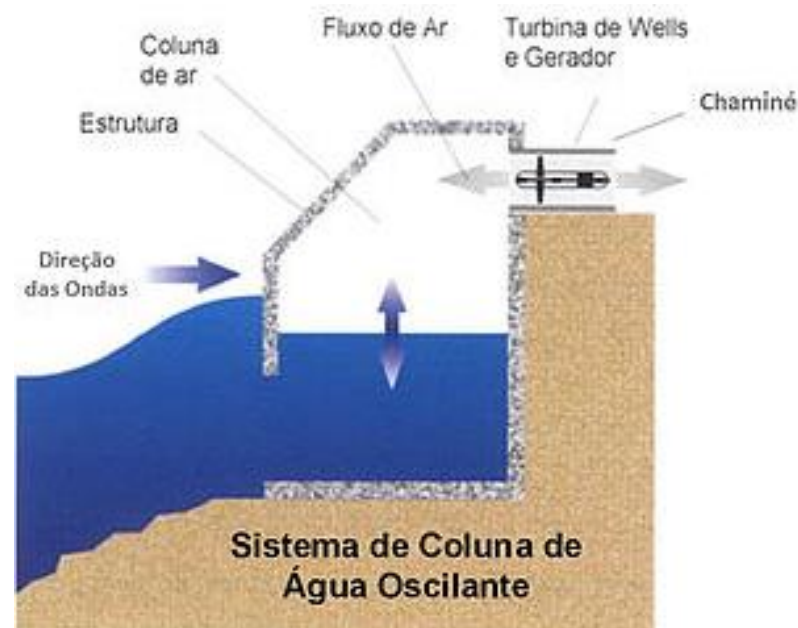


Figura 2.3 Desenho ilustrativo de uma CAO [11].

A Coluna de Água Oscilante (CAO), é constituída por uma estrutura oca de betão, formando uma câmara pneumática a baixa pressão, colocada *onshore*. O primeiro dispositivo à escala real a ser construído em Portugal foi na ilha do Pico, Açores.

Segundo o estudo efetuado em [11], o seu modo de operação consiste na variação de pressão de ar dentro da câmara, onde existe num dos lados uma abertura parcialmente submersa para o mar (abaixo da linha média do oceano) e do lado oposto uma turbina no canto superior oposto à entrada das ondas.

Conforme a onda se aproxima a água é obrigada a entrar na câmara, forçando o ar a escapar para a atmosfera através da turbina.

Quando a onda é refletida e volta a sair da câmara, o ar fora da câmara retorna a entrar passando igualmente pela turbina.

Vantagens:

- Utiliza um método simples.
- A câmara é robusta.

2.3.3.4 Galgamento (estrutura flutuante)

Exemplo: *Wave Dragon* (WD)

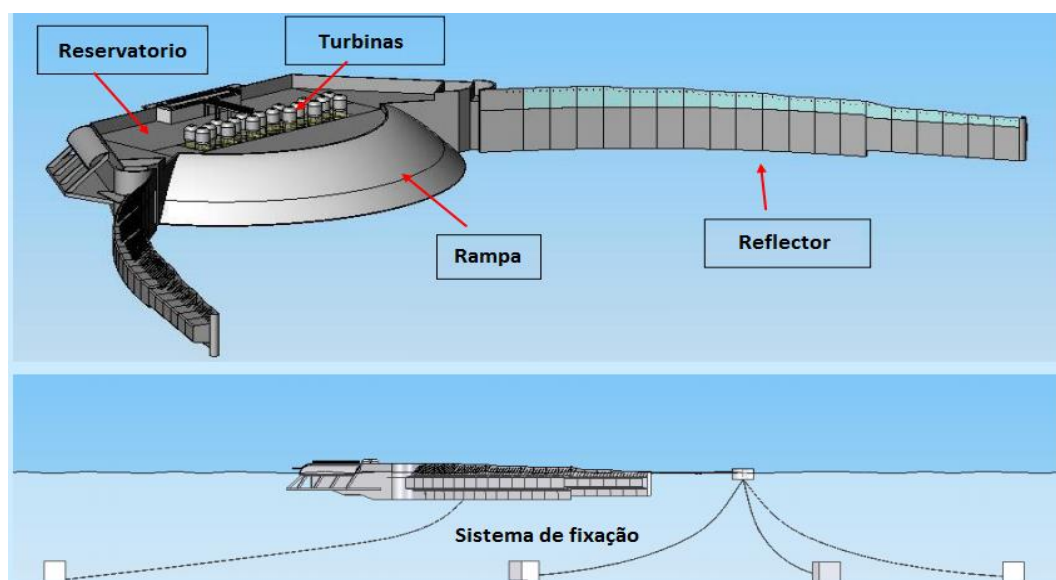


Figura 2.4 Desenho ilustrativo de um *Wave Dragon* [1].

Em abril 2003 o *Wave Dragon* foi instalado no norte da Dinamarca em Nissum Bredning, sendo o primeiro dispositivo flutuante a nível mundial conectado à rede elétrica de forma contínua [1].

Este sistema de conversão, ao contrário dos apresentados anteriormente, é um sistema flutuante com dois refletores curvos que direcionam e recolhem as ondas para a sua parte central. No centro, existe uma rampa de galgamento regulável em que a sua finalidade é abrandar a onda incidente e armazenar a água num depósito colocado acima do nível médio do mar [7].

Quando o reservatório se encontra cheio é efetuada uma descarga (por baixo) através das várias turbinas (baseado no sistema das barragens hídricas).

Apesar do sistema *Wave Dragon* ser baseado no funcionamento das barragens hidroelétricas as condições serviço das suas turbinas é completamente diferente, em

primeiro lugar a regularidade de descarga da central hidroelétrica é muito menor do que a deste conversor e em segundo a altura da queda é muito menor.

O rendimento do sistema é garantido pela utilização de várias turbinas de pequenas dimensões/potência, pois a altura da descarga é muito pequena e é necessário desligar e ligar constantemente as turbinas para uma melhor eficiência. As turbinas podem ser ligadas e desligadas individualmente e podem igualmente ser operáveis a velocidades diferentes [1].

As grandes vantagens deste sistema são:

- Robustez e fluabilidade, consoante as várias condições climáticas.
- Possibilidade de ajustar a altura da rampa a vários tipos de amplitude de onda e nível de água no depósito [7].

Tal como apresentado na figura 2.4 o sistema de amarração é essencial para a integridade do *Wave Dragon*, assim como é importante para a interação com as ondas incidentes, mantendo em posição os refletores. A âncora frontal (colocada em frente ao refletores) permite fixar o equipamento e movimentá-lo de forma circular em torno desse ponto, consoante o movimento incidente das ondas. O *Wave Dragon* deve ser aplicado em profundidades superiores a 20m.

2.3.3.5 Corpos oscilantes flutuantes

Exemplo: *Pelamis*.



Figura 2.5 Imagem ilustrativa do Pelamis [12].



Figura 2.6 Foto do Pelamis [13].

O sistema *Pelamis* é o dispositivo *offshore* mais próximo da comercialização em massa de todas as tecnologias de recolha de energia das ondas de superfície. Está patenteado e é desenvolvido pela empresa *Pelamis Wave Power Ltd* [13].

Como apresentado e descrito pelo estudo sobre o *Pelamis*, em [14], este é um dispositivo flutuante semi-submerso (120m), composto por 3/5 cilindros de ferro articulados (diâmetro 3.5m) que estão ligados/conectados entre si através de 3/4 junções articuladas com uma liberdade de movimento de 2° entre si, funcionando segundo dois eixos diferentes (arfagem/vertical e deriva/horizontal). Os cilindros são colocados para recolha de informação no eixo vertical e/ou horizontal do movimento da onda.

Cada cilindro tem no seu interior um sistema completo de conversão *PCM – Power Conversion Module* (módulos de conversão de potência), um motor hidráulico acionado pelas junções, que por sua vez ativa o gerador elétrico [1].

O movimento das junções está cingido pelos cilindros hidráulicos que bombeiam óleo em acumuladores de alta pressão, suavizando a onda irregular. O controlo desta ação de bombeamento permite a maximização da absorção energética quando as ondas são de pequenas densidades e quando se pretende minimizar a produção em caso de tempestade.

Existem, também, acumuladores que são usados para desacoplar a bomba do motor, adicionando movimento regular ao fluido de alta pressão, para produzir geração constante.

O sistema recorre, igualmente, a válvulas controladas para regular o caudal de óleo existente entre os cilindros, os acumuladores e os reservatórios estabelecendo, desta forma, diferentes combinações de funcionamento, aumentando, assim, a eficiência e rendimento.

Em caso de tempestade ou de ondas de elevada amplitude o sistema *Pelamis* está desenhado para gradualmente ir submergindo e emergindo localmente ao longo do seu comprimento, pois quando a sua secção transversal se encontra submersa a passagem da onda não afeta a sua integridade física.

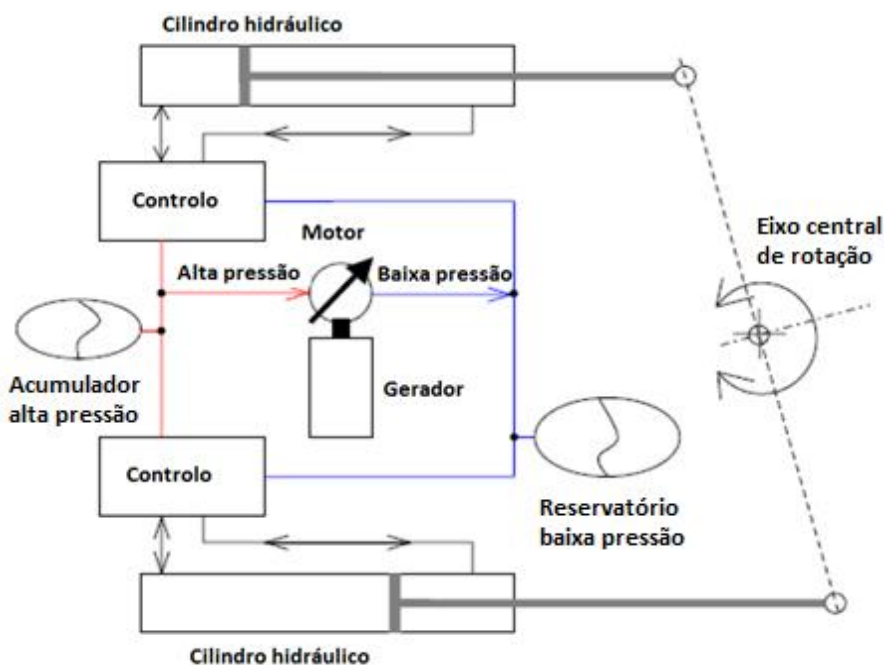


Figura 2.7 – Controle Pelamis [1].

O *Pelamis* é constituído por 3 módulos de 250kW e geradores de indução com 690V. A energia é transportada através de cabos elétricos que atravessam o interior do equipamento até ao transformador que se encontra no cilindro inicial. Após a transformação efetuada pelo transformador a energia é transferida por cabos colocados no funco oceânico [1].

Este equipamento é colocado em regiões com profundidades de 50m ou 5-10kms de distância da costa. É utilizado um sistema de boias e contra pesos para fixação do *Pelamis* no local mais apropriado para a recolha de energia e direção da propagação das ondas.

A sua eficiência máxima foi registada em ondas entre 1-2m de amplitude, mas a amplitude máxima suportada é 30m.

O comprimento total do equipamento é 180m com um peso total de cerca de 1300 toneladas. Atualmente o valor de potência está avaliado em 750kW e fator de potência entre 25 – 40 % dependendo das condições do local e da gama de onda escolhido.

2.4 Métodos PTO (*Power Take-Off*)

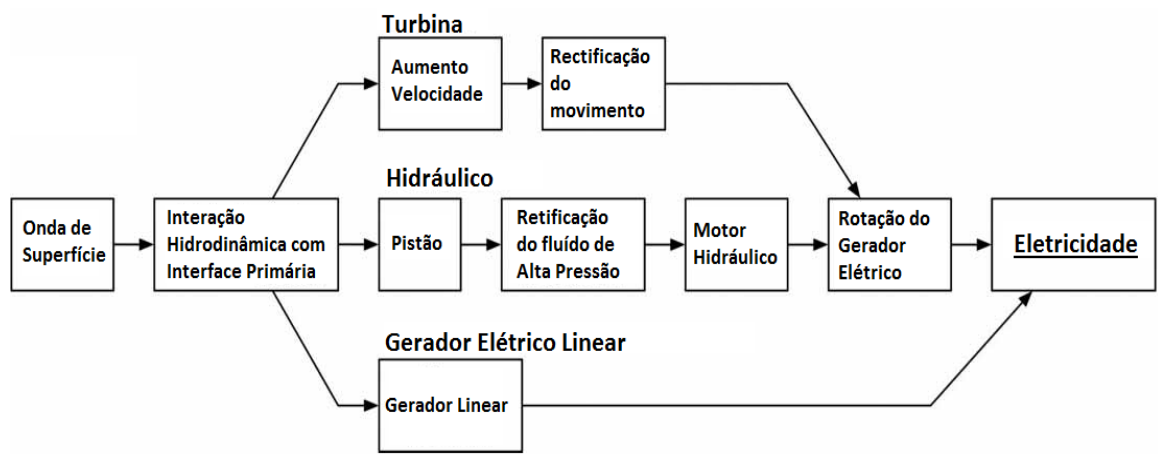


Figura 2.8 – Esquema ilustrativo dos métodos de conversão [7].

2.4.1 Turbinas

Este sistema de conversão é utilizado em estruturas fixas como o CAO/OWC ou WD.

As subestações tradicionais utilizam geradores síncronos *on-site* (turbinas), que operam a uma velocidade constante, igualando à frequência da rede.

Dependendo do *design* do conversor os geradores têm de conseguir regular a velocidade inconstante de entrada. Neste sentido, existem três tipos de geradores síncronos utilizados:

- Geradores de indução duplamente alimentados.
- Gerador de indução em gaiola de esquilo.
- Geradores síncronos de ímans permanentes.

Nas turbinas eólicas a questão foi resolvida através da introdução de uma caixa de velocidades ou através de conversores eletrônicos que convertem a corrente para *direct current*, *dc*, e novamente para *alternative current*, *ac*, para igualar a frequência e tensão da rede. Este método é extremamente dispendioso e pode originar perdas de potência, mas as turbinas conseguem capturar uma grande percentagem da energia eólica.

O gerador de indução duplamente alimentado consegue controlar a corrente e tensão no rotor mantendo o gerador a funcionar em sincronismo com a rede, mas independentemente disso existe o risco da variação de velocidade [7].

As grandes vantagens da utilização de turbinas a ar na conversão energética de ondas oceânicas deve-se ao facto de as fugas de fluido não causarem qualquer dano ao ambiente onde está integrado e o que o ar como força motriz do gerador permite que aumente a lenta velocidade das ondas em grande variação de massa de ar. Permite, ainda, a utilização de turbinas de dupla direção (CAO). A desvantagem é que a água do oceano não é simplesmente constituída pela molécula de H_2O , existem partículas/constituintes altamente corrosivos como, por exemplo, o sal cristalizado que danificam o equipamento e se opõem à eficiência [7].

2.4.2 Hidráulico

As ondas oceânicas têm uma grande aplicação de força a baixas velocidades de oscilação, o sistema hidráulico é o melhor método de conversão para estas características de recurso.

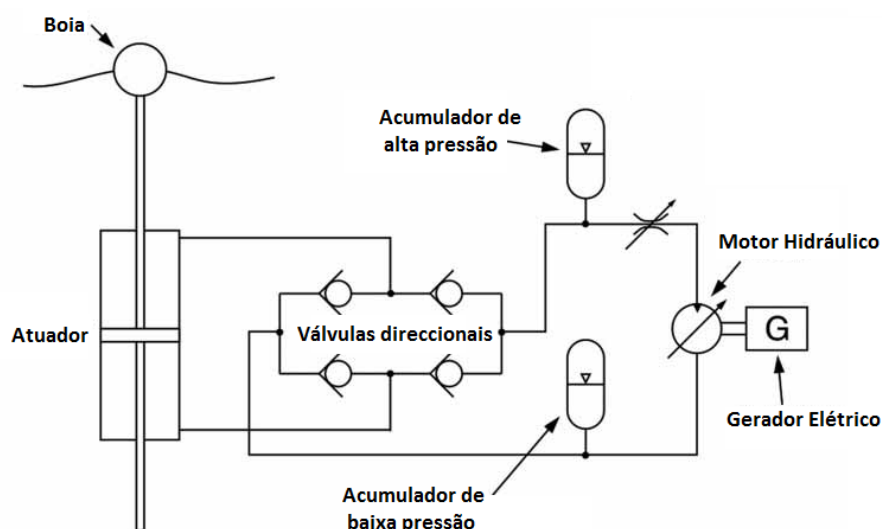


Figura 2.9 – Modelo representativo de um sistema hidráulico [7].

O sistema hidráulico capta o movimento do recurso sobre o equipamento (figura 2.9 – exemplo de uma boia), através da interação do atuador e o fluido a alta pressão dentro de cilindros hidráulicos de dupla ação. Este processo, por sua vez, irá acionar as válvulas direcionais (para detetar o sentido do movimento do fluido a alta pressão). Este movimento do fluido a alta pressão dentro dos cilindros reflete o movimento oscilatório do recurso ao motor hidráulico. Outra vantagem do motor hidráulico é a capacidade de fornecer ao gerador uma velocidade constante. A utilização de acumuladores no sistema mecânico será, assim, para armazenamento de energia e regulação do movimento do fluido para o motor hidráulico [7].

No conversor *Pelamis* o seu funcionamento hidráulico está mais explícito no ponto 2.3.3.5 do presente documento.

2.4.3 Geradores lineares

Como é possível verificar na figura 2.8 pode-se concluir que este método é muito mais simples e com menos etapas entre o *interface* primário e a máquina elétrica do que qualquer outro método apresentado, o que o favorece em relação à questão à menor necessidade de manutenção, custos e possível rentabilidade.

Este método de conversão de energia mecânica em elétrica é utilizado nos WEC como *AWS*, *Power Buoy* (WEC tipo B), representando a conversão direta de movimento (segundo um eixo de ação).

Os geradores têm as seguintes características: geometria plana, duplo estator, duplo transladador, núcleo ferromagnético e fluxo longitudinal.

O conceito deste dispositivo é a interação entre a parte fixa (estator, onde estão colocadas as bobines) e a parte móvel (transladador, onde os *ímans* permanentes estão colocados alternadamente). O movimento vertical provocado pela boia induz uma corrente elétrica no estator. O estator está conectado a uma estrutura ou superfície de fixação como, por exemplo, uma placa de arraste ou o fundo oceânico [7], [15].

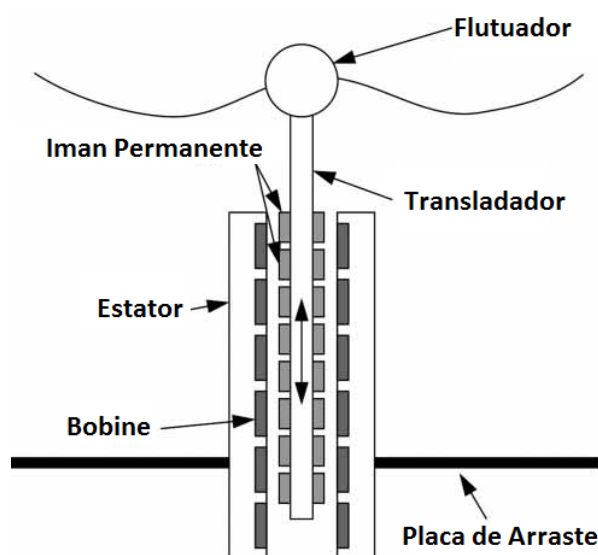


Figura 2.10 – Figura ilustrativa do funcionamento de um gerador linear [7].

É expectável que o pico de movimento oscilatório de um WEC seja de $2m/s$, ao contrário dos $5-6m/s$ de turbinas eólicas, o que implica que ainda está em desenvolvimento um gerador linear que opere a baixa velocidade, compatibilizando-se ao das ondas [7].

Uma questão vital no controlo de um WEC é o amortecimento em ondas regulares. Quando o movimento vertical não amortecido do equipamento está próximo da frequência das ondas incidentes (em fase/ressonância) é possível maximizar a eficiência do conversor de energia, ou seja, é necessário controlar o efeito de amortecimento do equipamento para determinar a rentabilidade. Se o amortecimento estiver demasiado elevado o movimento é restrito originando uma baixa produção energética, se for demasiado baixo existe elevada dissipação energética. No caso de ondas irregulares (ocorrências maioritárias), para além do referido anteriormente sobre a adaptabilidade do equipamento às alterações oceânicas, para a maximização da rentabilidade são utilizados dispositivos com ativo controlo de dinâmica através da regulação dos seus parâmetros de adaptação à onda predominante ou onda a onda. Quando maior for o controlo sobre a adaptabilidade do equipamento ao ambiente com rápidos resultados maior a sua rentabilidade [7], [16].

Outra funcionalidade extremamente importante é o cessar do movimento do equipamento e protege-lo em casos ambientais extremos que possa implicar a danificação do investimento, este mecanismo pode também ser utilizado para a sua reativação no melhor momento de sincronização com a onda incidente.

Se o movimento do conversor é sinusoidal, a força eletromotriz induzida varia com a frequência e a amplitude de cada ciclo de onda, este sinal tem de ser retificado passiva ou ativamente, ou seja, passivamente através de uma ponte de díodos ou ativamente através de um retificador eletrónico [7].

Capítulo 3

Estudo do recurso/Teoria linear

Neste capítulo será efetuado um estudo teórico sobre a teoria linear das ondas de superfície.

3 Teoria linear

3.1 Introdução

Neste capítulo caracteriza-se o recurso energético das ondas recorrendo à teoria linear das ondas de superfície. A teoria matemática que melhor descreve o comportamento da onda é a teoria de *Airy* (1845) [17]. As ondas de superfície são caracterizadas como uma forma concentrada de energia solar, visto que o vento (massa de ar) é formado pelo aquecimento não uniforme do sol em vários pontos do globo, essas massas de ar transferem a sua energia para a superfície oceânica através da resistência que a água oferece à sua passagem [1].

Sabe-se que o vento como força motriz é irregular na sua intensidade, velocidade, direção e duração quando transmite a sua energia para o oceano consequentemente, também as ondas terão diferentes amplitudes, densidades energéticas e periodicidade.

3.2 A onda - objeto de estudo

As ondas de superfície do oceano são o resultado da interação de diferentes forças. As forças predominantes são a pressão originada pela ação do vento, os sismos/terremotos, a gravidade da terra e dos corpos celestiais (a Lua e o Sol), a força de coriolis (rotação terrestre) e a tensão superficial do oceano. A formação da onda começa quando um fluxo de ar, algures no oceano, exerce uma tensão tangencial sobre a superfície do oceano, dando origem ao crescimento de ondas. Quando estas variações de fluxo de ar se encontram em fase com as ondas já existentes processam-se novos desenvolvimentos no estado de onda (capítulo 4.3). O processo de formação da onda é maximizado quando a velocidade do vento é igual à velocidade de propagação da onda. A quantidade de energia transferida e a dimensão das ondas resultantes dependerá da duração, velocidade, distância percorrida pelo vento ao longo da superfície, da profundidade e da tipologia do fundo do mar.

As ondas de superfície são classificadas como ondas mecânicas, não periódicas e de propagação transversal, ou seja, a energia da onda é transmitida através de um fluido (água) segundo o eixo Ox , mas a matéria desloca-se perpendicularmente à energia, através de movimentos circulares segundo eixo Oz , mas nunca se deslocam segundo Ox , como apresentado na figura 3.1.

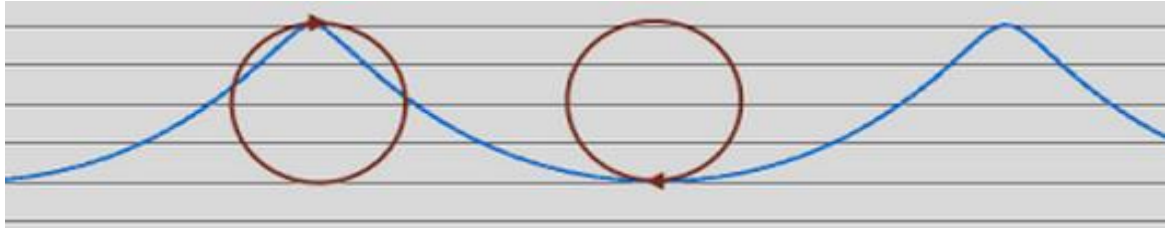


Figura 3.1 – Movimento circular da partícula à passagem da onda [16].

Em águas profundas as ondas conseguem viajar milhares de quilômetros quase sem desperdiçar energia. Quando a onda atinge águas intermédias, o movimento das partículas que antes era circular/orbital, passa a ter agora um movimento mais elíptico, porque o fundo do oceano oferece maior resistência à sua passagem à medida que a onda se aproxima da zona costeira onde as águas são rasas esta acaba por colapsar [16].

É importante ter em consideração que o movimento orbital da água decresce com a profundidade (figura 3.2), o que implica que, tanto a onda, como o fundo do oceano (em águas profundas), não têm qualquer influência entre si.

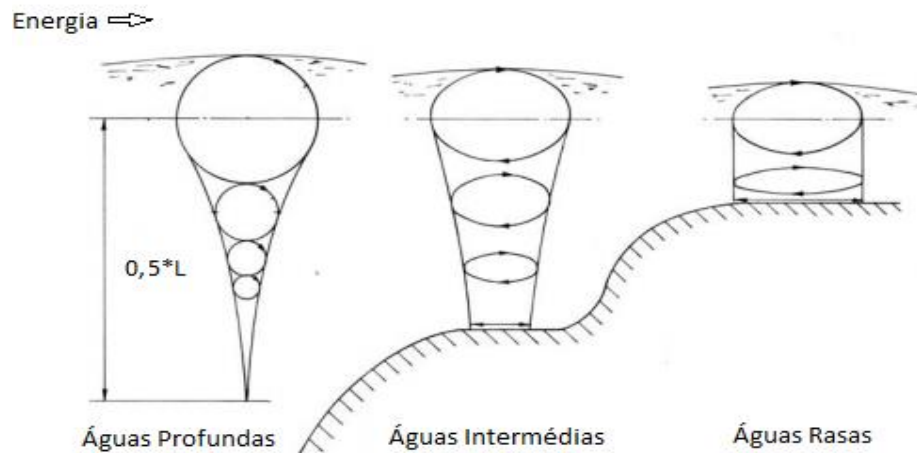


Figura 3.2 Movimento das partículas numa onda oceânica em função da profundidade [16].

Outro fator de dissipação energética é a ação da gravidade e da tensão superficial da água, que atuam como forças restauradoras do nível do mar, caso contrário a crista de uma onda manter-se-ia indefinidamente ao longo do oceano.

Em águas profundas a velocidade da onda depende apenas do seu comprimento, conforme se dá a aproximação costeira, a resistência do fundo do oceano faz com que as ondas reduzam a sua velocidade, ou seja, o comprimento de onda (λ) diminui.

3.3 Caracterização do movimento ondulatório

Para se compreender o movimento das ondas de superfície (movimento complexo, não periódico), é necessário ter-se em consideração alguns conceitos básicos sobre o movimento ondulatório periódico que as ondas descrevem num contexto simples.

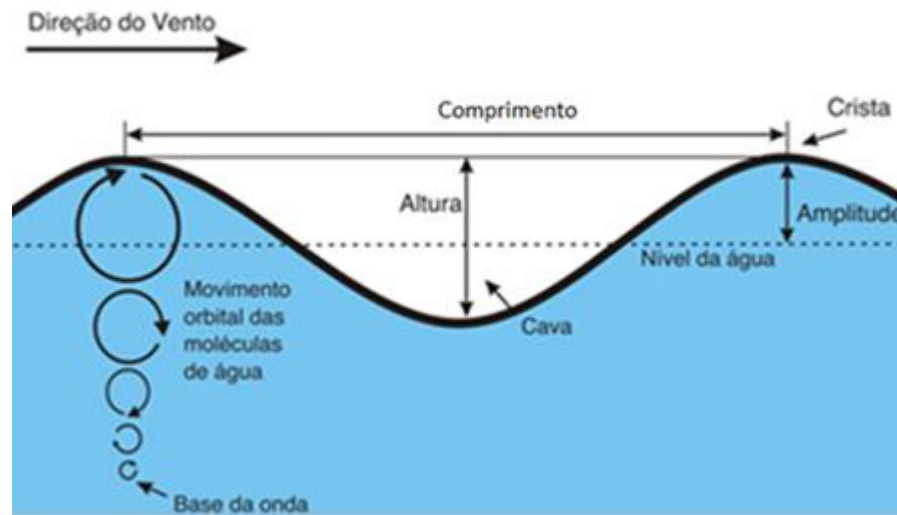


Figura 3.3 Principais características de uma onda periódica [18].

A elevação da superfície oceânica é descrita por uma curva senoide em função da posição horizontal (x) e vertical (T), caracterizando-se em termos de distância (λ – comprimento de onda) e tempo (T – período).

$$\eta(x, y) = A \sin[\omega t - \kappa x] \quad (3.1)$$

Onde:

A – Amplitude - corresponde a metade da altura de onda.

f – Frequência – número de oscilações completas que um segmento do meio executa num segundo:

$$f = \frac{1}{T} \quad (3.2)$$

ω – Velocidade angular:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (3.3)$$

κ – Número de onda:

$$\kappa = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.4)$$

3.3.1 *Características do recurso e suas equações*

Existem diversas teorias lineares das ondas oceânicas: teoria de *Airy* (as ondas descrevem num movimento senoide) e a teoria de *Stokes* (a amplitude da crista é maior e mais aguda que a cava). Consoante as características das ondas em estudo pode-se aplicar as respetivas teorias. Segundo *Stokes* e *Airy* no desenvolvimento da teoria linear é necessário reter alguns conceitos [19]:

- Considerando que u, v, w são as componentes de velocidade segundo os eixos x, y, z respetivamente, as ondas de superfície induzem movimento no resto das partículas de água e em cada ponto do fluido tem a velocidade segundo:

$$V(x, y, z, t) = u(x, y, z, t)i + v(x, y, z, t)j + w(x, y, z, t)k \quad (3.5)$$

Em que i, j e k correspondem à direção segundo cada eixo correspondente.

- As ondas são planas com cristas e cavas bem definidas, de formato sinusoidal.
- O fluído é irrotacional.
- A tensão superficial é desprezável, ou seja, não existe a formação de uma película fina que separa o meio gasoso (ar) e o meio líquido (água). Esta tensão verifica-se porque as moléculas de água exercem uma força de atração entre si maior do que a interação da água com o meio gasoso (este fenómeno normalmente acontece em águas sem perturbação).
- O efeito de coriolis devido à rotação da terra é desprezável, o fluido é contínuo.
- A lei da conservação da massa (variação da massa ao longo do tempo é nula):

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad (3.6)$$

- A água é considerada como um fluido incompressível porque o valor de compressibilidade é muito baixo, ou seja, a variação de massa específica é pouco variável aquando a variação de pressão de um ponto para o outro [20].

- A água é considerada fluido não viscoso ($\nu = 0$). De uma forma simplificada a viscosidade está associada à característica do fluido, por exemplo, o óleo é mais viscoso que a água. Viscosidade traduz a resistência de deslizamento do fluido [20].
- Fluido é incompressível (dilatação volumétrica nula), a densidade é constante ($\rho = \text{constante}$):

$$\frac{d\rho}{dt} = 0 \quad (3.7)$$

De modo a deduzir as condições da teoria das ondas regulares é necessário que se verifique a conservação da massa em conjunto com a condição fronteira.

As condições numeradas anteriormente permitem definir um potencial de velocidades $\phi(x, y, z, t)$ como a função para a qual a velocidade das partículas é igual à derivada espacial,

$$\vec{V} = \nabla\phi \quad (3.8)$$

Na expressão anterior, \vec{V} , representa o campo velocidade e ϕ a função potencial. Nas expressões seguintes estão demonstradas as componentes da velocidade segundo o eixo x, y e z respetivamente.

$$\begin{aligned} u &= \frac{\partial\phi}{\partial x} \\ v &= \frac{\partial\phi}{\partial y} \\ w &= \frac{\partial\phi}{\partial z} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Como o movimento das partículas é irrotacional, nas condições específicas da teoria linear, a equação da continuidade passa a ser descrita segundo ϕ , que é designada pela *Equação de Laplace* [21],

$$\nabla^2\phi = \frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial z^2} = 0 \quad (3.10)$$

O movimento da onda desenrola-se em dois eixos, Ox e Oz . O movimento segundo Oy não existe, pois não se considera escoamento transversal.

Na superfície livre é necessário impor duas condições fronteira.

- Condição fronteira de fundo, considerando que fundo oceânico não é permeável à água e a componente vertical z da velocidade é nula para $z = -h$, sendo h o valor entre o nível médio do oceano ($z = 0$) e o fundo:

$$w(x, -h, t) = \frac{\partial \phi}{\partial z}(x, -h, t) = 0 \quad (3.11)$$

- Condição de carácter cinemático refere que uma partícula desta superfície num determinado instante, faz parte da mesma num instante posterior. Não há mistura de fases e o fluido mantém-se na superfície livre $z = \eta(x, y, z, t)$:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \text{ para } z = 0 \quad (3.12)$$

Através das condições de dinâmica e os momentos, a expressão de *Navier Stokes*[22] é reduzida à equação de *Bernoulli* [23],

$$\frac{p_0}{\rho} + \frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta = 0 \quad (3.13)$$

Considerando a pressão (p), a condição de dinâmica de superfície e equação de *Bernoulli* para um fluido irrotacional sujeito a pressão constante (regime permanente) passa a:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta = 0 \quad (3.14)$$

Após todas as condições expostas anteriormente conclui-se com a resolução da condição fronteira de superfície:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \quad z = 0 \quad (3.15)$$

Combinando todas as condições fronteiras e a equação de *Laplace* obtém-se:

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \quad (3.16)$$

3.3.1.1 Velocidade de grupo

No oceano são geradas seqüências de ondas com vários comprimentos de onda. Dependendo da profundidade do oceano existem ondas que se propagam mais rápido que outras. Portanto, em águas profundas o meio é mais dispersivo para ondas de gravidade, porque a velocidade depende do comprimento de onda.

Celeridade é a razão entre o espaço percorrido por uma onda e o tempo que demora a fazê-lo:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{\kappa} \quad (3.17)$$

Equação da relação de dispersão:

$$\omega^2 = g \kappa \tanh(\kappa h) \quad (3.18)$$

Tabela 3.1 – Tabela de velocidade de crista ou celeridade consoante a profundidade oceânica.

Águas profundas	Águas intermédias	Águas rasas
$c = \sqrt{\frac{g}{2\omega}}$	$c = \sqrt{\frac{g}{\kappa} \tanh \kappa h}$	$c = \sqrt{gh}$

A velocidade do grupo é definida como a velocidade de um grupo de ondas movimentando-se em conjunto, ou seja, a velocidade de grupo é usada para representar o movimento de energia nas ondas e tende a ser mais lenta do que a velocidade de crista da onda.

$$c_g = \frac{\partial \omega}{\partial \kappa} \quad (3.19)$$

Tabela 3.2 – Tabela de velocidade de grupo consoante a profundidade oceânica.

Águas profundas	Águas intermédias	Águas rasas
$c_g = \frac{gT}{4\pi} = \frac{c}{2}$	$c_g = \frac{c}{2} \left(1 + \frac{2\kappa h}{\sinh(2\kappa h)}\right)$	$c_g = \frac{g\kappa h}{\omega} = \sqrt{gh} = c$

3.3.1.2 Potência associada às ondas de superfície

A energia está associada ao movimento através da transformação ou transferência de energia. Pode-se determinar a energia/potência disponível das ondas através da soma da energia cinética com a energia potencial associada à velocidade das partículas e à deformação da superfície livre contra a força da gravidade.

$$E_{cinética} (E_k) + E_{potencial}(E_p) = E_{total}(E_w) \quad (3.20)$$

$$\frac{1}{2}mv^2 + mgh = E_{total} \quad (3.21)$$

$$E_w = \frac{1}{8}\rho gH^2 \quad (3.22)$$

Por fim, a energia final transportada pelas ondas fica:

$$E_f = E_w c_g \quad (3.23)$$

Tendo em conta que a energia transportada em águas profundas tem metade da velocidade de crista e que em águas rasas igualam (tabela 3.2), para se converter a energia das ondas é necessário compreender a energia que efetivamente atinge o conversor, P_w :

$$P_f = \frac{E_w c_g}{t} = \frac{E_w A_p}{t} \quad (3.24)$$

Considerando que a área de aplicação do conversor é retangular com largura L (comprimento do conversor) por $c_g T$ (velocidade x tempo), o que corresponde à velocidade a que as ondas se deslocam para o conversor:

$$A_p = c_g T L \quad (3.25)$$

$$P_f = \frac{\frac{1}{8}\rho g H^2 c_g T L}{T L} = \frac{1}{8}\rho g H^2 c_g \quad (3.26)$$

Tabela 3.3 – Tabela de potência consoante a profundidade oceânica.

Águas profundas [W/m]	Águas rasas [W/m]
$P_f = \frac{1}{32\pi} \rho g^2 H^2 T$	$P_f = \frac{1}{8} \rho g^2 H^2 \sqrt{gh}$
Águas intermédias [W/m]	
$P_f = \frac{1}{8} \rho g^2 H^2 \frac{c}{2} \left(1 + \frac{2\kappa h}{\sinh(2\kappa h)}\right)$	

Capítulo 4

Teoria irregular

Neste capítulo será efetuado um estudo teórico sobre a teoria irregular das ondas de superfície.

4 Teoria irregular

4.1 Introdução

O perfil regular descrito na teoria linear apenas é observado quando as ondas deixam de estar sobre a influência do vento. A ação do vento cria uma constante variação de altura, período e direção tornando a onda irregular. Para modelizar as ondas reais tem de se introduzir o conceito de espectro de ondas.

4.2 Agrupamento de ondas

As ondas oceânicas que se visualizam ao longo da costa são resultantes do somatório de várias ondas com diferentes amplitudes, alturas, período. Esse somatório origina um oceano irregular (não periódico), porque o seu somatório pode aumentar/diminuir amplitude, frequência e altura da onda resultante.

Analogamente em duas dimensões (2D),

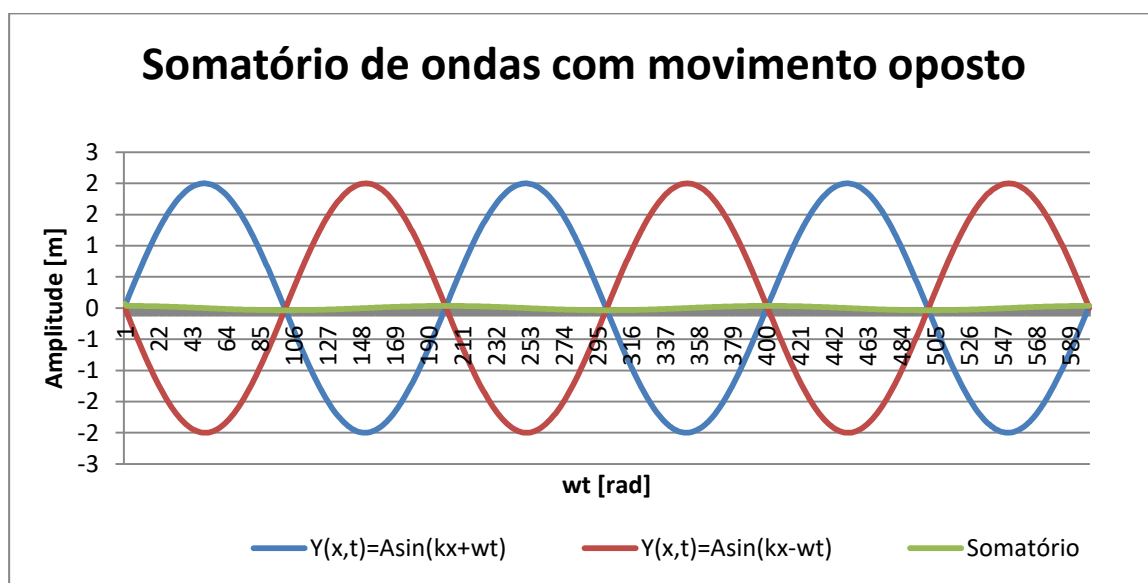


Figura 4.1 – Onda estacionária.

Verifica-se na figura 4.1, que se se tiver duas ondas periódicas, com deslocamentos opostos e com a mesma amplitude e frequência então obtém-se uma onda estacionária.

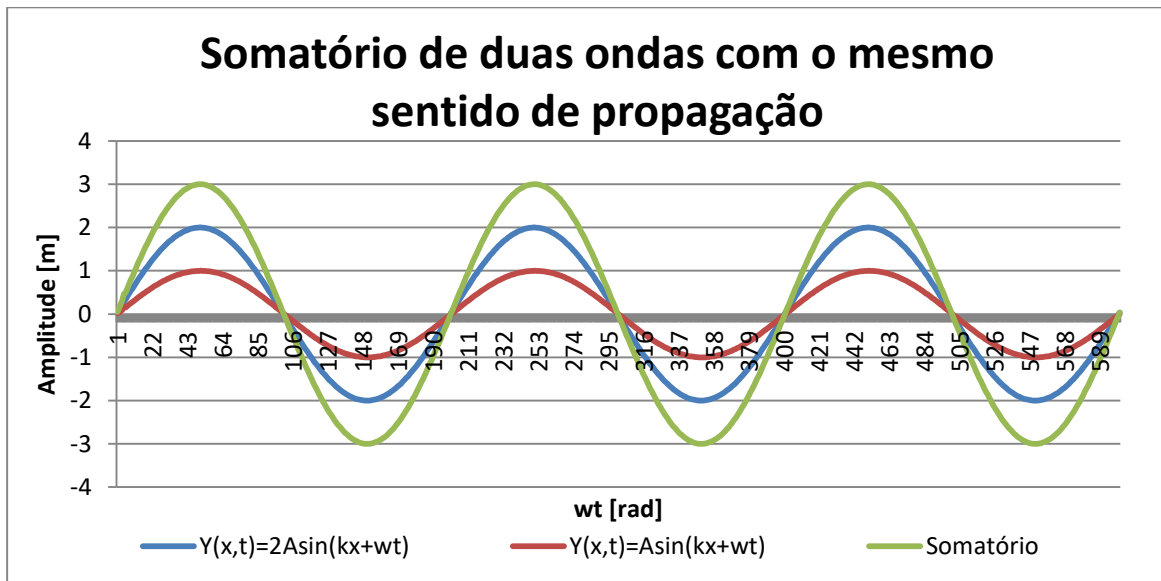


Figura 4.2 – Somatório de duas ondas no mesmo sentido 1.

Pode-se conferir pela figura 4.2 que o somatório de ambas as ondas duplicou o seu valor de amplitude apesar do seu comprimento de onda e período manter-se, ou seja, as ondas ficaram em fase.

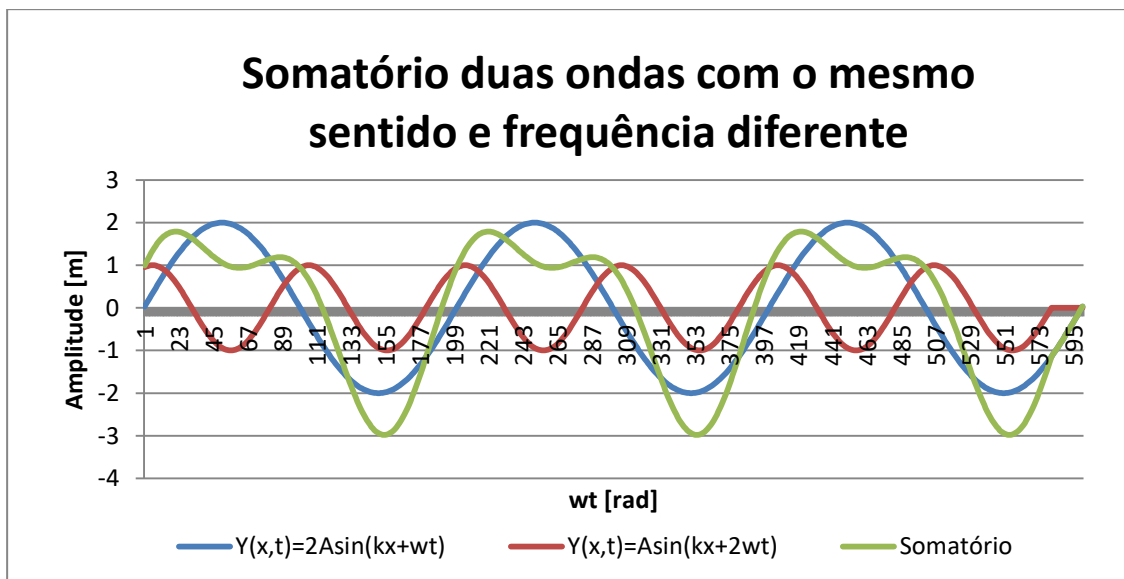


Figura 4.3 – Somatório de duas ondas no mesmo sentido 2.

Na figura 4.3 verifica-se que apesar de ambas as ondas terem o mesmo sentido de propagação, os seus períodos e amplitudes são diferentes, originando uma onda de maior complexidade de análise. Neste caso sabe-se as características das ondas primárias antes de se sobreporem, mas imagine-se que são dúzias ou centenas de ondas sobrepostas. Como se pode prever a onda resultante?

As figuras 4.1, 4.2, 4.3 são apenas exemplos para expor de forma mais alusiva a dinâmica do agrupamento de ondas, em que num fundo não teórico (como o representado), as ondas se propagam em três dimensões (3D), sentidos aleatórios e não periódicas.

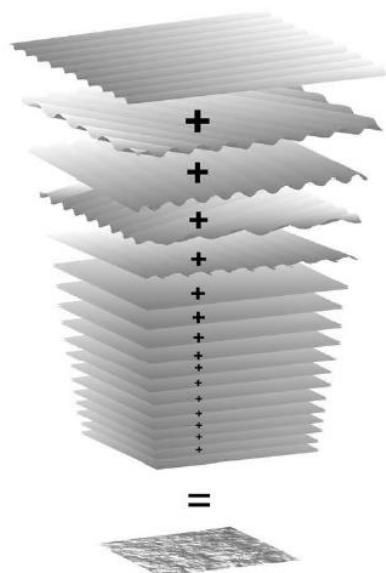


Figura 4.4 – Resultado da soma de ondas com diferentes amplitudes, comprimentos e direções [24].

Existe ainda outro parâmetro importante que permite classificar a irregularidade do estado do oceano, a fase (ε), que indica o quão distante a onda está do seu início de ciclo ou período. Começando com um ponto de referência um ciclo fica completo quando tem 360° ou 2π radianos.

ε representa o ângulo de fase que permite ter em conta o facto de diferentes ondas se encontrarem ou não em fase, isto é, os seus valores máximos ocorrerem ou não em momentos distintos. Este parâmetro está compreendido entre 0 e 1. [24]

4.3 Ondas de superfície

A natureza oceânica através da sua elevação não está descrita em apenas uma equação ou numa formulação matemática, pois o que é verificado atualmente é que o seu movimento é aleatório e extremamente complexo.

Este fenómeno tem sido demonstrado por equipamentos de medição (ondógrafos), como é o caso apresentado na figura 4.5. Os ondógrafos estão localizados em diferentes zonas do planeta para monitorização e caracterização do recurso oceânico.

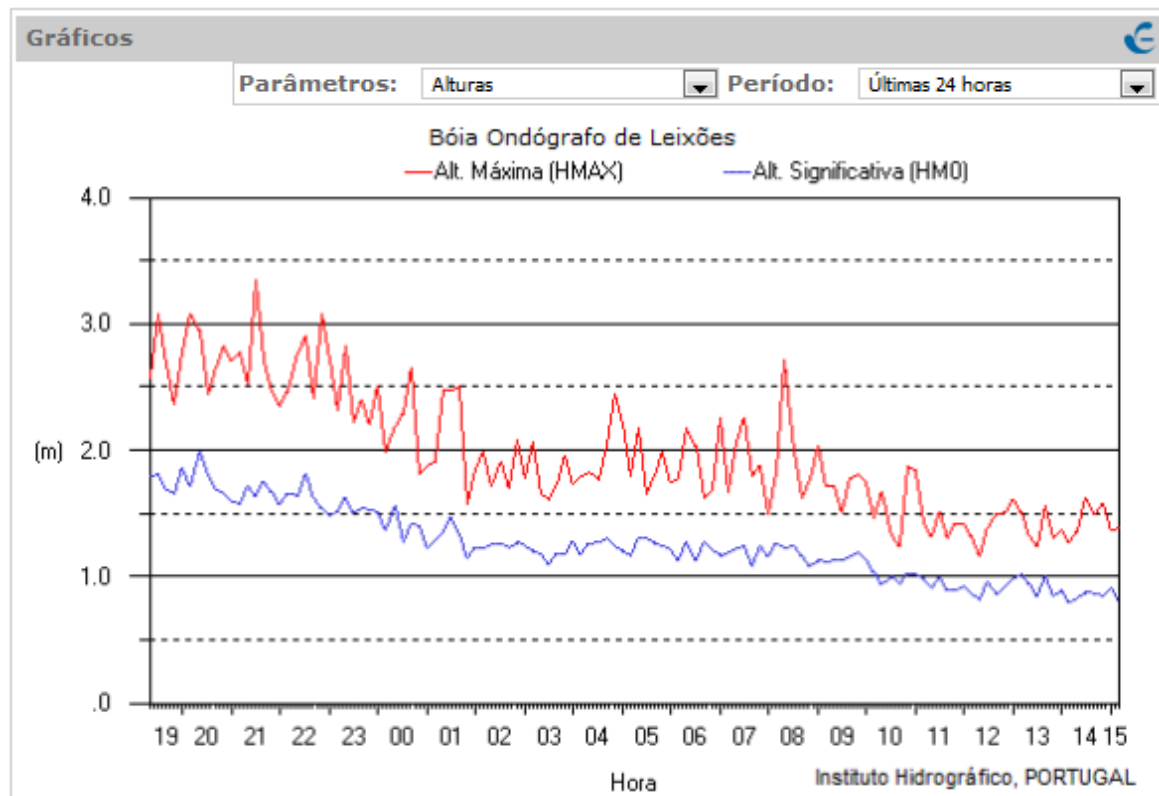


Figura 4.5 – Registo de uma bóia ondógrafo de Leixões disponível no site do Instituto Hidrográfico de Portugal.

Pode-se comprovar através com a figura 4.5 que no espaço de 24h a altura significativa não é constante nem previsível: em 24h a altura significativa (H_{mo}) desceu cerca de um metro.

Hoje em dia os ondógrafos estão equipados com diversos sensores onde é possível captar o deslocamento vertical e horizontal das ondas. A informação adquirida pela estação do ondógrafo é transmitida para a sede do Instituto Hidrográfico, onde será sujeita a um processamento de dados e armazenamento para controlo de qualidade. O computador que processa e descodifica os dados provenientes do ondógrafo fá-lo para o domínio do tempo e da frequência [24].

Para o caso de previsão da energia e elevação das ondas é necessário recorrer a processos estatísticos para se conseguir estudar as possíveis condições reais de agitação no local onde se prevê aplicação do WEC.

A análise estatística para uma série temporal da elevação da superfície da onda é, normalmente, determinada considerando que a série é composta por um número individual de ondas, definidas por passagens repetidas no nível médio da superfície da onda.

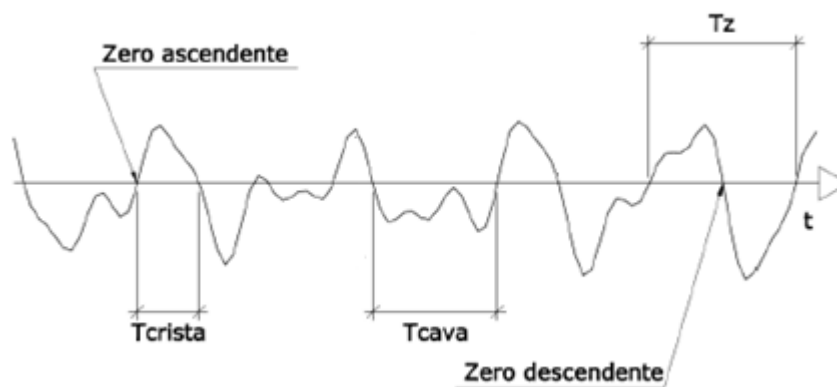


Figura 4.6 – Informação disponível num registo de elevação [27].

Atura máxima (H_{max}) – Valor máximo registado durante o tempo de observação - medido em metros.

Altura significativa (H_s ou H_{mo}) – Média da terça parte das ondas com maior altura registadas durante o tempo considerado - medido em metros.

Altura média (H_z ou H_m) – Média de alturas individuais registada para o período de observação - medida em metros.

Período pico (T_p) – Frequência com maior densidade espectral permitindo a caracterização do período de ondas dominante. Representa as ondas mais energéticas - medido em segundos.

Período máximo (T_{max}) – Valor máximo de período registado dentro do tempo de observação - medido em segundos.

Período médio (T_z ou T_m) – Valor médio de todos os valores registados dentro do período de observação - medido em segundos.

Tempo de crista – Valor medido entre o zero ascendente e descendente, ou seja, representa o tempo em que a onda permaneceu acima do nível médio do mar (crista) - medido em segundos.

Tempo de cava - Valor medido entre o zero ascendente e descendente, ou seja, representa o tempo que a onda permaneceu abaixo do nível médio do mar como cava - medido em segundos.

Tempo ente zeros ascendentes ou zeros descendentes (T_d) – Tempo de um comprimento de onda.

Historicamente, várias alturas de onda tornaram-se populares na caracterização do estado de mar, especialmente o parâmetro altura significativa, definida por Sverdrup e Munk (1947) [24].

$$H_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i \quad (4.1)$$

$$H_{mo} = H_{1/3} = 1.6H_m \quad (4.2)$$

$$H_{\max} = H_{mo} \sqrt{\frac{1}{2} \ln(N)} \quad (4.3)$$

4.3.1 *Distribuição energética das ondas*

O estudo da energia pode ser efetuado segundo duas perspectivas diferentes: pelo domínio do tempo ou pelo domínio da frequência.

- Análise pelo domínio do tempo:

Baseia-se no tratamento de dados, por exemplo, através de um ondógrafo, registrando a elevação temporal da superfície livre. Desses dados são “marginalizadas” as várias ondas para efetuar o seu tratamento estatístico, nomeadamente através da probabilidade de *Rayleigh*.

- Análise pelo domínio da frequência:

Partindo do mesmo tratamento de dados que no domínio do tempo, mas recorre-se à transformada de *Fourier*. O conceito de espectro é baseado no trabalho de Joseph Fourier (1768-1830), mostrando que uma função $s(t)$ pode ser representado num intervalo $a \leq t \leq b$ como sendo a soma de uma série infinita de funções seno e coseno com frequências harmónicas.

A análise espectral constitui uma forma alternativa de identificar, descrever e analisar sinais de *input* e converte-los/decompô-los em frequências fundamentais determinando a energia associada.

A função que descreve a elevação da onda de superfície $FT[\eta(t)] = S(f)$ é uma função não periódica ou de sinal não periódico. Assim, é necessário tornar a nossa função $\eta(t)$ numa série periódica, contínua e derivável num intervalo de tempo.

A série de *Fourier* para séries de senos e cossenos é uma série temporal, que quando é medida num ponto e definida dentro de um intervalo (a, b) pode expressar-se sob a forma de uma série trigonométrica. Sempre que se assume que a função $\eta(t)$ é periódica para $T_0=b-a$:

$$\eta(t) = a_0 \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{b-a}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{b-a}\right) \right] \quad (4.4)$$

$$a_n = \frac{2}{b-a} \int_a^b \eta(t) \cos\left(\frac{2\pi n t}{b-a}\right) dt \quad (4.5)$$

$$b_n = \frac{1}{b-a} \int_a^b \eta(t) \sin\left(\frac{2\pi n t}{b-a}\right) dt \quad (4.6)$$

Para valores de $n=1,2,3\dots$ a frequência angular para cada harmónica é $\omega_n = \frac{2\pi n}{b-a}$ sendo $\frac{2\pi}{b-a}$ a frequência fundamental.

O valor a_0 representa o valor médio da série.

A série de *Fourier* será convergente se η e a sua derivada (η') forem contínuas em todo o seu domínio.

$$E_\eta(\omega_n) = \rho g \frac{a_n^2 + b_n^2}{2\Delta f} \quad (4.7)$$

Uma vez calculados os coeficientes da série de cossenos e senos de *Fourier*, a_n e b_n , é possível determinar a energia sabendo que para cada frequência ω_n se tem energia, $E_\eta(\omega_n)$.

$$\Delta f = \frac{1}{b-a} \quad (4.8)$$

Em conclusão, as frequências apenas podem ser positivas e o espectro das séries trigonométricas de *Fourier* apenas podem ser igualmente positivas.

4.3.2 Variância

A variância de elevação da superfície de onda é calculada através da média do quadrado do afastamento da variável $\eta(t)$ em relação à sua média, tal como apresentada na equação 4.9, retém a informação de amplitude (A_i) de cada componente de frequência (f_i), e define-se da seguinte forma:

$$\sigma_{\eta}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \eta^2(t) dt = \frac{1}{2} A^2 \quad (4.9)$$

Emprega-se o espectro de variância devido à sua relação direta com a energia da onda, ou seja, a anergia da onda é proporcional à variância [24].

O espectro de amplitude, que também pode ser designado espectro de variância, tem uma certa densidade, $S_{\eta}(f)$, sendo por unidade de frequência definida como:

$$S_{\eta}(f) = \frac{A^2}{2\Delta f} \quad (4.10)$$

Em que Δf corresponde à largura de banda de frequência ou variação espectral:

$$\Delta f = \frac{1}{T_{\text{registro}}} \quad (4.11)$$

Os espectros das ondas são habitualmente representados pela junção de pontos discretos encontrados a partir da série de *Fourier*, gerando uma curva contínua.

A energia de oscilação por unidade de frequência é descrita como:

$$E_{\eta} = \rho g \frac{A^2}{2\Delta f} = \rho g \text{Var}(\eta(x, t)) \quad (4.12)$$

$$\text{Var}(\eta(x, t)) = \int_0^{\infty} S_{\eta}(f) df = m_0 \quad (4.13)$$

$$E_{\eta} = \rho g m_0 \quad (4.14)$$

4.3.3 Momentos espectrais

A análise espectral permite caracterizar a elevação da superfície do mar realizando uma descrição da distribuição de energia de um certo estado de agitação pelos períodos e direções das diferentes ondas geradas [24].

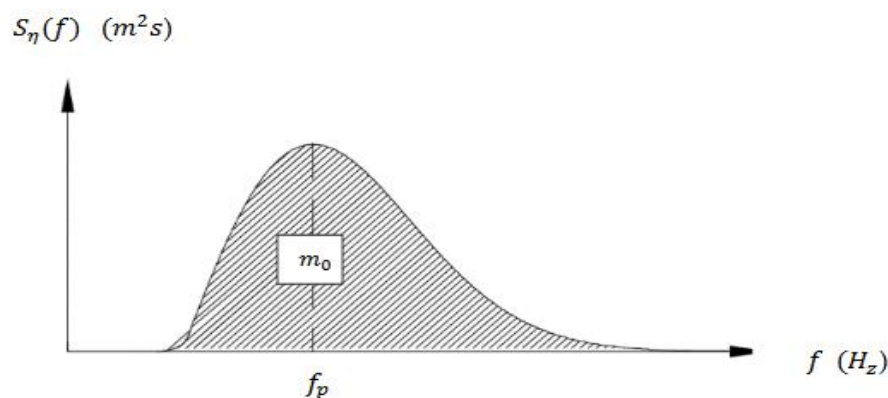


Figura 4.7 – Espectro de energia de onda ao longo da frequência [24].

A partir do espectro é possível estimar certos parâmetros que caracterizam o clima de agitação, geralmente condensada em parâmetros de H_{m0} e T_p .

Através da figura 4.7 o momento de ordem n define-se como:

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n S_{\eta}(f) df \quad (4.15)$$

$S_{\eta}(f)$, representa a densidade em função da frequência f .

Substituindo $n=0$ na equação 4.15 obtém-se toda a área total sob a curva do espectro de variância, como apresentado pela figura 4.7, em que o seu valor máximo é apresentado como o momento espectral zero e está diretamente associado à frequência de pico.

A frequência para a qual $S_{\eta}(f)$ é máximo chama-se frequência de pico (f_p), logo o seu inverso será T_p e define-se como:

$$T_p = \frac{2\pi}{f_p} \quad (4.16)$$

O parâmetro de altura significativa em função do momento espectral de ordem zero (m_0):

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0} \quad (4.17)$$

Desvio padrão:

$$\sigma_0 = \sqrt{m_0} \quad (4.18)$$

O cálculo dos momentos espectrais de ordem zero (m_0) e de primeira ordem (m_1) possibilita a dedução teórica do período de onda correspondente à frequência média do espetro:

$$\bar{T} = T_{m01} = \frac{m_0}{m_1} \quad (4.19)$$

O período médio dos zeros ascendente ou período médio de cruzamento zero é dada por:

$$T_z = T_{m02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (4.20)$$

Período médio entre picos:

$$T_c = T_{m24} = \sqrt{\frac{m_2}{m_4}} \quad (4.21)$$

T_c é designado por período entre picos e corresponde à relação entre momentos de segunda e quarta ordem do espetro.

Longuet-Higgins (1952) [25], demonstrou que em espectros de banda estreitos e em águas profundas as amplitudes de onda seguem uma distribuição de Rayleigh. Este facto torna necessário definir um indicador que permita classificar os espectros segundo a sua largura de banda (larga ou estreita) [24] e é regida pela seguinte expressão:

$$\varepsilon_s = \sqrt{1 - \left(\frac{T_p}{T_z}\right)^2} = \sqrt{\left(1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}\right)} \quad (4.22)$$

O limite inferior corresponde a um estado de mar regular, com um espetro de banda estreito ($\varepsilon < 0.6$). O caso oposto corresponde a um estado de mar irregular e largura de banda larga.

$$\begin{cases} \text{se } \varepsilon = 0 \text{ (estreito),} & H_{m0} = 4\sqrt{m_0} \\ \text{se } \varepsilon = 1 \text{ (largo),} & H_{m0} = 4\sqrt{\frac{m_0}{2}} = 2,828\sqrt{m_0} \end{cases} \quad (4.23)$$

4.3.4 Idealização matemática dos espectros

Existem diversas idealizações matemáticas relativamente ao estudo de espectros de energia das ondas. A sua análise é muito importante em ondas irregulares para o projeto de estruturas, nomeadamente no dimensionamento do WD, sendo as mais utilizadas as seguintes:

- *Pierson – Moskowitz*: utilizando um mar totalmente desenvolvido o espectro é definido pela velocidade nominal do vento a uma altura de 19.5 m ($U_{19,5}$) acima do nível do mar.
- *Jonswap* - utilizado para descrever ondas em águas costeiras, em mares não totalmente desenvolvidos. Apresenta um pico estreito.

4.3.4.1 Pierson – Moskowitz

O espectro mais conhecido e utilizado para estudo das ondas superficiais é o PM – Pierson-Moskovitz (PM). Pierson and Moskowitz desenvolveram o seu estudo durante 1964 no Atlântico Norte, [26]. Assume que o vento “sopra” constante ao longo do tempo e sobre uma larga área de ação encontra, finalmente, um equilíbrio entre as ondas e o vento. O mar está completamente desenvolvido.

É um espectro de dois parâmetros, ou seja, exige a altura significativa da onda e o período médio da onda (T_z) ou o período energético (T_e) como sinal de entrada.

A distribuição espectral PM define-se pela seguinte expressão:

$$S_{PM}(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4 f^5} e^{-1,25\left(\frac{f_p}{f}\right)^4} \quad (4.15)$$

Onde α é a constante de *Phillips* de valor 0,00811 e f_p a frequência de pico.

Sabendo a velocidade do vento à altura de 19,5m acima do nível médio do mar:

$$f_p = \frac{0,14g}{U_{19}} \quad (4.16)$$

Altura significativa:

$$H_{mo} = 0,21 \frac{U_{19.5}^2}{g} \quad (4.17)$$

Período de pico:

$$T_p = 7,1644 \frac{U_{19.5}}{g} \quad (4.18)$$

Atualmente a velocidade do vento é medida a 10m passando a ter a seguinte relação:

$$U_{19.5} \approx 1,026U_{10} \quad (4.19)$$

4.3.4.2 Jonswap

O espectro de *Jonswap* é muito similar com o espectro de PM, mas em vez de se assumir que o vento e as ondas entram em equilíbrio, as ondas continuam a crescer ao longo do tempo ou distância, o mar nunca fica totalmente desenvolvido. É mais utilizado para situações de água costeira.

A distribuição de *Jonswap* é razoável aquando os seus valores estão entre:

$$3,6 < \frac{T_p}{\sqrt{H_{mo}}} \leq 5,5 \quad (4.22)$$

Outra importante diferença é o facto de o pico no espectro de *Jonswap* ser mais proeminente devido à introdução de um fator γ (normalmente com o valor de 3.3).

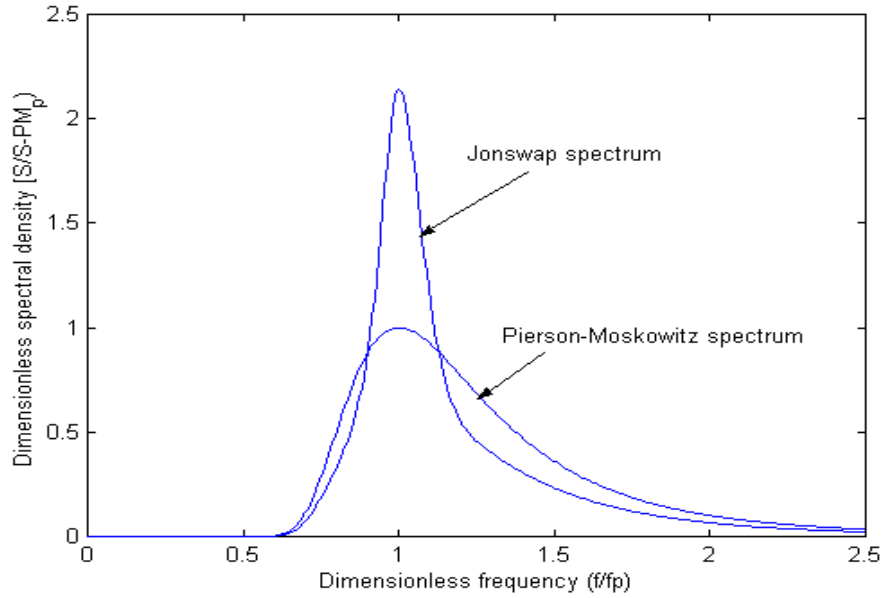


Figura 4.8 – Espectro PM e Jonswap [28].

Distribuição espectral define-se do seguinte modo:

$$S_j(f) = A_\gamma \left[\frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4 f^5} e^{-1,25 \left(\frac{f_p}{f}\right)^4} \right] \gamma^r \quad (4.23)$$

$$r = e \left[\frac{(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2} \right] \quad (4.24)$$

Tal como em PM, α é a constante de *Phillips* de valor 0,00811, f_p a frequência de pico e γ é um fator de *Jonswap* que varia entre 1 e 7.

Utilizando as constantes seguintes na expressão anterior, tem-se:

$$A_\gamma = 1 - 0,287 \ln \gamma \quad (4.25)$$

$$\gamma = 6,4 T_p^{-0,491} \quad (4.26)$$

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_a = 0,07 & \text{para } f \leq f_p \\ \sigma_b = 0,09 & \text{para } f > f_p \end{cases} \quad (4.27)$$

4.3.5 Refração, difração e reflexão

4.3.5.1 Refração

A refração ocorre quando a onda passa de um meio de propagação para outro, por exemplo, de águas profundas para águas rasas, onde existe mudança de velocidade. Fisicamente, a direção de propagação muda e comprimento de onda aumenta ou diminui, mas a sua frequência mantém-se. Este fenómeno é descrito pela lei de *Snell*.

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (4.28)$$

Onde i corresponde ao ângulo de incidência da onda incidente, r ao ângulo de refração da onda refratada, n_2 e n_1 indica o índice de refração do meio dois e um respetivamente, v_1 e v_2 correspondem às velocidades nos respetivos meios um e dois.

4.3.5.2 Difração

As cristas das ondas não se propagam necessariamente em linha reta ao longo do seu percurso, estas mudam de direção devido a fenómenos de difração ou reflexão.

Difração é a consequência da interação com obstáculos ao longo do percurso de propagação. A quantidade difratada da onda depende do tamanho do objeto. Esta é maximizada quando o tamanho do objeto é similar ao comprimento de onda.

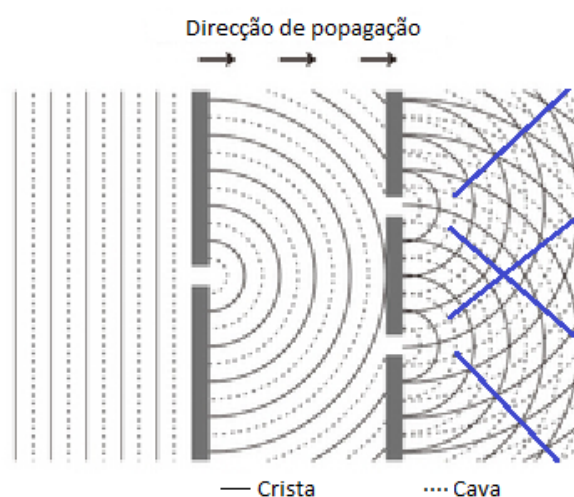


Figura 4.9 – Difração e interferência na propagação da onda incidente em obstáculo com uma abertura e segundo obstáculo com duas aberturas [29].

Na figura 4.9 verifica-se que a propagação antes paralela das ondas em direção ao obstáculo, muda para uma propagação radial após atravessar a primeira abertura. Quando se alcança o segundo obstáculo volta-se a ter, em cada uma das aberturas, uma propagação radial (igual à primeira) mas, ao contrário do que aconteceu no obstáculo anterior, as duas novas propagações têm interferência na propagação entre si. Como as duas ondas difratadas entram em interferência uma com a outra, pode originar aumento significativo da altura da onda e variação da frequência de propagação.

4.3.5.3 Reflexão

A reflexão ocorre quando a onda muda de direção após colisão com uma superfície refletiva, como os refletores do WD apresentados no capítulo 5.2, figura 5.7 do presente documento.

Tal como descrito no estudo apresentado, em [29], se a superfície refletiva for fixa e perpendicular à propagação, a onda será refletida com polaridade oposta:

$$u(x - vt) \rightarrow -u(x + vt) \quad (4.29)$$

Se a superfície refletiva não for perpendicular, a onda muda de direção com o contacto e faz com que a onda seja refletida com a mesma polaridade:

$$u(x - vt) \rightarrow u(x + vt) \quad (4.30)$$

Por exemplo:

Onda incidente:

$$u_1 = [I]e^{j(\omega t - k_1 x)} \quad (4.31)$$

Onda refletida:

$$u_2 = [R]e^{j(\omega t + k_1 x)} \quad (4.32)$$

Onda transmitida:

$$u_3 = [T]e^{j(\omega t - k_2 x)} \quad (4.33)$$

Para simplificar tem que se considerar uma propagação uniforme e não dispersiva, o que implica que as três ondas têm a mesma frequência, segundo a lei de conservação de energia:

$$u_1 + u_2 = u_3 \rightarrow I + E = T \quad (4.34)$$

Assim, com as equações seguintes, conclui-se que a onda incidente está em fase com a onda transmitida e a onda refletida estará em fase com a onda incidente se $k_1 > k_2$.

$$\frac{R}{I} = \frac{2k_1}{k_1 + k_2} \quad (4.35)$$

$$\frac{R}{I} = \frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2} \quad (4.36)$$

Em que os coeficientes de transmissão e reflexão são, respetivamente:

$$\tau = \left| \frac{T}{I} \right| \quad (4.37)$$

$$\sigma = \left| \frac{R}{I} \right| \quad (4.38)$$

Capítulo 5

Casos de estudo

Estudo da influência dos refletores e estudo da rampa de galgamento.

5 Refletores e galgamento ou “*overtopping*”

O aquecimento global e o aumento do nível médio do mar é cada vez mais preocupante, por isso a aplicação do estudo do galgamento (descrição: galgar ou passar por cima) incide em primeiro lugar nos planos de reestruturação costeira, bem como nos planos de defesa do território litoral e na proteção de pessoas e bens, ou seja, o seu objetivo é reduzir o galgamento para o seu valor mínimo. Neste documento apresenta-se a teoria do galgamento numa perspetiva de aplicação diferente, obter o galgamento para o seu valor máximo.

Partindo deste princípio, o *Wave Dragon*, dispositivo de galgamento (*offshore*) tem como objetivo aumentar o valor do galgamento ao máximo, sem provocar danos materiais na estrutura do equipamento e permitir a maior acumulação de água possível no seu reservatório.

A Dinamarca é um dos grandes pioneiros europeus no estudo de WEC à base do galgamento tendo desenvolvido um programa de estudo “Danish Wave Energy Programme”, do qual resultaram os dispositivos WD – *Wave Dragon*, WP – *Wave Plane* e PP - *Power Piramide*. Mas foi apenas em junho de 2003, mais precisamente no Nissum Bredning, que foi colocado o primeiro *Wave Dragon* a produzir energia elétrica para a rede. Estes três equipamentos têm como característica comum a utilização de reservatórios colocados acima do nível médio do mar, em que a sua energia é produzida através das descargas de turbinas. [27]

Este capítulo está dividido em quatro secções principais:

Subcapítulo 5.1 – identificação, descrição e caracterização do recurso na zona de implementação.

Subcapítulo 5.2 - descrição pormenorizada dos refletores do dispositivo WD e a sua influência na onda incidente.

Subcapítulo 5.3 – exposição dos fatores de otimização e estudo da rampa de galgamento, calculando o caudal transposto para diversas configurações diferentes de WD.

Subcapítulo 5.4 – descrição do funcionamento da descarga, identificada a melhor turbina ou turbinas e apresentação do cálculo da potência anual prevista para o melhor cenário possível.

5.1 Tratamento de dados

5.1.1 Localização

Foi solicitado ao Instituto Hidrográfico Português, IHP, [32], os dados de um dos seus ondógrafos, referentes ao período de outubro de 2015 a março de 2016, que serão utilizados para estudo na presente dissertação e que não podem ser partilhados ou divulgados sem o consentimento do Instituto.

O ondógrafo escolhido foi o de Leixões que no dia 6 de setembro de 2016, tinha a seguinte informação divulgada no seu *site*:



Figura 5.1 – Dados do ondógrafo de Leixões – dia 06 de setembro de 2016 [32].

Ir-se-á utilizar como referência a localização do ondógrafo apresentado na figura 5.1, como se fosse a pretendida para o WD em estudo. Consequentemente, a profundidade de referência será de 83m. Será considerado, também, para todos os cálculos efetuados neste estudo o valor da aceleração da gravidade de $9,8 \text{ m/s}^2$ e a densidade da água $1,025 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$.

Segundo o que se pode verificar no *site* do Instituto Português do Mar e da Atmosfera, IPMA, e segundo os dados facultados pelo IHP, as condições normais para o período de pico (T_p) no Oceano Atlântico, junto à costa portuguesa, situa-se entre 10-16s.

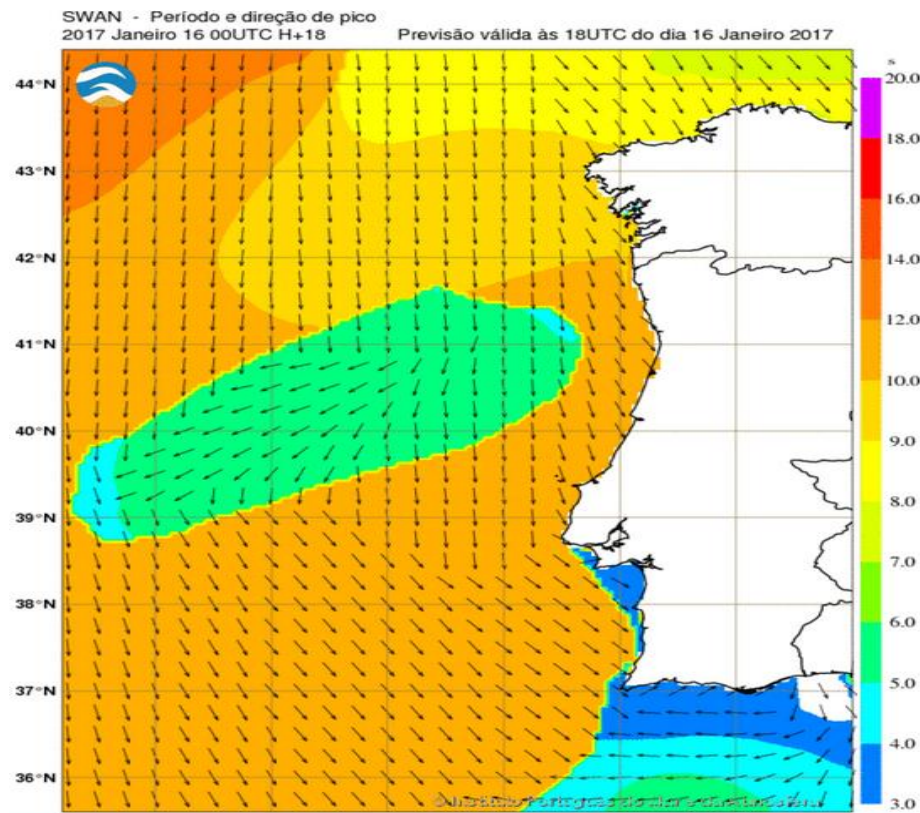


Figura 5.2 - Exemplo de T_p na zona costeira de Portugal com a sua regulação de cor – dia 16 de janeiro de 2017 [33].

Numa situação de tempestade ou em condições climatéricas adversas, o período de pico terá valores acima dos 16s, o que obrigará ao encerramento do conversor. Esta situação acontece em cerca de 5% das ocorrências (figura 5.3).

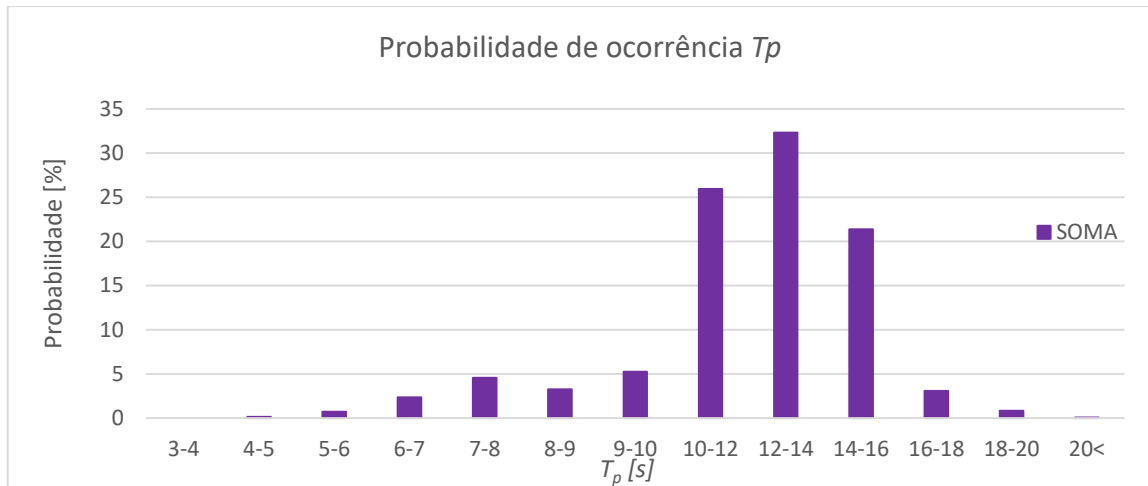


Figura 5.3 – Probabilidade de ocorrência de período de pico entre os meses de outubro de 2015 e março de 2016 - Ondógrafo de Leixões.

No gráfico apresentado anteriormente comprova-se que, para o intervalo de tempo compreendido entre outubro de 2015 e março de 2016, os valores de período de pico na zona de Leixões, variam entre 10s-16s, sendo o mais predominante entre 12s-14s.

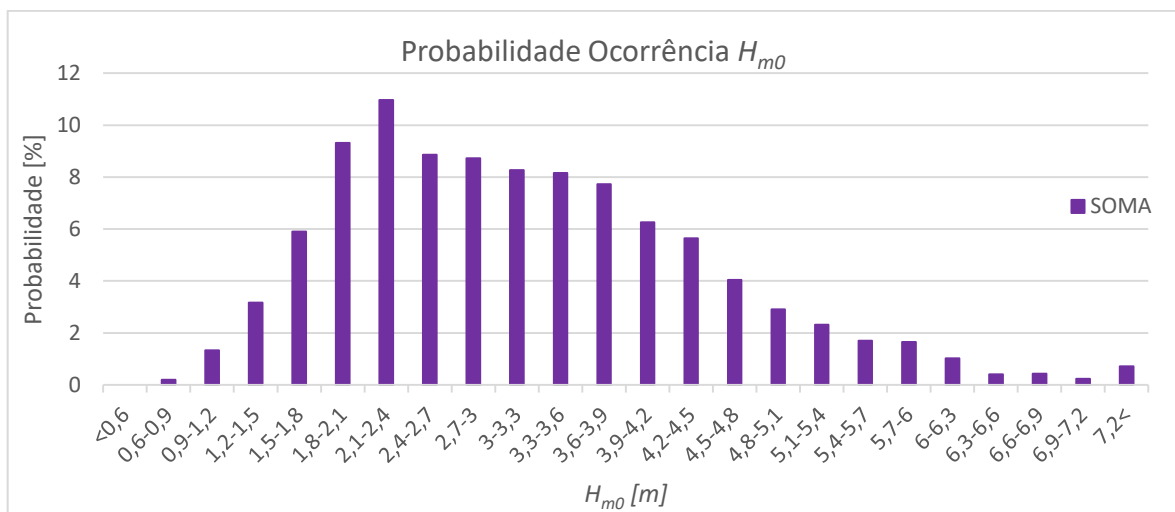


Figura 5.4 – Probabilidade de ocorrência de altura significativa entre os meses de outubro de 2015 e março de 2016 - Ondógrafo de Leixões.

Tal como já era de prever, para a ocorrência da altura significativa (H_{m0}), os valores apresentados na figura 5.4, não são tão incisivos e destacados como para o período de pico demonstrado na figura 5.3, porque as ondas apresentam diversas alterações na sua formação, o que as torna imprevisíveis sendo difícil obter um valor final.

O gráfico seguinte (figura 5.5) representa a relação existente entre os valores médios de altura significativa da onda e o período de pico. Esta relação irá permitir a determinação de valores de teste (*inputs* 1), para os cálculos futuros da presente dissertação (tabela 5.1).

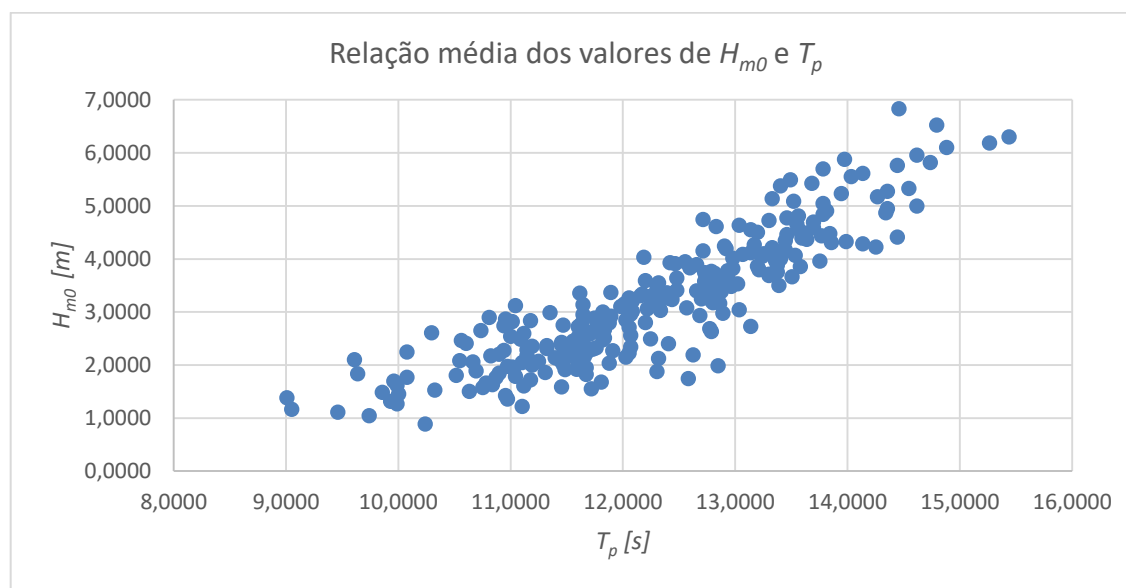


Figura 5.5 – Relação entre a altura significativa e o período de pico para os meses de outubro de 2015 a março de 2016 - Ondógrafo de Leixões.

Na tabela 5.1 e com o auxílio do *software* [34], foi possível obter os restantes parâmetros apresentados.

Tabela 5.1 – Tabela de de *inputs* em estudo.

<i>Inputs</i>	1	2	3	4	5
T_p [s]	10	11	12	13	14
H_{m0} [m]	1,5	2	3	3,5	4,2
λ [m]	115,45	139,57	165,67	193,39	222,22
C_g	7,80	8,57	9,36	9,07	10,02
$E_f = E_w \cdot C_g$ [kW/m]	22,03	43,09	105,75	133,82	223,09

5.2 Constituição do *Wave Dragon*

Este subcapítulo teve por base o documento [31], que permitiu o cálculo da influência dos refletores na onda incidente, e cujos valores estão identificados na tabela 5.1.

De seguida irá efetuar-se uma análise mais profunda sobre a constituição e funcionamento do WD desenhado por Edrik Friis-Madsen (EFM), da empresa dinamarquesa Löwenmark (complementar da introdução referida no ponto 2.3.3.4 do presente documento).

O WD do EFM é maioritariamente constituído por betão armado e tem um tempo de utilização expectável de 50 anos. Este equipamento é constituído por dois refletores que têm como principal função focar a propagação das ondas incidentes para a rampa de galgamento, produzindo um aumento da altura significativa e conseqüentemente, um maior caudal de água será transposto para o reservatório. Em casos de condições extremas os refletores poderão ser “fechados” para proteção da estrutura.

Os refletores são construídos por quinze elementos na parte principal e por elementos de transição, que são colocadas no final dos refletores e junto ao corpo principal onde se encontra o reservatório.

O WD surgiu pelo facto de apresentar vantagens importantes em relação aos dispositivos de galgamento *onshore*, nomeadamente, por não ser influenciável pela maré, pois não existe maré baixa e, porque a sua rampa é ajustável permite com que exista sempre quebra de ondas na estrutura.

A curvatura é conseguida pelo ângulo constante de curvatura entre todos os elementos, conseqüentemente, o ângulo do refletor será igual ao ângulo de junção. No esquema apresentado por EFM o ângulo de curvatura é de $1,0^\circ$.

O conector entre os refletores e o corpo principal do WD permite movimentos segundo o eixo vertical e transversal, para ajuste às ondas incidentes.

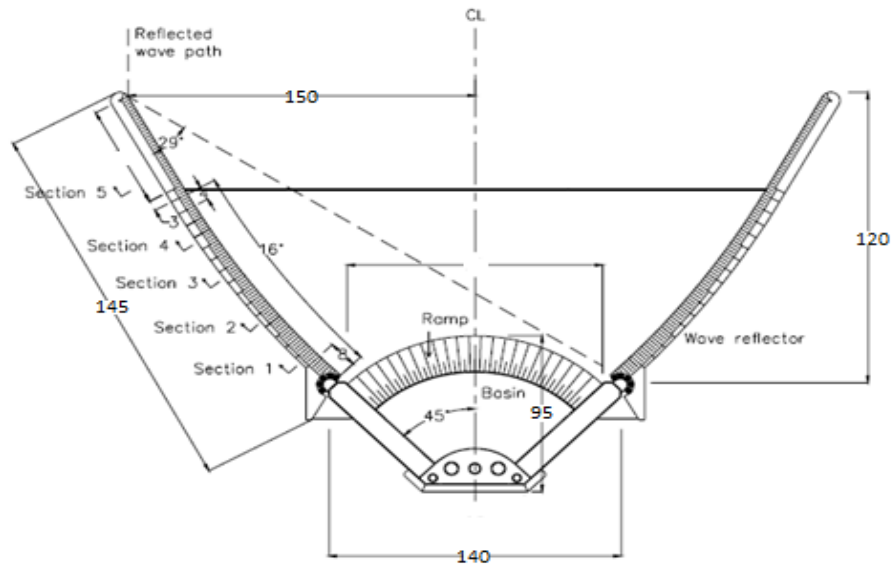


Figura 5.6 – Esquema base do WD com as medidas apresentadas no documento [35] aplicadas ao modelo EFM [31].

Na figura anterior estão descritas as dimensões utilizadas para o estudo energético do conversor WD referente a 36kW/m.

Tabela 5.2 – Dimensões e potências existentes para construção [33].

	Protótipo – 0.4 kw/m	24 kW/m	36 kW/m	48 kW/m
Peso [T]	237	22000	33000	54000
Largura [m] x Comprimento [m]	50 x 33	260 x 150	300 x 170	390 x 220
Comprimento Refletor [m]	28	126	145	190
Altura [m]	3,6	16	17,5	19
Reservatório [m ³]	55	5000	8000	14000
Nº Kaplan	7	16	16 - 20	16 - 24
Potência [W]	20k	4M	7M	11M
Potência anual [Gwh/ano]	-	12	20	35
Profundidade [m]	6	>20	>25	>30

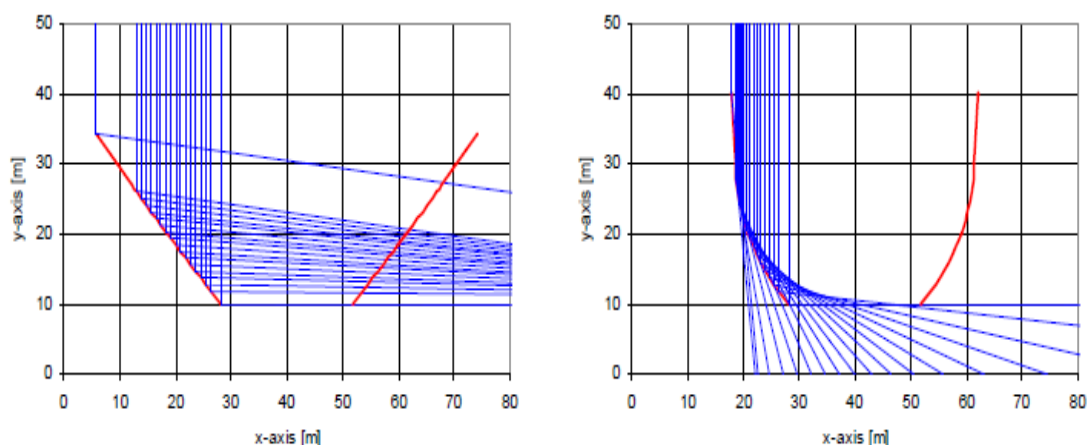
5.2.1 *Esquema de design dos refletores*

O principal objetivo dos refletores tal como o próprio nome indica, é refletir a onda incidente de modo a que a mesma se propague em direção à rampa, sem perda de energia, mas com uma altura significativa maior.

O ângulo de incidência das ondas que se propagam na direção da rampa deve ser o mais perpendicular possível. Deste modo, o *design* dos refletores deverá apresentar esse mesmo objetivo, utilizando como ponto de foco a própria rampa.

Com o objetivo de minimizar a perda de energia através da reflexão, deverão ser considerados os seguintes critérios, a partir do momento em que a onda entra em contacto com os refletores:

- As ondas devem ser direcionadas apenas pelos refletores, e só podem ser alteradas no sentido da rampa;
- A relação angular e de abertura dos refletores deve ser a maior possível;
- Permitir que as ondas redirecionadas fiquem em fase com as ondas incidentes, não refletidas, que se propagam em direção à rampa;
- Maximizar a perpendicularidade em relação à rampa após reflexão.



Figuras 5.7 – Exemplos de designs de refletores não funcionais [31].

Na figura 5.7 podem-se verificar duas falhas nos *designs* dos refletores:

- Na imagem da esquerda verifica-se que, após o contacto com o refletor, a onda em vez de ser direcionada para a rampa é direcionada para o outro refletor, originado uma dupla reflexão.
- Na imagem da direita apesar de a reflexão ser para o local pretendido, o ângulo é muito pequeno, o que permite pouco efeito de reflexão, nomeadamente nas linhas azuis mais à esquerda.

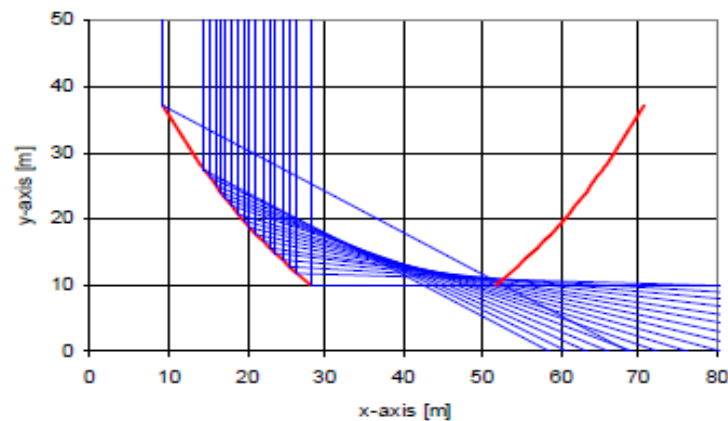


Figura 5.8 – Padrão de reflexão do design do WD proposto por EFM, com uma constante curvatura de 1.0° e relação de abertura de 2,62 e relação angular de 0,64 [31].

Na figura 5.8, afere-se que as linhas refletivas incidem exatamente a meio de ambos os “braços”, o único caso em que falha é a linha azul mais à esquerda.

5.2.2 Seleção esquemática final dos refletores

Para este subcapítulo foi tido em consideração o estudo apresentado em [31], aplicando-o e considerando que as ondas são refletidas sem perdas.

Para determinar a melhor reflexão foram tidos em conta três principais parâmetros:

- Ângulo de início – ângulo entre a direção da onda incidente e o primeiro elemento junto à rampa;
- Ângulo da curvatura;
- Ângulo da alteração da curvatura.

Estes três parâmetros manifestam-se através das expressões 5.1 e 5.2, que vão determinar a quantidade de energia que irá ser transferida para a rampa e a quantidade de água transposta para o reservatório, provocada pelo aumento da altura significativa da onda incidente através do acoplamento de fases e da otimização da reflexão.

$$\text{Relação abertura} = \frac{S_{abertura}}{S_{saída}} \quad (5.1)$$

$$\text{Relação angular} = \frac{\hat{\text{ângulo de fim}}}{\hat{\text{ângulo de início}}} \quad (5.2)$$

Manter a mesma relação de abertura, permite que a média de alturas das ondas incidentes seja relativamente constante, para um intervalo entre 40-45° de ângulo de curvatura.

Tabela 5.3 – Relação de altura significativa das ondas com ângulo de início e relação de abertura.

Ângulo de início	Relação de abertura				
	2,7	2,6	2,5	2,4	2,3
40°	1,56	1,57	1,55	1,50	1,53
45°	1,46	1,59	1,59	1,48	1,50

Os ângulos inferiores a 40° reduzem o espaço entre refletores e, conseqüentemente, originam uma redução de E_w , porque a quantidade de ondas em direção à rampa é menor.

Para ângulos muito superiores a 45° as ondas são direcionadas para fora da área de reflexão, através da abertura/entrada tal como para a relação angular superior a 0,6.

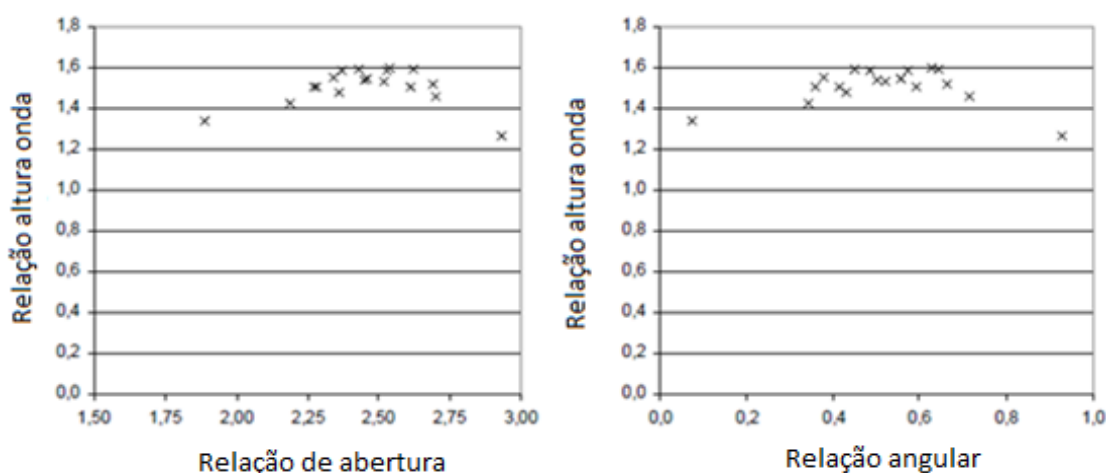


Figura 5.9 – Relação entre a altura de onda: relação de abertura e relação de angular para ondas incidentes com $T_p=3s$ [31].

Analisando a figura 5.9 e a tabela 5.3 apura-se que a situação ideal, de relação de abertura e angular, devem rondar os valores de 2,5 e 0,6.

No caso em estudo a relação de abertura tem um valor de 2,4, o que tendo em conta a tabela 5.3 o melhor valor de ângulo de início deverá ser de 40°.

O ângulo de curvatura deverá ser constante do início ao fim dos refletores.

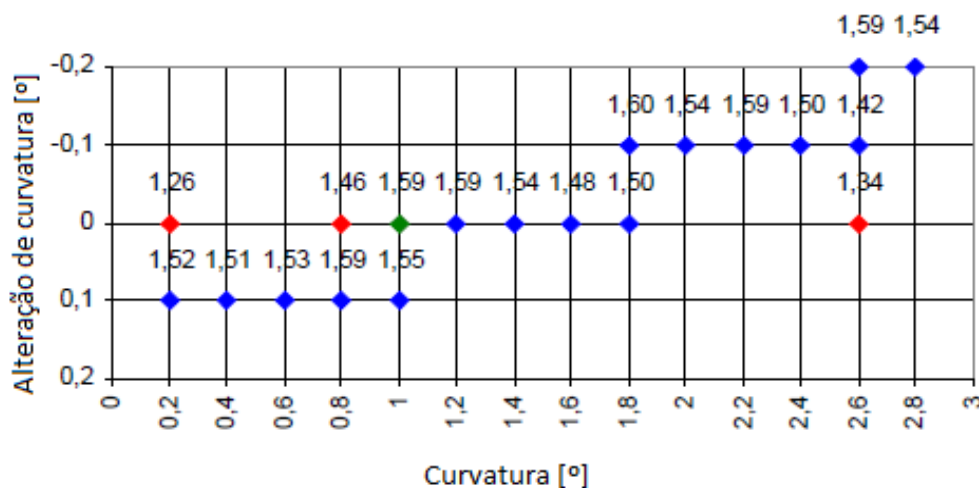


Figura 5.10 – Relação entre o ângulo de curvatura e o ângulo de alteração de curvatura, sendo os pontos vermelhos referentes aos esquemas das figuras 5.7 e a verde referente ao modelo da figura 5.8, que é o apresentado pela EFM [30].

Ao analisar a figura anterior os pontos azuis representam a melhor relação entre o ângulo de alteração de curvatura e o ângulo de curvatura, pois é através deles que se obtêm os maiores valores de altura significativa (valor a preto em cima de cada ponto). Através destes valores verifica-se a melhor relação para o acoplamento de fases entre a onda incidente e a onda refletida.

Após os estudos apresentados anteriormente, os valores de otimização do esquema em estudo neste projeto do refletor deverão ser:

- Ângulo de início = 40°
- Ângulo de curvatura = 1°
- Ângulo de alteração de curvatura = 0,0°
- Relação angular = 0,6 (ângulo de fim 16°)
- Relação de abertura = 2,4

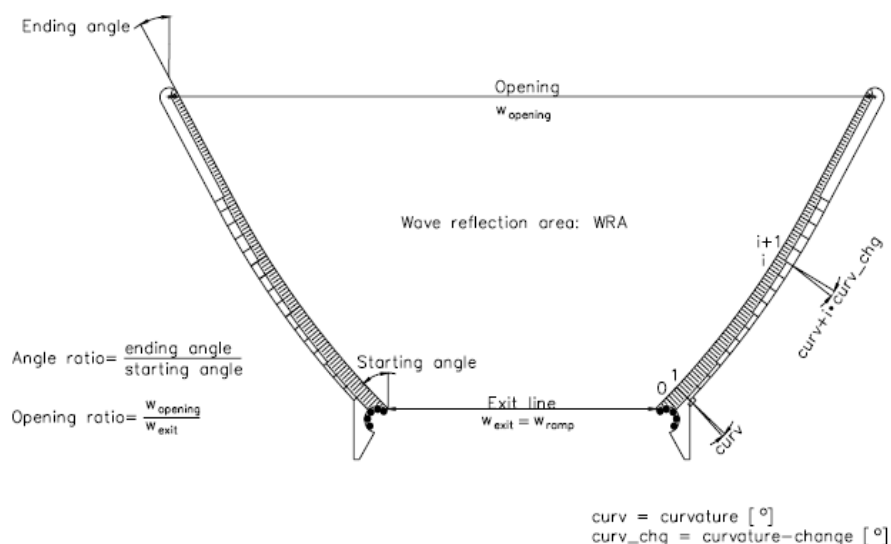


Figura 5.11 – Identificação dos parâmetros característicos dos refletores [31].

5.2.3 Consideração de elevação e energia

Efetuada a escolha esquemática dos refletores, ir-se-á determinar teoricamente e, segundo os dados do subcapítulo anterior, qual será a altura estimada das ondas incidentes no instante de aproximação à rampa e a energia associada, tendo em conta os 5 *inputs* apresentados na tabela 5.1.

Para o cálculo do valor de transmissão da energia será considerado que a energia que atravessa a secção 1 deve ser igual à energia que atravessa a secção 2 (figura 5.12), caso contrário existe perda de energia.

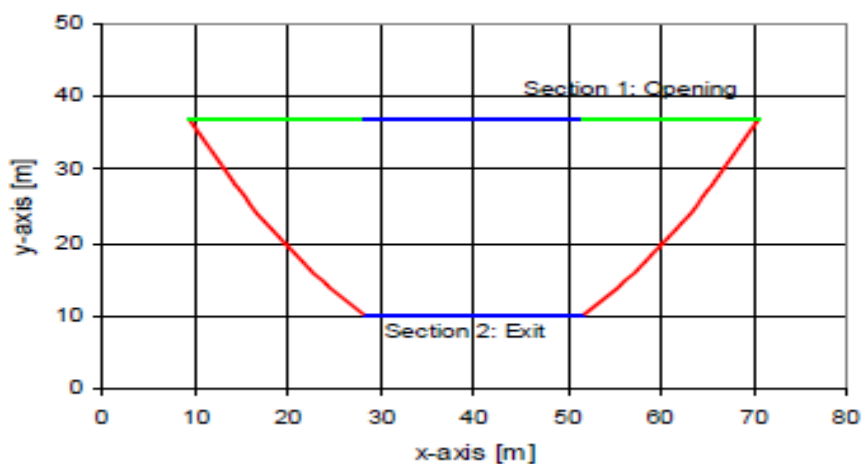


Figura 5.12 – Esquema de compreensão para o estudo da transmissão energética.

Ao contrário dos restantes *inputs*, nos 4 e 5 (águas intermédias), o fundo oceânico tem influência na energia e propagação da onda existindo, assim, um coeficiente de reflexão de profundidade associado (capítulo 4.3.5). A energia flui através de uma secção vertical e implicitamente interage com o fundo. Para os casos de águas intermédias essa medida d [m] define-se da seguinte forma:

$$\frac{L}{20} < d < \frac{L}{2} \quad (5.3)$$

Tendo em conta a equação de E_f descrita em (3.30), substituindo c_g , como apresentado na tabela 3.3 e, integrando-a segundo o limite d , obtém-se:

$$E_{f,d}(d) = E_w \cdot c_g - \frac{1}{2} E_w c \frac{\sinh 2k(h-d) + 2kh - 2kd}{\sinh 2kh} \quad (5.4)$$

O coeficiente de reflexão no que respeita à energia caracteriza-se por:

$$K_{r,E} \equiv \frac{E_{f,d}(d)}{E_f} = 1 - \frac{c}{2c_g} \frac{\sinh 2k(h-d) + 2kh - 2hd}{\sinh 2kh} \quad (5.5)$$

O coeficiente de reflexão no que respeita à altura da onda define-se por:

$$K_{r,H} = \sqrt{K_{r,E}} \quad (5.6)$$

Os coeficientes de reflexão para os *inputs* 1,2 e 3 são igual a 1, pois a influência do fundo é nula.

Sabendo que a área de reflexão é genericamente equivalente a uma meia elipse. Assim a energia é descrita da seguinte forma:

$$E_{f,meio} S_{meio} + K_{r,E} E_{f,lados} S_{lados} = E_{f,saida} S_{saida} \quad (5.7)$$

Como a velocidade de propagação e a profundidade têm valores constantes para cada situação de *input*, a altura significativa de aproximação à rampa tem a seguinte definição:

$$H_{mo,saida} = \sqrt{1 + K_{r,H} \frac{S_{lados}}{S_{saida}}} H_{mo,entrada} \quad (5.8)$$

$$Rh = \frac{H_{mo,saida}}{H_{mo,entrada}} \quad (5.9)$$

Rh corresponde à relação de alturas significativas, entre a altura da onda de entrada e saída ao atravessar os refletores.

A sobreposição de energia só é válida se se considerar que as diferentes ondas incidentes ficam em fase após reflexão. Partindo deste pressuposto, na tabela seguinte, verifica-se que a energia total que chega à rampa é consideravelmente maior com os refletores do que se os mesmos não existissem.

Tabela 5.4 – Valores teóricos de energia, coeficientes de reflexão.

<i>Inputs</i>	1	2	3	4	5
T_p [s]	10	11	12	13	14
H_{mo} [m]	1,5	2	3	3,5	4,2
Kr,E	1	1	1	0.45	0.44
Kr,H	1	1	1	0.6707	0.6631
$E_{f,saida s/refl.}$ [MW]	3,08	6,03	14.8	133.82	223.09
$E_{f,saida c/refl.}$ [MW]	47,21	92,34	226,61	202,63	335,21
$H_{f,saida}$ [m]	2,196	2,928	4,392	4,652	5,587

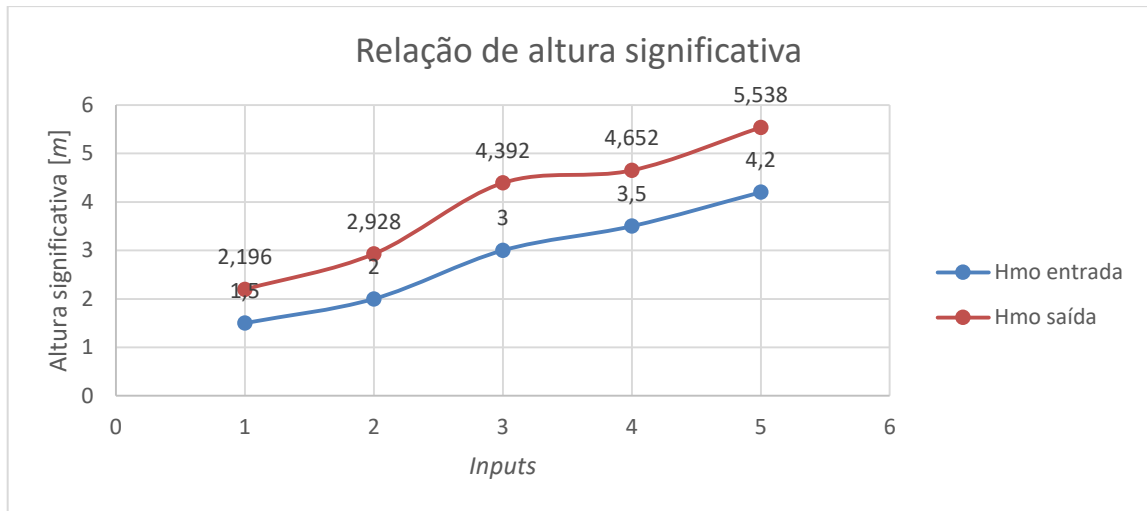


Figura 5.13- Relação entre a altura significativa da onda à entrada e à saída dos refletores.

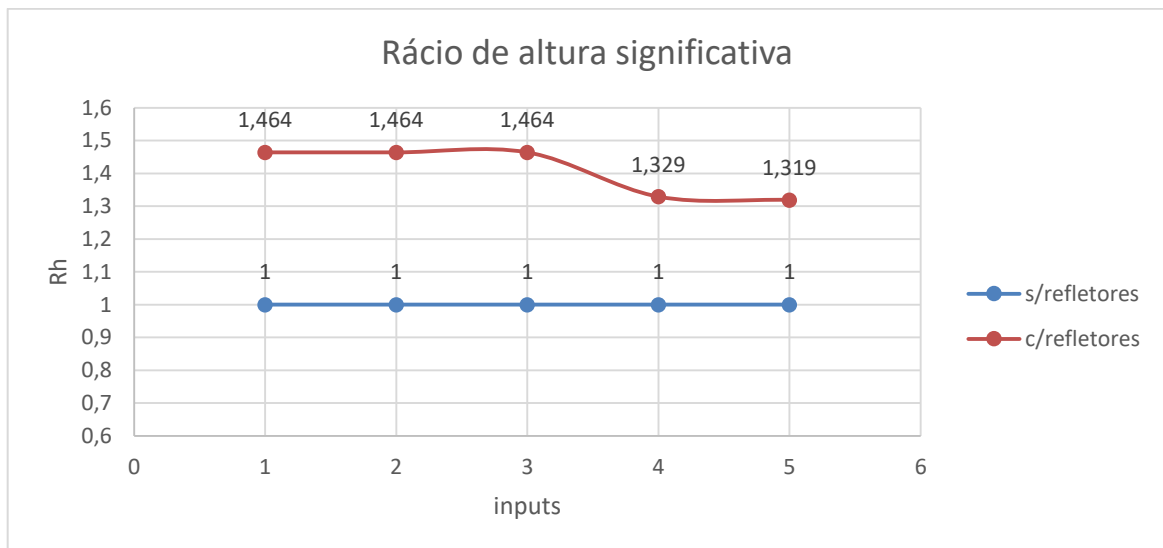


Figura 5.14 – Rácio de altura significativa.

Após análise de todos os dados da tabela 5.4 e das figuras 5.13 e 5.14 confirma-se que o principal objetivo dos refletores é proporcionar um aumento da altura significativa, direcionar as ondas refletidas o mais perpendicularmente possível em direção à rampa, para otimização do galgamento, que por sua vez poderá duplicar a energia produzida.

5.3 Fatores de otimização do galgamento

5.3.1 *Parâmetros de galgamento*

Existem diversos parâmetros que influenciam o tipo de quebra das ondas, por isso é fundamental otimizar o galgamento para um maior número de ondas incidentes. Tendo como exemplo o referido no capítulo 3.2, mais especificamente o apresentado na figura 3.2 o facto de se estar em *offshore* a profundidade não tem tanta influência no rebentamento da onda. Neste caso é a rampa e os refletores que têm mais impacto na dinâmica através da modelação do seu ângulo de abordagem à onda.

O objetivo do WD é atingir um galgamento significativo, ou seja, quando a água ultrapassa o coroamento ou “*green water*”.

5.3.2 *Conceito de steepness ou declive*

A inclinação/declive é crucial para o desfecho do galgamento, bem como a influência da quebra da onda incidente sobre a estrutura.

Declive ou “*steepness*” é a relação entre a altura da onda incidente e o seu comprimento. Esta relação normalmente indica-nos o histórico das ondas incidentes e as suas características, logo se $s_0 = 0,01$ significa que as ondas têm períodos longos (*swell* – ondas gravíticas) mas se $s_0 = 0,04$ a $0,06$ indica que é uma onda que já sofre interação do vento (*fetch*) [38].

$$s_0 = \frac{H_{m0}}{\lambda_0} \quad (5.10)$$

λ_0 – Comprimento de onda em águas profundas - $\frac{gT_0^2}{2\pi}$

O declive pode ser também calculado através do seu período médio ou de pico, T_m, λ_m ou T_p, λ_p , resultando S_{om} ou S_{op} respetivamente.

Como se pode aferir o período será o fator determinante na caracterização do galgamento, bem como a altura da onda incidente.

5.3.3 Quebra (Iribarren)

A combinação entre a inclinação da estrutura e a inclinação da onda incidente origina um tipo de quebra da onda incidente específico.

Na figura 5.15 tem-se vários tipos de quebra, consoante o declive:

- *Spilling* ou derrame: apresenta quebra em declives suaves como, por exemplo, o que acontece na Costa da Caparica;
- *Collapsing* ou rebentação: apresenta ondas, que tal como o nome indica, rebentam devido ao atrito apresentado pelo fundo, provocando normalmente grande “espuma”;
- *Plunging* ou mergulhante: apresenta ondas de *surf* que são originalmente definidas pelo tubo neste desporto;
- *Surging* ou fluxo: apresenta ondas que não rebentam, apenas entram em uniformidade com o local de quebra.

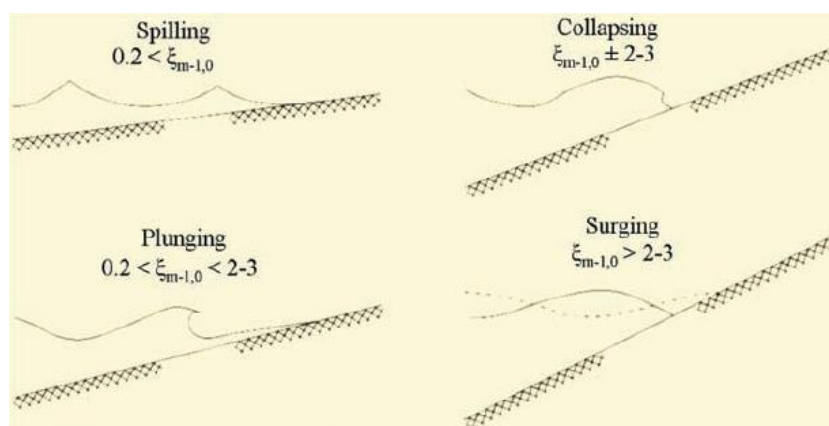


Figura 5.15 – Tipos de quebra consoante o declive [38].

O parâmetro de quebra está relacionado com o declive da onda incidente, em que o número *Iribarren* é definido por:

$$\xi_{m-1,0} \text{ ou } \xi_0 = \frac{\tan \alpha}{(S_0)^{\frac{1}{2}}} \quad (5.11)$$

α – Ângulo de inclinação da rampa da estrutura em estudo

Tal como no declive, o parâmetro de quebra pode ser, também, calculado através do seu período médio ou de pico, resultando ξ_{om} ou ξ_{op} respetivamente [35].

5.3.4 *Ângulo de incidência (β)*

O ângulo de incidência é um dos parâmetros mais importantes a analisar visto que o seu valor influencia de forma direta o galgamento e é um dos principais objetivos do uso de refletores.

O β é medido pelo ângulo entre a direção de propagação das ondas e a entrada do conversor, a rampa neste caso. Quanto mais perpendicular à estrutura for a propagação, maior será o galgamento [38], ou seja, β será 0° . Para este estudo irá considerar-se que a aproximação à rampa da onda incidente será sempre perpendicular calculando, assim, o valor máximo de galgamento para este parâmetro.

$$\begin{cases} \beta = 0^\circ \text{ incidência normal (otimizada)} \\ \beta > 0^\circ \text{ implica menor galgamento} \end{cases} \quad (5.12)$$

5.3.5 *Nível do mar*

Como se apresenta uma situação *offshore* e estuda-se uma estrutura flutuante, o nível do mar não tem qualquer influência no galgamento, não existe baixa-mar ou preia-mar.

5.3.6 *Efeito do vento no momento do galgamento*

Neste caso de estudo, o efeito do vento é um parâmetro pouco influente, pois está-se perante uma situação de extremo galgamento.

5.3.7 *Permeabilidade e rugosidade*

Para maximização do galgamento é necessário reduzir todas as formas de atrito à passagem da onda pela rampa. Assim, esta é constituída por material liso e impermeável.

5.3.8 *Fator berma*

Berma é a designação dada à plataforma ou estrutura que aparece imediatamente a seguir ao final da rampa. A berma, normalmente, tem um comprimento que permite, no conceito de galgamento, o espraiamento da onda incidente. Neste caso, a berma não existe, ou seja,

assim que a rampa termina, a água é depositada no reservatório permitindo a acumulação e armazenamento da água galgada.

5.3.9 *Estudo teórico da descarga*

Existem inúmeros estudos relativamente ao formato e inclinação indicados para rampa. Le Méhauté et al. (1968) [36] e Grantham (1953) [37] consideram que o máximo galgamento ocorre com uma onda incidente numa rampa com inclinação $\alpha=30^\circ$, por sua vez Tacpai (1974) [39] afirma que uma rampa convexa maximiza o galgamento.

Para a elaboração desta trabalho teve-se em linha de conta o estudo de [38] Van der Meer and Janssen (1995), e [39], cujo teorema foi aplicado, tanto em modelos de pequena como de grande escala e é adequado a moldes impermeáveis, lisos e de geometria direita similares à do WD.

Como apresentado, posteriormente, na tabela 5.6 deste capítulo, as ondas incidentes são do tipo *surging*, $\xi_{op} > 3$.

Assim para a determinação do valor da descarga Q serão tidas em consideração as seguintes equações:

$$Q \rightarrow Q_1 = Q_2 \quad (5.13)$$

$$Q_1 = \frac{q}{\sqrt{gH_{mo}^3}} \quad (5.14)$$

$$Q_2 = a_Q e^{-b_Q R} \quad (5.15)$$

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{mo}^3}} = a_Q e^{-b_Q R} \quad (5.16)$$

Os parâmetros a_Q e b_Q são parâmetros empíricos relacionados com o estudo de Van der Meer e Janssen (1995) e que variam consoante a geometria da estrutura.

Para ondas do tipo *breaking / collapsing* a equação será:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{mo}^3}} = \frac{0,067}{\sqrt{\tan \alpha}} \gamma_b \xi_{m-1,0} e^{-4,75 \frac{R_c}{H_{mo}} \frac{1}{\gamma_r \gamma_b \gamma_n \gamma_\beta}} \quad (5.17)$$

5.3.10 Design da rampa

O *design* original de construção do WD EFM possui uma rampa curva/convexa, que possibilita a maximização de galgamento, conforme o tipo de rebentamento predominante da onda incidente.

Nesta dissertação, ir-se-á, apenas estudar o comportamento da onda incidente numa rampa linear. Visto que não se tem acesso a todas as medidas reais da rampa ou do WD de 36kW/m (em estudo), considera-se, exclusivamente, as medidas indicadas na tabela 5.5.

A figura 5.16 apresenta o corte de perfil da representação básica de galgamento numa estrutura flutuante.

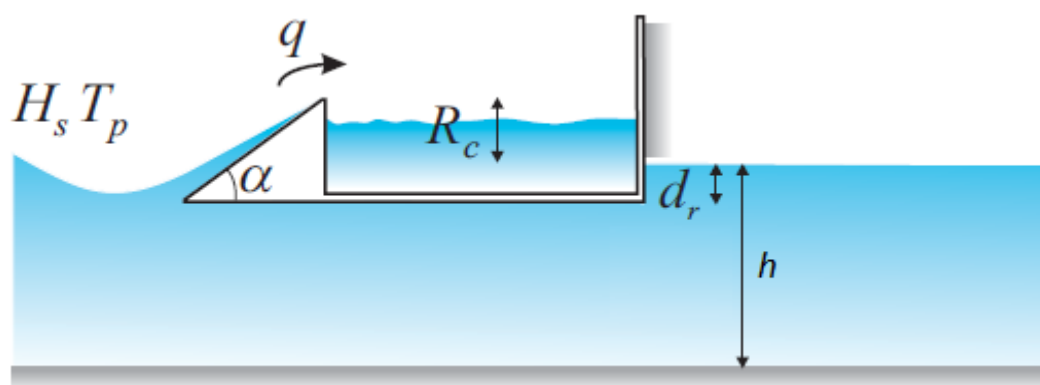


Figura 5.16 – Representação esquemática do galgamento [39].

R_c representa a cota vertical que relaciona altura entre H_{mo} e o nível médio do mar. Este está diretamente relacionado com os coeficientes $\gamma_b, \gamma_h, \gamma_r$ e γ_β , que representam respectivamente a influência da berma, inclinação da profundidade, rugosidade e ângulo de ataque. Assim, Q passa a ter a seguinte forma:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{mo}^3}} = a_Q e^{-b_Q \frac{R_c}{H_{mo} \gamma_r \gamma_b \gamma_h \gamma_\beta}} \quad (5.18)$$

A rampa apresenta um triângulo retângulo, conforme figura 5.16, com altura fixa de 17,5m (tabela 5.2). Considerando que a rampa pode sofrer ajuste angular, vai-se verificar qual a mudança na geometria da rampa para corresponder a essa variação, tendo em conta o teorema de Pitágoras.

Tabela 5.5 – Dimensões da rampa consoante os valores de alfa (α).

	$\alpha = 20^\circ$	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 40^\circ$	$\alpha = 50^\circ$	$\alpha = 60^\circ$
CI[m]	48,08	30,31	20,86	14,68	10,10
C2[m]	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5
Hip[m]	51,16	34,99	27,23	22,84	20,21

$$h - dr = 83 \quad (5.19)$$

Tabela 5.6 – Valores de iribarren para cada input.

Inputs	1	2	3	4	5
T_p[s]	10	11	12	13	14
H_{mo} [m]	1,5	2	3	3,5	4,2
s_{0p}	0,0129	0,0143	0,0181	0,0180	0,0189
$\xi_{0p}(20^\circ)$	3,71	3,53	3,14	3,15	3,1
$\xi_{0p}(30^\circ)$	5,88	5,61	4,99	5,01	4,93
$\xi_{0p}(40^\circ)$	8,57	8,15	7,26	7,28	7,15
$\xi_{0p}(50^\circ)$	12,15	11,58	10,31	10,34	11,17
$\xi_{0p}(60^\circ)$	17,66	16,82	14,99	15,03	14,77

Através dos *inputs* apresentados na tabela 5.6 todas as ondas são do tipo *surging* ou de fluxo com valores de *iribarren* superiores a 3 para ângulos de inclinação de 20° a 60°. Pode-se concluir que são ondas *non-breaking* (sem quebra), ou seja, são elegíveis para a equação de Van der Meer and Janssen apresentada na equação 5.18. Segundo o estudo apresentado, no documento [31], sendo o objetivo da inclinação da rampa permitir o galgamento da onda sem quebra da mesma, os ângulos entre 35° e 60° não afetam o galgamento significativamente, por exemplo, uma rampa com 60° de inclinação apenas reproduz 70-80% do galgamento de uma rampa com 40° [39]. Valores superiores a estes apenas

representam redução de galgamento devendo ser evitados. Assim, mantem-se o estudo com uma rampa com inclinação 40°.

Segundo Van der Meer and Janssen se $\xi_{0p} > 2$ os coeficientes a_Q e b_Q são:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{mo}^3}} = 0,2 e^{-2,6 \frac{R_c}{H_{mo}} \gamma_r \gamma_b \gamma_h \gamma_\beta} \quad (5.20)$$

Como não existe a influência da berma, inclinação da profundidade, rugosidade e ângulo de ataque, minimizando as perdas ao máximo, estes são igual a um ($\gamma_r, \gamma_b, \gamma_h$ e $\gamma_\beta = 1$).

Assim, obtem-se a equação 5.20 simplificada para:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{mo}^3}} = 0,2 e^{-2,6 \frac{R_c}{H_{mo}}} \quad (5.21)$$

Sabendo que a largura da rampa (W) é de 140m, o valor de q [m^3/s] representa o caudal transposto, passa a ser formulado da seguinte forma:

$$q = W \sqrt{gH_{mo}^3} 0,2 e^{-2,6 \frac{R_c}{H_{mo}}} \quad (5.22)$$

R_c representa a cota vertical entre o NMM (nível médio mar) e o ponto mais elevado da rampa.

Este valor é de elevada importância, pois é necessário relacionar com outros fatores de descarga, para se chegar à melhor relação de caudal transposto e energia potencial. Por exemplo, se R_c for demasiado elevado a quantidade de caudal transposto para o reservatório é menor, mas ao mesmo tempo a altura de queda para as turbinas será maior. Obtém-se, assim, maior energia potencial pela queda mas, possivelmente, as turbinas estarão mais tempo paradas porque o reservatório demora mais tempo a encher.

Expondo pela perspectiva inversa: se o valor de R_c é demasiado baixo, tem-se um elevado caudal transposto, logo está sempre a produzir energia porque as turbinas estarão sempre em funcionamento, mas a energia potencial será menor devido à altura da queda.

Assim, a equação que define a melhor a relação de R_c é dada por [38]:

$$R_{c,opt} = \frac{\gamma H_{mo}}{b_Q} \quad (5.23)$$

5.3.11 *Análise de dados*

Neste capítulo foram introduzidos novos dados de estudo, para além dos *inputs* 1, os *inputs* 2 apresentados na tabela 5.9, que representam os novos valores de altura significativa após a influência dos refletores. Estes estavam indicados como $H_{f,saída}$ na tabela 5.4.

Neste capítulo irá efetuar-se uma comparação de valores do caudal, energia e potência, para os dados de altura significativa com e sem refletores.

Nas tabelas 5.7 e 5.9 pode-se verificar a variação de caudal transposto e a sua relação para diferentes valores de R_{c1} , R_{c2} , R_{c3} , R_{c4} , R_{c5} , e $R_{c,opt}$.

Os valores de caudal de água galgado são inversamente proporcionais.

Os valores de q_{1i} e q_{2i} indicados nas tabelas 5.7 e 5.9 são provenientes das equações 5.14 e 5.15 do presente estudo.

Tabela 5.7 – Relação de valores de Rc e q para os inputs em estudo sem influência dos refletores.

<i>Input</i> 1	1	2	3	4	5
H_{mo} [m]	1,5	2	3	3,5	4,2
R_{c1} [m]	3	3	3	3	3
q_{11} [m^3/s]	0,89	5,02	33,8	61,8	118
R_{c2} [m]	2	2	2	2	2
q_{12} [m^3/s]	5,03	18,41	80,48	129,91	218,75
R_{c3} [m]	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
q_{13} [m^3/s]	11,96	35,27	124,13	188,34	298,11
R_{c4} [m]	1	1	1	1	1
q_{14} [m^3/s]	28,45	67,57	191,45	273,06	406,25
R_{c5} [m]	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
q_{15} [m^3/s]	67,69	129,43	295,30	395,88	553,63
$R_{c,opt}$ [m]	0,577	0,769	1,154	1,346	1,615
$q_{1,opt}$ [m^3/s]	59,24	91,21	167,56	211,14	277,56

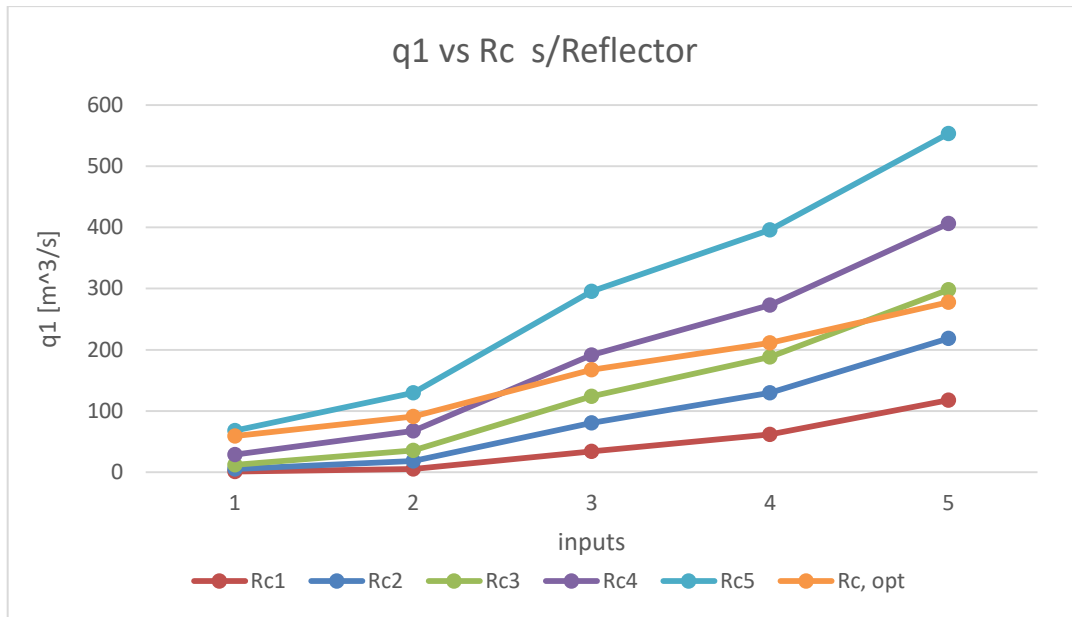


Figura 5.17 – $q1$ vs Rc para os inputs sem influência do refletor.

Como seria de esperar verifica-se na figura 5.17 que para um valor mais baixo de Rc , maior é o caudal transposto.

Tabela 5.8 – Quantidade de ondas incidentes necessárias para encher o reservatório de 8000000L (input).

Reservatório: 8000000 [L]	1	2	3	4	5
$Rc1$ [m]	9006	1594	236	129	68
$Rc2$ [m]	1591	434	99	62	37
$Rc3$ [m]	669	227	64	42	27
$Rc4$ [m]	281	118	42	29	20
$Rc5$ [m]	118	62	27	20	14
Rc, opt [m]	135	88	48	38	29

Conforme existe maior transposição de água para o reservatório menos será o número de ondas incidentes necessárias para o seu total enchimento.

Tabela 5.9 - Relação de valores de R_c e q para o input 2 em estudo com a influência dos refletores.

Input 2	1	2	3	4	5
H_{mo} [m]	2,196	2,928	4,392	4,652	5,538
R_{C1} [m]	3	3	3	3	3
q_{11} [m^3/s]	8,18	30,6	136,61	164,46	279,33
R_{C2} [m]	2	2	2	2	2
q_{12} [m^3/s]	26,72	74,36	246,93	287,59	446,69
R_{C3} [m]	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
q_{13} [m^3/s]	48,29	115,92	331,99	380,31	564,88
R_{C4} [m]	1	1	1	1	1
q_{14} [m^3/s]	87,3	180,71	446,34	502,93	714,34
R_{C5} [m]	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
q_{15} [m^3/s]	157,81	281,71	600,09	665,07	903,35
$R_{C,opt}$ [m]	0,845	1,126	1,689	1,789	2,13
$q_{1,opt}$ [m^3/s]	104,94	161,56	296,8	323,55	420,25

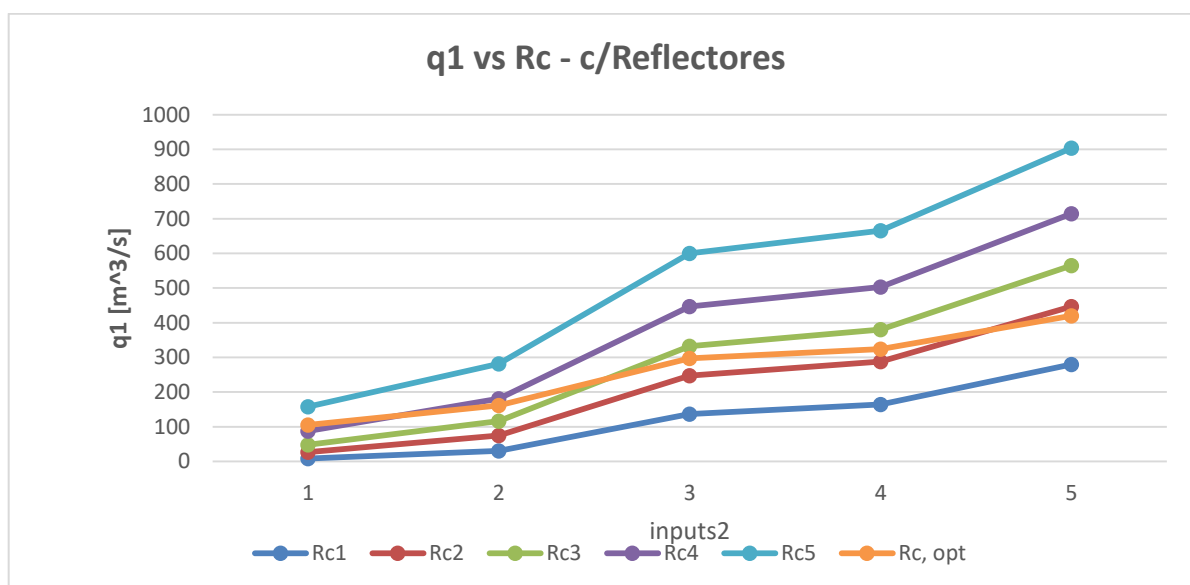


Figura 5.18 - q_1 vs R_c para os inputs com a influência do refletor.

Ao analisar-se as figuras 5.17 e 5.18, e como seria expectável, pode-se verificar que apesar de o estudo ter os mesmos valores de R_c , devido ao aumento da altura significativa provocada pelos refletores na onda incidente na abordagem à rampa, o caudal de água transposto é muito superior para o caso do *input 2*. Consequentemente decorrerá uma maior frequência de descarga das turbinas pois o reservatório estará cheio mais rapidamente e com um menor número de ondas incidentes.

Tabela 5.10 – Quantidade de ondas incidentes necessárias para encher o reservatório de 8000000L (input 2).

Reservatório: 8000000 [L]	1	2	3	4	5
<i>Rc1 [m]</i>	978	261	59	49	29
<i>Rc2 [m]</i>	299	108	32	28	18
<i>Rc3 [m]</i>	166	69	24	21	14
<i>Rc4 [m]</i>	92	44	18	16	11
<i>Rc5 [m]</i>	51	28	13	12	9
<i>Rc_{opt} [m]</i>	76	50	27	25	19

5.4 Turbinas

Depois de calculados os valores de caudal transposto para o reservatório, é necessário analisar quais as turbinas que melhor se ajustam ao *Wave Dragon*.

Alguns fatores deverão ser considerados na escolha do equipamento, sabendo que terá de ser uma turbina de baixa queda (h_t).

Optar-se-á por uma turbina simples, dupla, regulável? A descarga será em série? Estarão todas em funcionamento ao mesmo tempo? Funcionarão em cascata? Para responder a estas questões as turbinas têm de preencher diversos critérios para a sua seleção, nomeadamente:

- Tipo de turbina
- Altura de queda
- Frequência de descarga
- Tempo/intervalo de descarga
- Velocidade
- Potência
- Rendimento
- Complexidade de construção
- Rentabilidade

Em resposta às questões colocadas neste capítulo, foi necessário recorrer ao conteúdo do documento [40].

5.4.1 *Condições de funcionamento das turbinas*

Num equipamento *offshore* flutuante, como o WD, em que o reservatório se encontra no topo da estrutura, a altura de queda pode variar entre 1-5m (baixa queda) e o fluxo de descarga turbinado pode variar entre 0%-100% com intervalos muito curtos de 10-15s.

As condições de arranque são extremas sendo muito fortes e frequentes. A manutenção é difícil e os fatores de deterioração são elevados (sal, detritos).

Será fundamental escolher uma turbina que se enquadre na simples construção e elevado rendimento, que possibilite a maximização energética e rápida descarga.

5.4.2 *Comportamento da descarga*

Existem diversas formas de se proceder à descarga do reservatório mas, em primeiro lugar é necessário considerar os prós e os contras da escolha que irá condicionar a produção final da energia. Se as turbinas estão paradas apenas quando o reservatório está completamente vazio ocorre perda de energia potencial, uma vez que a percentagem de volume de água que é turbinado é menor.

Idealmente as turbinas deveriam parar apenas quando o reservatório está vazio o suficiente para receber o próximo volume de água e enchê-lo novamente. Para isso seria necessário saber, com precisão, o volume de água transposto pela próxima onda ou grupo de ondas. Todavia, ao longo desta dissertação já se demonstrou que a dimensão da onda/grupo incidente não é previsível, pois depende de muitos fatores na sua formação.

Com o objetivo de colmatar esta necessidade foi estabelecido um valor de cota mínimo (L_{min}) de água presente no reservatório (assim, não existe perda de energia potencial por descargas abaixo desse valor) em que, conforme o reservatório vai perdendo o seu volume de água por descarga total de todas turbinas, estas vão parando gradualmente, por setores, até que todas cessam a atividade quando a água chega à sua cota mínima.

É mais rentável o esvaziamento do reservatório através de um processo gradual do que num integral, ou seja, de uma só vez.

Para águas profundas o valor da cota L_{min} pode ir até cerca de 0,5m, o que significa que para manter a água a esse nível é necessário que as turbinas mudem frequente e muito rapidamente de velocidade de descarga com alguns períodos de completa paragem em alguns setores.

5.4.3 Tipo de turbinas disponíveis

Quando se estudam quais as turbinas a aplicar num determinado tipo de descarga deve-se recorrer ao diagrama da figura 5.19 para se proceder à escolha.

Para uma altura de queda entre 1-5m, tem-se duas opções de escolha, ou a *Kaplan Bulb* ou a *Cross Flow*, pois são as que se situam dentro dos limites da banda. Transgredir os limites da banda inferior significa que a turbina será lenta na sua descarga, desnecessariamente grande e mais dispendiosa. Por outro lado, a transgressão do limite superior da banda terá consequências físicas no equipamento.

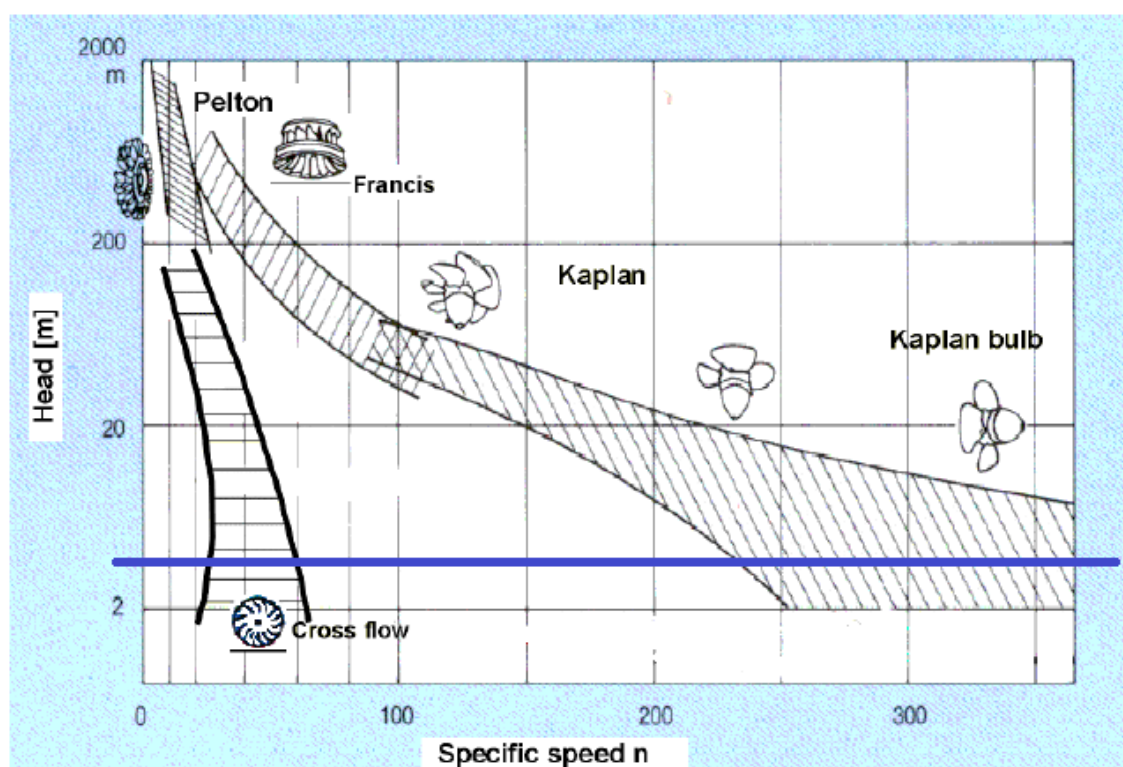


Figura 5.19 – Diagrama de modelos mais comuns de turbinas e a sua relação com altura de queda [40].

A escolha da turbina *Cross Flow* não será a melhor opção. A sua aplicação será bastante difícil porque não consegue assegurar que a mesma não trabalhe à tona da água quando uma vez existe pressão induzida pelas ondas flutuantes.

Através deste diagrama conclui-se que a opção mais adequada é a turbina *Kaplan Bulb*.

5.4.4 Características da turbina Kaplan Bulb

Dentro das turbinas *Kaplan Bulb* existem diversas características a ter em consideração para adaptar ao WD. Sempre que uma turbina é requisitada para operar numa gama variada de alturas de queda e fluxo de descarga, é importante que a sua curva de eficiência se mantenha o mais horizontal possível (constante).

A turbina *double regulated Kaplan Bulb* (duplamente regulável) consegue recriar essa curva de eficiência e tem a capacidade de diversos dos seus componentes poderem ser ajustados a certas condições de operação. Consequentemente, a sua construção é muito mais complexa o que representa grandes custos de produção e maior necessidade de manutenção para condições extremas.

Assim, foram recriadas as turbinas *single unregulated (propeller e semi-kaplan)* como variantes da turbina *Kaplan* (tabela 5.11), que são mais simples no que concerne à sua construção, mas a sua curva de eficiência é mais restrita.

Na tabela seguinte podemos comparar as características das turbinas *double*, *single regulated* e *unregulated* compatíveis para o nosso modelo e escolher a mais rentável, este estudo foi em base uma situação $H_{m0} = 3 \text{ m}$ e $Q=125 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabela 5.11 – Comparação entre *single unregulated* e *double* turbines [40].

	<i>Double regulated kaplan</i>	<i>Semi-kaplan turbine</i>	<i>Propeller turbine</i>	<i>16 fixed speed on/off turbines</i>	<i>16 variable speed on/off turbines</i>
η_{opt}	0,93	0,90	0,90	0,91	0,91
$\bar{\eta}_{(H)}$	0,85	0,68	0,39	(0,90)	(0,90)
$\bar{\eta}_{(Q)}$	0,87	0,87	0,81	0,66	0,90
Robustez	-	0	+	+++	+++
Preço Turbina + Gerador	2,4	2,2	2,0	0,8	2,1

Nas linhas 2 e 3 da tabela anterior pode-se comparar os rendimentos médios para um fluxo variável entre 10 - 100% e o rendimento médio para uma altura de queda variável entre 1.4m - 4m.

Na 5ª e 6ª linha está expressa a relação entre robustez e o custo de produção.

Inicialmente a escolha poderia recair sobre a *double regulated kaplan*, porque a sua rentabilidade é superior às restantes, mas é uma turbina cara e de difícil manutenção, não trás consolidação à estabilidade e viabilidade do WD. As turbinas *single regulated* como a *propeller* e a *semi- kaplan* são as de mais baixo rendimento, mas têm a vantagem de exigirem uma construção mais simples, por isso economicamente mais viável.

Como se pode observar na tabela 5.11 os dados comparativos que constam nas três primeiras colunas só podem ser válidos para instalação única de turbina e a funcionar a velocidade constante. Os valores elencados nas colunas seguintes, da referida tabela, irão ser objeto de estudo nos próximos capítulos, sobretudo no que respeita às vantagens e desvantagens em relação à utilização de grupos de turbinas.

5.4.5 *Múltiplas turbinas*

Será mais vantajoso o WD ter apenas uma grande turbina ou múltiplas pequenas turbinas?

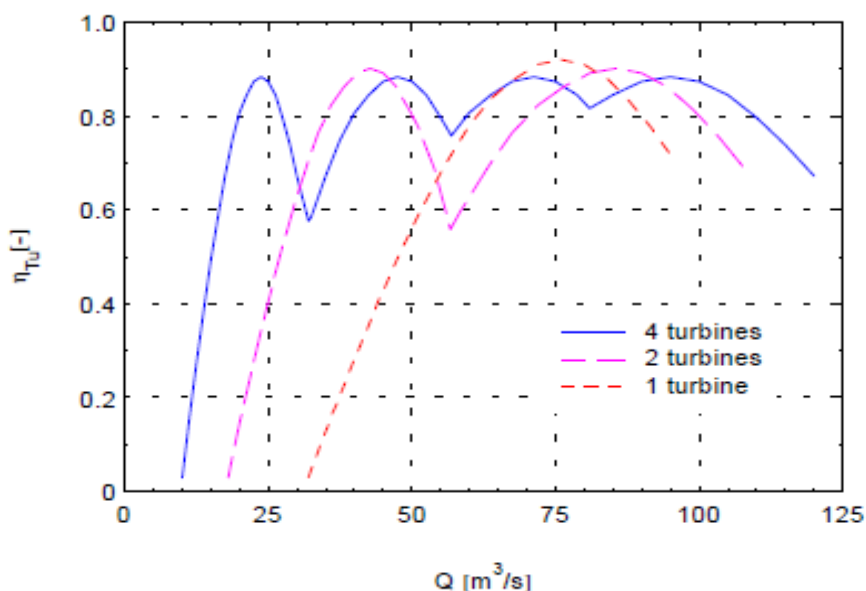


Figura 5.20 – Eficiência das turbinas para instalação simples ou múltipla vs caudal médio [40].

Ao se analisar a figura 5.20 pode-se verificar que o rendimento dado por quatro turbinas é o que se mantém mais horizontal/constante no conjunto das três opções.

Vantagens da utilização de múltiplas turbinas:

- Quando é necessário efetuar a manutenção ou a reparação do equipamento, se se está perante uma única turbina a descarga terá que ser interrompida, contrariamente num modelo com múltiplas turbinas só é necessário parar uma única unidade, as restantes mantêm o normal funcionamento.
- Turbinas mais pequenas têm velocidades maiores, o que é extremamente positivo para o intervalo de descarga e, conseqüentemente, o custo do gerador será inferior.
- Turbinas menores têm tubos de sucção menores, o que favorece o esquema final do WD.
- Quando existe um baixo fluxo de descarga, o rendimento de apenas uma turbina é menor, no caso de múltiplas turbinas é possível regular a descarga ativando apenas algumas das turbinas e aumentando assim o rendimento.

Nas situações em que as turbinas operam numa elevada gama de velocidades e alturas de queda, adaptando a velocidade à altura de queda (através de um gerador e de um conversor de frequência) é possível manter a eficiência quase constante, originando uma auto regulação.

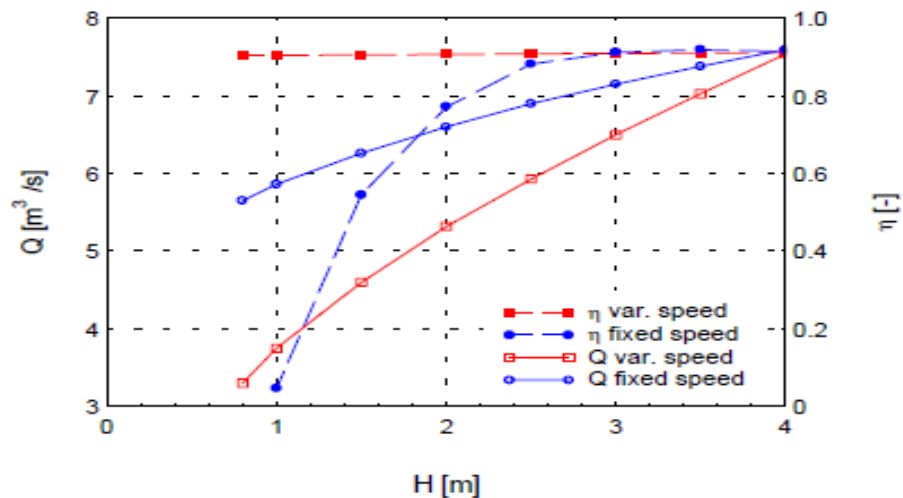


Figura 5.21 – Relação entre o fluxo, a altura de queda e o rendimento [40].

No estudo de estratégias de descarga para o WD concluiu-se que para se conseguir obter um rendimento máximo, o caudal de descarga reduz em conjunto com o vazamento do reservatório (figura 5.22). Para tal algumas turbinas têm de parar em diferentes cotas de volume no reservatório provocando frequentes ciclos de *start/stop*.

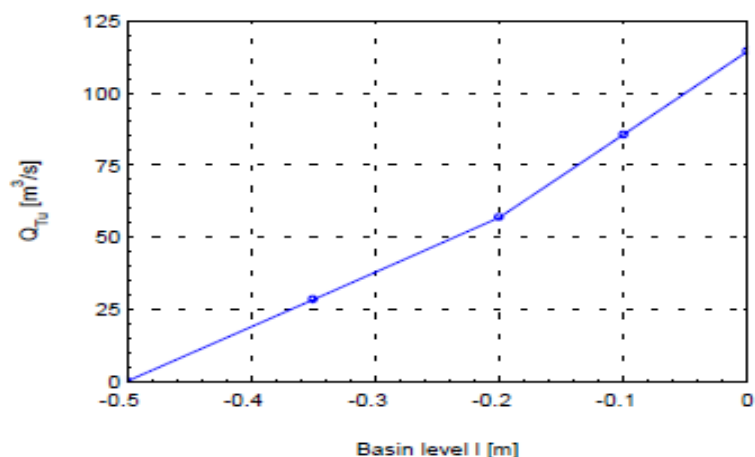


Figura 5.22 – Relação entre o caudal turbinado e o nível de depósito [40].

Tendo em conta o observado, as turbinas mais indicada para o caso em estudo serão as 16 *kaplan bulbs variable speed on/off turbines* de baixa queda, de orientação e conduta vertical, guias de entrada tipo PIT e possibilidade de ajuste de lâminas, cumprindo os requisitos para um rendimento elevado, estável e auto regulável.

Assim a escolha recairá para a 4ª e 5ª coluna da tabela 5.11 em que apesar do seu custo se encontrar na média das cinco turbinas em estudo, são mais robustas e o seu rendimento é igualmente elevado.

5.4.6 Potências

Para o estudo das potências, em conformidade com descrito anteriormente, foi definido um valor de cota min (*Lmin*) de 0,2.

Assim, a equação 5.23 passa a:

$$R_{C,opt} = \frac{\gamma H_{mo}}{b_Q} - Lmin \quad (5.24)$$

A turbina seleccionada para o estudo das potências é uma turbina *kaplan bulb type T* da marca Ossberger, em que o fluxo de entrada e saída não precisam de estar em linha:

- A turbina pode ter 3, 4, 5 ou 6 lâminas.
- A turbina pode operar em altura de queda entre 1-25m.
- O diâmetro do seu rotor pode variar entre 0,25-3m.
- O caudal turbinado pode variar entre 0,2 - 40m³/s.

Recorrendo ao estudo apresentado em [41] determinou-se as potências associadas aos *inputs*.

A potência de galgamento corresponde à energia potencial das ondas galgadas e pode ser demonstrada da seguinte forma:

$$P_{galg} = g\rho R_c q \quad (5.25)$$

A expressão da potência hidráulica correspondente à energia potencial armazenada no reservatório é:

$$P_{Hid} = \rho g H_t q \quad (5.26)$$

Sendo H_t correspondente à altura de queda, ou seja, a diferença entre a altura da água no reservatório e o NMM.

A potência estimada corresponde à energia produzida pelas turbinas, em que a sua equação consiste em:

$$P_{Est} = P_{Hid} \eta_t \quad (5.27)$$

O rendimento global (η_t) da turbina varia entre 0-1 ou 0-100%, depende entre outros fatores, do rendimento do rotor, do distribuidor, das dimensões, da geometria e de órgãos de controlo que interferem com o escoamento da turbina.

$$\eta_t = \eta_m \eta_v \quad (5.28)$$

O rendimento está diretamente influenciado pelo o rendimento mecânico η_m (por exemplo: atrito) e o rendimento volumérico η_v (caudal que não passa pelas pás)[42]. Ou seja, o rendimento relaciona a energia realmente produzida pela turbina e a energia que idealmente deveria produzir.

Nas tabelas 5.12 e 5.13 apresentam-se os cálculos das equações 5.25, 5.26 e 5.27 para os *inputs* 1 e 2.

Tabela 5.12 – Valores de potência para input 1 sem refletor.

<i>Input 1</i>	1	2	3	4	5
H _{mo} [m]	1,5	2	3	3,5	4,2
P Gal ₁₁ [MW]	0,03	0,15	1,02	1,86	3,55
P Gal ₁₂ [MW]	0,10	0,37	1,62	2,61	4,39
P Gal ₁₃ [MW]	0,18	0,53	1,87	2,84	4,49
P Gal ₁₄ [MW]	0,29	0,68	1,92	2,74	4,08
P Gal ₁₅ [MW]	0,34	0,65	1,48	1,99	2,78
PGal _{1opt} [MW]	0,34	0,70	1,94	2,86	4,50
P Hid ₁₁ [MW]	0,02	0,14	0,95	1,74	3,31
P Hid ₁₂ [MW]	0,09	0,33	1,46	2,35	3,96
P Hid ₁₃ [MW]	0,16	0,46	1,62	2,46	3,89
P Hid ₁₄ [MW]	0,23	0,54	1,54	2,19	3,26
P Hid ₁₅ [MW]	0,20	0,39	0,89	1,19	1,67
P Hid _{1opt} [MW]	0,22	0,52	1,61	2,43	3,95
P Est ₁₁ [MW]	0,02	0,13	0,87	1,58	3,01
P Est ₁₂ [MW]	0,08	0,30	1,32	2,14	3,60
P Est ₁₃ [MW]	0,14	0,42	1,48	2,24	3,54
P Est ₁₄ [MW]	0,21	0,49	1,40	2,00	2,97
P Est ₁₅ [MW]	0,19	0,35	0,81	1,09	1,52
P Est _{1opt} [MW]	0,20	0,47	1,46	2,21	3,59

Tabela 5.13 – Valores de potência para input 2 com refletor.

<i>Input 2</i>	1	2	3	4	5
H_{mo} [m]	2,196	2,928	4,392	4,652	5,538
$P Galg_{21}$ [MW]	0,25	0,92	4,12	4,96	8,42
$P Galg_{22}$ [MW]	0,54	1,49	4,96	5,78	8,97
$P Galg_{23}$ [MW]	0,73	1,75	5,00	5,73	8,51
$P Galg_{24}$ [MW]	0,88	1,82	4,48	5,05	7,18
$P Galg_{25}$ [MW]	0,79	1,41	3,01	3,34	4,54
$P Galg_{2opt}$ [MW]	0,89	1,83	5,04	5,82	8,99
$P Hid_{21}$ [MW]	0,23	0,86	3,84	4,63	7,86
$P Hid_{22}$ [MW]	0,48	1,34	4,46	5,20	8,08
$P Hid_{23}$ [MW]	0,63	1,51	4,34	4,97	7,38
$P Hid_{24}$ [MW]	0,70	1,45	3,59	4,04	5,74
$P Hid_{25}$ [MW]	0,48	0,85	1,81	2,00	2,72
$P Hid_{2opt}$ [MW]	0,68	1,50	4,44	5,17	8,15
$P Est_{21}$ [MW]	0,21	0,78	3,50	4,21	7,15
$P Est_{22}$ [MW]	0,44	1,22	4,06	4,73	7,35
$P Est_{23}$ [MW]	0,57	1,38	3,95	4,52	6,71
$P Est_{24}$ [MW]	0,64	1,32	3,26	3,68	5,22
$P Est_{25}$ [MW]	0,43	0,77	1,65	1,82	2,48
$P Est_{2opt}$ [MW]	0,62	1,37	4,04	4,70	7,41

Ao comparar os valores das duas tabelas anteriores e/ou os gráficos seguintes, pode-se verificar que os valores de potência para a solução com refletores é em todos os casos superior.

Verifica-se, ainda, que os melhores valores de potência situam-se entre 2-1,5 metros de altura de queda. Afere-se, também, que para o valor de Rc_{opt} , em ambos os *inputs*, esta quase sempre associado o valor mais alto de potência.

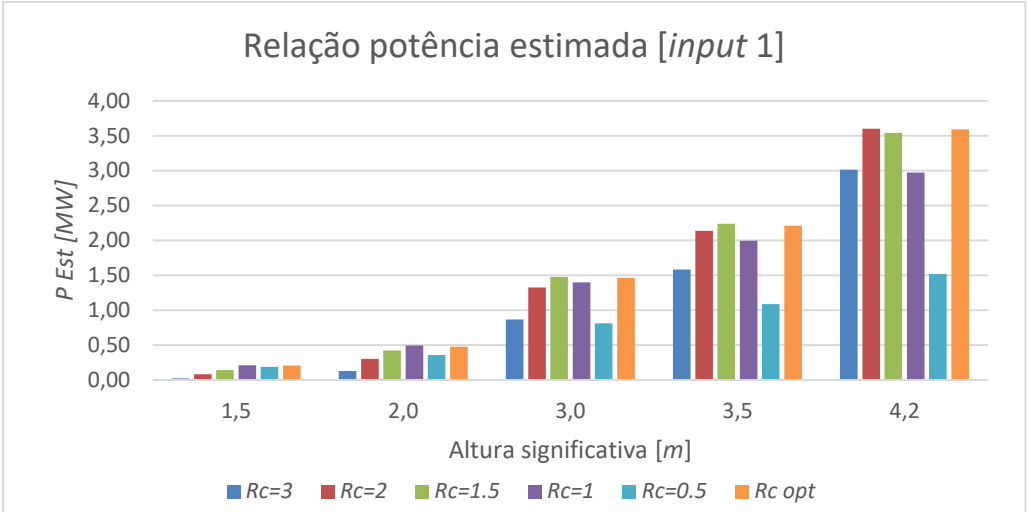


Figura 5.23 – Relação de potência estimada vs Rc vs Hmo para WD sem refletores.

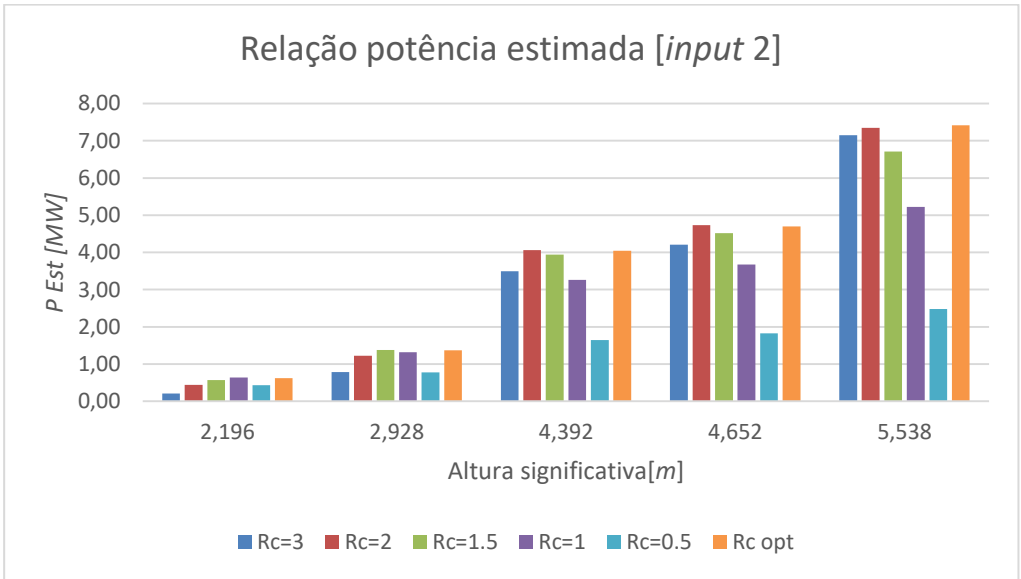


Figura 5.24 – Relação de potência estimada vs Rc vs Hmo para WD com refletores.

5.4.7 *Estimativa da potência anual produzida pelo WD*

Considerando as características da turbina *kaplan vertical type T* conforme documento, anexo A, as tabelas 5.7 e 5.9, os valores de T_p e H_{mo} e dos *inputs* 1 e 2 retiram-se as seguintes conclusões:

O depósito tem $8000m^3=8000000L$, dividindo o mesmo por 4 (16 turbinas, 4 grupos de 4 turbinas) ou seja:

- 16 Turbinas em funcionamento entre o volume de depósito de $8000m^3$ a $6000m^3$;
- 12 Turbinas em funcionamento entre o volume de depósito de $6000m^3$ a $4000m^3$;
- 8 Turbinas em funcionamento entre o volume de depósito de $4000m^3$ a $2000m^3$;
- 4 Turbinas em funcionamento entre o volume de depósito de $2000m^3$ a $0m^3$ (foi considerado $0m^3$ porque como não se sabe a dimensão do reservatório e, conseqüentemente, o volume para uma cota L_{min} considerou-se para esta estimativa o vazamento total do depósito).

Este controlo permite que as turbinas efetuem a descarga no seu máximo fluxo. Assim, definiu-se $Q_n = 40 m^3/s$ (anexo A) o valor máximo.

Tabela 5.14 – Relação de tempos de descarga de $2000m^3$ vs número de turbinas ativas.

Nº de turbinas	Q_n	$Q_n * N^\circ$ de turbinas	Tdescarga $2000m^3$
16	$40 m^3/s$	$640m^3/s$	3,125s
12	$40m^3/s$	$480 m^3/s$	4,16s
8	$40m^3/s$	$320 m^3/s$	6,25s
4	$40m^3/s$	$160 m^3/s$	12,5s

O tempo de descarga total do reservatório é 26,041s.

Como já referido anteriormente, e devido à imprevisibilidade das ondas incidentes é essencial efetuar cálculos em que são consideradas as ondas incidentes sempre iguais para o mesmo grupo de *inputs* 1 e 2.

A tabela seguinte é um exemplo para um valor de $R_{c,opt}$.

Tabela 5.15 – Tempos de enchimento de cada input 1 2, sem e com refletores.

T_p [s]	10	11	12	13	14
$H_{mo} - Input 1$ [m]	1,5	2	3	3,5	4,2
Nº onda para enchimento input 1	135	88	48	38	29
Tempo de enchimento input 1 [s]	1350	965	573	493	404
$H_{mo} - Input 2$ [m]	2,196	2,928	4,392	4,652	5,538
Nº onda para enchimento input 1	76	50	27	25	19
Tempo de enchimento input 2 [s]	762	545	323	321	267

Como o tempo necessário para vazamento é superior ao tempo da chegada da próxima onda incidente, ir-se-á considerar que para ondas de $T_p=10,11,12,13$ o número de ondas para o enchimento é reduzido em 2, enquanto que para $T_p=14$ será reduzido apenas 1.

A tabela 5.16 apresenta o número de descargas por ano.

Tabela 5.16 – Número de descargas anuais.

T_p [s]	10	11	12	13	14
$H_{mo} - Input 1$ [m]	1,5	2	3	3,5	4,2
Nº de descargas por ano	23818	33584	57652	67528	80861
$H_{mo} - Input 2$ [m]	2,196	2,928	4,392	4,652	5,538
Nº de descargas por ano	42847	60763	106182	106902	124648

Exemplo de cálculo da potência anual para $H_{mo}=5,538$ e $t_p=14s$:

- Rendimento da turbina: 0,91
- Potência disponível por turbina: 3MW
- Número total de turbinas: 16
- $q_{tu} = Q_n \times n^{\circ}turbinas$
- $H_t=2,13m$

Seguindo a expressão apresentada em 5.27.

Tabela 5.17 - Cálculo de exemplo de potência anual.

Nº turbinas	Tdescarga $2000m^3$	q_{tu} [m3/s]	Ht [m]	P[MW]	E [MJ]
16	3,125s	640	2,13	12,461	38,94045
12	4,16s	480	2,13	9,346	38,87814
8	6,25s	320	2,13	6,230	38,94045
4	12,5s	160	2,13	3,115	38,94045

Não é possível somar as potências visto que se está a considerar intervalos de tempo diferentes, número de turbinas diferentes e caudais turbinados diferentes. Contudo, ir-se-á somar as energias = 155.7MJ.

$$P_{total} = 43,2Wh$$

Sabendo que o número de descargas anual é: 124648

$$P_a = 5,4GWh/ano \quad (5.28)$$

Este valor de potência foi calculado para o melhor caso apresentado nesta dissertação, $H_t=R_{c,opt}$ correspondente a cada valor de H_{mo} de cada *input*.

Tabela 5.18 – Cálculo de Potência anual para todos os inputs estudados, com e sem influência dos refletores.

T_p	10	11	12	13	14
<i>Input 1</i>	1,5	2	3	3,5	4,2
$P_a \left[\frac{Wh}{ano} \right],$ H_t, opt	279M	525M	1,4G	1,8G	2,7G
<i>Input 2</i>	2,196	2,928	4,392	4,652	5,538
$P_a \left[\frac{Wh}{ano} \right],$ H_t, opt	735M	1,4G	3,6G	3,9G	5,4G

Capítulo 6

Conclusões e desenvolvimentos futuros

Conclusões e desenvolvimentos futuros

6 Conclusões

Com esta dissertação compreendemos o porquê do sistema de conversão (WD) apenas estar em fase de testes e protótipos. Ao contrário de uma central hídrica em que se controlar a descarga, no WD existem muitos fatores de imprevisibilidade associados que não nos permitem controlar a descarga e, conseqüentemente, otimizar ao máximo a instalação como, por exemplo, o estado de mar.

Pode-se verificar que apesar se ter considerado $\gamma_r, \gamma_b, \gamma_h$ e $\gamma_\beta = 1$ e o valor mais elevado de H_{mo} do input2, a potência utilizada foi de 0,79 da potência instalada, valor que é bom, mas baixo considerando que o cálculo foi efetuado sempre com a mesma incidência de onda o que nunca corresponderá à realidade.

A potência anual, para o melhor caso, foi de 5,4GWh/ano para os 20GWh/ano expectável na tabela 5.2.

A altura de queda após o caudal ser transposto para o reservatório é bastante baixo, o que limita as opções de escolha de turbinas, potências, caudais turbinados, velocidade de descarga e complexidade de construção e conseqüentemente a energia produzida.

Concluiu-se que o principal fator para o sucesso deste equipamento é a altura de queda.

Para estudos futuros, seria interessante aprofundar este tema numa perspectiva de parque, conjuntos de WD ou, talvez, a implementação de um segundo reservatório num nível mais elevado proporcionando uma altura de queda superior e, conseqüentemente, uma maior quantidade de energia produzida.

Referências

Bibliográficas

- [1] S. M. Tiago, '*Estudo da operação de parques de sistemas de conversão de energia gas ondas em energia elétrica*', FEUP, Portugal 2009
- [2] Energy Efficiency & Renewable Energy, '*Ocean Thermal Energy Conversion Basics*', August 2013, [Online] Available: <https://energy.gov/eere/energybasics/articles/ocean-thermal-energy-conversion-basics> [Acedido 20-7-2017]
- [3] Aquaret, Delivering knowledge and understanding '*Gradiente de Salinidade*', (2008), [Online]. Available: http://www.aquaret.com/index8dc5.html?option=com_content&view=article&id=182&Itemid=325&lang=pt [Acedido 20-7-2017]
- [4] U. Andreas, M. Davide, '*Ocean energy development in Europe: corrent status and future perspectives*', Petten - Netherlands: Internation Journal of Marine Energy, 2015.
- [5] T.W. Thorpe Oxford Oceanics, "*2010 Survey of Energy Resources*" World Energy Council, London 2010
- [6] Word Energy Council, '*Key indicators for 1993,2011 and 2020*' (table1) [online] Aviable: <https://www.worldenergy.org/work-programme/strategic-insight/survey-of-energy-resources-and-technologies/> [Acedido 20-7-2017]
- [7] B. Drew*, A R Plummer & M N Sahinkaya Department of Mechanical Engineering, "*A review of wave energy converter technology*" University of Bath, Bath, London, UK, June 2009
- [8] C. Christopher, PhD, '*Design and Control of Hydraulic Power Take-Offs for Wave Energy Converters*' , University of Bath, december 2012 - não surge referenciada no texto.
- [9] M. Bennie, '*Wave Power*', 2005. [online]. Available: http://www.tudelft.nl/fileadmin/UD/MenC/Support/Internet/TU_Website/TU_Delft_portal/Actueel/Magazines/Delft_Integraal/archief/2005_DI/2005-1/doc/DO051-12-17.pdf
- [10] AW-Energy Ltd - WaveRoller, '*conceito do waveroller*', [Online] Available, <http://aw-energy.com/pt-pt/sobre-o-waveroller/conceito-do-waveroller> [Acedido 20-7-2017]

- [11] S. AluÍzio, ‘Dispositivo Conversor da Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica’, Portugal, Março 2016
- [12] B. P. Gregory, “*Marine hydrokinetics company pelamis wave power falls into administration*”, Edinburgh, Scotland
- [13] Pelamis Wave Power Ltd, ‘Pelamis Technology’,[online] Available: <http://www.pelamiswave.com/pelamis-technology/> [Acedido 20-7-2017]
- [14] Y.Richard, PhD, ‘Design and Control pf hydraulic Power Take-Offs for Wave Energy Converters’ University of Bath, December 2012
- [15] C. Paulo, “*O Gerador Linear de Magnetos Permanentes Aplicado à Recuperação de Energia das Ondas*”, Portugal, IST 2013
- [16] George W. Boehlert, Gregory R. McMurray & Cathryn E. Tortorici, “*Ecological Effects of Wave Energy Development in the Pacific Northwest*”, U.S. Dept. Commerce, NOAA Tech. Memo, 2008
- [17] Alex D.D. Crail, ‘The Origins of Water Wave Theory’ University of St.Andrews, Scotland, UK, 2004
- [18] N. José, Projecto Litoral nota CEM, ‘*Conhecer para conservar material de apoio “ondas”*’, (2015), [Online] Available: www.cem.ufpr.br/litoralnotacem/textos.htm [Acedido 20-7-2017]
- [19] Holthuijsen, Leo H. Waves in Oceanic and Coastal Waters. Cambridge University Press, New York. 2007
- [20] L. A. Oliveira & A. G. Lopes, “*Mecânica de Flúidos*” (5ªed), Lidel, Setembro 2016
- [21] Krantz, S. G. "The Laplace Equation." §7.1.1 in [*Handbook of Complex Variables.*](#) Boston, MA: Birkhäuser, pp. 16 and 89, 1999
- [22] Roger Temam “Navier–Stokes equations : theory and numerical analysis” Amsterdam,1977.
- [23] Raymond A. Serway, "Physics for Scientists and Engineers, Fourth Edition, Vol.1, Saunders College Publishing, p. 422, p.434, 1996.

- [24] M. F. Rodrigo, '*Análise de dados de agitação num ponto da costa marítima portuguesa. Implicações para o dimensionamento de quebra-mares verticais*', FCT, Portugal, Março 2016
- [25] M.S.Longuet-Higgins '*On the Statistical Dispersion of the Heights of Sea Waves*' Yale University, UK 1952
- [26] Pierson, Willard J., Jr and Moskowitz, Lionel A. 'Proposed a Spectral Form for a Fully Developed Wind Seas Based On The Similarity Theory of S.A. Kitaigorodskii' *Journal of Geophysical Research* Vol.69, p-5181-5190, 1964
- [27] P. M. Guilherme, '*Escudo experimental de um sistema offshore para produção de energia das ondas*', FEUP ,Portugal 2008
- [28] Gotthardsson, Björn, "*Analysis and Evaluation of the Wavebox Wave Energy Converter*", UPPSALA Universitet, Mars 2011
- [29] Y. Yamada, 'Observation of wave principle', Nagoya, Japan, [online] Available:http://www.ncsm.city.nagoya.jp/cgi-bin/en/exhibition_guide/exhibit.cgi?id=S401 [Acedido 22-7-2017]
- [30] Graham W. Griffiths and William E. Schiesser '*Linear and nonlinear waves*' Scholarpedia, 2009, [Online] Available: http://www.scholarpedia.org/article/Linear_and_nonlinear_waves#Reflection [Acedido 22-7-2017]
- [31] Nielsen, A., Kofoed, J.P. '*The Wave Dragon: evaluatio of a wave energy converter*' Aalborg:Hydraulics & Coastal Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering, Aalborg University 1997
- [32] Marinha Portuguesa, Instituto Hidrográfico Português, [Online] Disponível: <http://www.hidrografico.pt/> [Acedido 22-7-2017]
- [33] Instituto Português do Mar e da Atmosfera (I.P.M.A) [Online], Disponível: <https://www.ipma.pt/pt/index.html> [Acedido 22-7-2017]
- [34] SWELLBEAT, '*Wave Calculator*' [Online], Available: <https://swellbeat.com/wave-calculator/> [Acedido:22-7-2017]
- [35] Danish VAT& Company, Wave Dragon ApS , '*Technology – especifications*' , (2005) Copenhagen, Denmark, [Online] Available:

http://www.wavedragon.net/index.php?option=com_frontpage&Itemid=1

[Acedido 22-7-2017]

[36] Le Méhauté, B., Divoky, D. and Lin, A. (1968) ‘ Shadow Water Waves: Comparison of theories and experiments ‘ Proc. Int. Conf. 11th Coastal Engineering .1

[37] Fraichlen and J.L.Hammack,Jr ‘*Run-up Due To Breaking and Non-breaking Waves*’, chapter 113, 1937

[38] Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B., EurOtop ‘*Manual on wave overtopping of sea defenses and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application.*’ (2016), [Online] Available: www.overtopping-manual.com [Acedido 22-7-2017]

[39] Kofoed, J.P. ‘*Wave Overtopping of Marine Structures: utilization of wave energy*’, Aalborg:Hydraulics & Coastal Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering, Aalborg University 2002

[40] Knapp, W. & Holmén, E. & Schilling, R. ‘*Considerations For Water Turbines To Be Used In Wave Energy Converters, Institute for hydraulic Machinery and Plants*’, Technical University of Munich, Germany and Veterankraft AB, Stockholm, sweden

[41] Parmeggiani, S. & Kofoed, J.P. & Friis-Madsen, E. ‘*Experimental Update of Overtopping Model Used For The Wave Dragon Wave Energy Converter*’, Aalborg University, sohngaardshomsvej 57, DK-9000 Aalborg, Denmark , 2013

[42] A.F. O Falcão, ‘*Trubomáquinas*’, Folhas AEIST, Portugal, 2004

Anexos e

Apêndices

Anexo A – Catálogo Turbina