



Universidade do Porto

Faculdade de Engenharia

FEUP

Estudo da Operação de Parques de Sistemas de Conversão de Energia das Ondas em Energia Eléctrica

Tiago António Nunes da Silva Morais

Licenciado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores - Ramo de Sistemas de Energia pela
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

**Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos
do grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
(Área de Especialização em Energias Renováveis)**

Dissertação realizada sob a supervisão de
Professor Doutor João Abel Peças Lopes,
do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Porto, Setembro de 2009

Resumo

Nesta dissertação é apresentada uma metodologia que tem como objectivo principal a simulação numérica de sistemas de conversão de energia das ondas em energia eléctrica e o estudo das condições de operação em regime dinâmico de parques de conversores de energia das ondas, recorrendo à caracterização de um sistema de extracção de energia hidráulico-eléctrico designado por PTO (Power Take-Off), aplicado num corpo flutuante, cilíndrico (simetria axial), com um grau de liberdade (oscilação vertical) e instalado em águas profundas.

Devido à não linearidade dos sistemas, estes são estudados no domínio do tempo, em plataforma de simulação desenvolvida em ambiente Matlab Simulink, recorrendo à descrição matemática dos modelos do corpo do flutuador, do PTO, composto por um sistema hidráulico, de que fazem parte o cilindro hidráulico, a unidade de armazenamento, o motor hidráulico e um sistema eléctrico, este constituído por máquina eléctrica assíncrona com rotor em curto-circuito.

Para além dos modelos que compõem o corpo do flutuador, a metodologia descrita foi testada considerando o desenvolvimento de um modelo que permita gerar séries temporais que caracterizam um estado de mar com dois parâmetros: a altura significativa (H_s) e o período de energia (T_e).

O presente trabalho permitiu avaliar o comportamento de parques de sistemas de conversão de energia das ondas em energia eléctrica, nomeadamente quanto à sua topologia de interligação com a rede e identificação de requisitos técnicos para a ligação dos equipamentos de conversão de energia das ondas à rede eléctrica, de modo particular o respeitante aos limites de variação de tensão.

São apresentadas também algumas propostas para um trabalho futuro.

Abstract

Presented in this dissertation is a methodology whose principal aim is the numerical simulation of wave energy conversion systems into electrical energy and the study of the dynamic operating conditions of a wave energy converter farm, characterized applying a hydraulic-electric extraction system designated as PTO (Power Take-Off), applied to a cylindrical floating body (Axisymmetrical), with one degree of freedom (vertical oscillation) installed in deep water.

Due to the non-linearity of these systems, they are studied in the time domain utilizing a simulation platform developed using Matlab Simulink which runs the applied mathematical description of the follow modules: the cylindrical floating body, the PTO, comprising of a hydraulic system which is part of the hydraulic cylinder storage unit, hydraulic motor and an electrical system consisting of an asynchronous machine with a squirrel cage rotor.

Besides these modules that make up the floating body, the described methodology was tested considering the development of a model that permits the generation of time series that characterize a sea state considering two parameters: significant wave height (H_s) and energy period (T_e).

This study allowed for the evaluation of the behaviour of farms of wave energy conversion systems, particularly in regard to their interconnection topology with the grid and the identification of technical requirements between wave energy converters and the electrical grid, regarding voltage variation limit.

Proposals for future work in this area are also presented.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a várias pessoas, cujo apoio foi fundamental para a concretização do trabalho agora apresentado.

Ao Professor Peças Lopes, FEUP, pela orientação e pelos contributos no desenvolvimento desta dissertação, além da sua preciosa disponibilidade para aceitar e minorar as dificuldades com que me deparei na conciliação do trabalho profissional com o trabalho de investigação, no âmbito desta dissertação.

Ao Dr. Paulo Justino, INETI, pela sempre prestável disponibilidade demonstrada no esclarecimento de dúvidas e pelas sugestões técnicas, relativas à implementação da formulação matemática da componente Hidrodinâmica e do sistema Hidráulico.

Ao Prof. António Falcão, Instituto Superior Técnico, pela simpatia e pela disponibilidade na comparação e na validação dos resultados do modelo numérico apresentado, em particular no que se refere ao comportamento do sistema Hidráulico face ao modelo que tinha sido desenvolvido por si.

Ao Carlos Moreira e à Fernanda Resende, INESC Porto, pelo apoio e pela disponibilidade prestada na implementação da formulação matemática em ambiente Matlab Simulink.

Ao Eng. Marc Hadden, MARTIFER, para além de meu director, um grande amigo que sempre me incentivou na conclusão desta dissertação.

Ao Coronel Carvalho que como amigo se disponibilizou à última da hora para realizar as respectivas correcções ortográficas.

Ao meu amigo João Sousa que sem a sua ajuda na formatação desta dissertação teria sido bastante mais difícil cumprir com os prazos estabelecidos

À minha Família pelo apoio incondicional e incentivo

Por último à minha namorada Maria João, pela paciência, pelo apoio e pelo carinho demonstrado.

Todos estes agradecimentos serão poucos para reconhecer o apoio e o incentivo recebidos.

Obrigado.

Índice

Resumo	iii
Abstract	v
Agradecimentos	vii
Índice	ix
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xvii
Abreviatura e Símbolos	xix
Capítulo 1 - Introdução	23
1.1 Recurso Energético Mundial	23
1.2 Desenvolvimento	27
1.3 Potencial Económico	28
1.4 Objectivos	31
1.5 Estrutura da dissertação de mestrado	32
Capítulo 2 - Estado da Arte	35
2.1 Introdução	35
2.2 Ondas	35
2.2.1 Teoria Linear	37
2.2.2 Influência da Profundidade	38
2.2.3 Ondas de Superfície no Oceano	39
2.3 Tecnologias	49
2.3.1 PELAMIS	51
2.3.2 Pico OWC	57
2.3.3 Wave Dragon	61
2.3.4 WaveRoller	68
2.3.5 AquaBuOY	71
2.3.6 AWS (Archimedes Wave Swing)	75
2.4 Esquemas de Conversão	82
2.5 Redes Eléctricas Offshore	84
2.6 Cabos Submarinos	88
2.7 Parques de Produção Energia Eléctrica Offshore	91

Capítulo 3 - Modelos Matemáticos	99
3.1 Introdução	99
3.2 Conversor de Energia das Ondas	99
3.2.1 Ondas de Superfície do Mar	101
3.2.2 Movimento Oscilatório do corpo do flutuador	104
3.2.3 Sistema Hidráulico	111
3.2.4 Máquina Assíncrona	124
3.3 Rede Eléctrica	132
3.4 Parques de Ondas	135
Capítulo 4 - Plataforma de Simulação	141
4.1 Introdução	141
4.2 Modelos Matemáticos em Matlab Simulink	141
4.2.1 Conversor de Energia das Ondas	141
4.2.2 Parque de Ondas	160
Capítulo 5 - Resultados de Simulação	169
5.1 Introdução	169
5.2 Operação do Conversor de Energia das Ondas	170
5.2.1 Dinâmica de Movimentos	170
5.2.2 Tensão Eléctrica nos Barramentos 3 e 5	187
5.3 Operação de Parques de Ondas	190
Capítulo 6 - Conclusões	201
6.1 Principais conclusões	201
6.2 Perspectivas de Desenvolvimento	202
Referências	205
Anexos	209
Anexo A - Propriedades Linear da Onda de Superfície	210
Anexo B - Parâmetros do sistema de conversão de energia das ondas em energia eléctrica ..	212
Anexo C - Coeficientes das funções de transferência	214

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Mapa mundial com o potencial do recurso vento, velocidade média anual, medida a 50 metros de altitude, entre Julho de 1983 e Junho 1993 [7].	25
Figura 1.2 – Distribuição anual em valores médios associado à potência transportada pelas ondas do mar [8].	26
Figura 1.3 - Actividades de Investigação, Demonstração e Comercialização desde Dezembro de 2007 relacionadas com a Energia dos Oceanos [12].	28
Figura 1.4 - Maturidade da Tecnologia para diferentes formas de aproveitamento da Energia dos Oceanos [10].	28
Figura 1.5 - Evolução do preço do petróleo desde 1947 a Maio de 2008 [13].	29
Figura 1.6 – Consumo de Electricidade 2006, resultado da soma da produção e importação de electricidade menos as exportações e perdas nas redes de transmissão e distribuição de electricidade) [15].	30
Figura 1.7 – Rede de importações 2006 (O número positivo evidencia o número de importações o número negativo as exportações) [15].	30
Figura 2.1 – Classificação das ondas do Oceano segundo o período de Onda (Munk 1951) [20].	36
Figura 2.2 – Desenvolvimento das Ondas de Superfície por acção do vento na superfície oceânica [21].	37
Figura 2.3 – Propagação das ondas do mar [22].	37
Figura 2.4 – Trajectórias circulares descritas pelas partículas de água em função da profundidade (h) e comprimento de onda (L) [21].	38
Figura 2.5 – Registo de uma bóia oceanográfica ao largo do Atlântico Norte [24].	40
Figura 2.6 - Caracterização da altura individual da onda.	41
Figura 2.7 – Esquema de transformação de uma série temporal para o domínio das frequências através da transformada de Fourier e o tratamento inverso [26].	42
Figura 2.8 – Resultado da soma de ondas com diferentes amplitudes, comprimentos e direcções [27].	43

Figura 2.9 – O espectro de energia das ondas mostra a distribuição de energia para cada frequência [25].	43
Figura 2.10 – Rosas com a direcção média anual da onda por sector θ e potência média dos estados do oceano com sectores de θ de 30° .	47
Figura 2.11 – Representação da resposta do movimento de cada PCM à incidência das ondas na estrutura.	51
Figura 2.12 – Representação do movimento de cada máquina, vista de topo e vista lateral.	52
Figura 2.13 – Ilustração da aplicação gráfica do interface com o utilizador para o controlo do Pelamis [6].	53
Figura 2.14 – Representação simplificada do esquema do sistema de PTO do Pelamis [32].	54
Figura 2.15 – Representação gráfica do módulo de potência do Pelamis [6].	54
Figura 2.16 – Interligação eléctrica de uma máquina do tipo Pelamis [29].	55
Figura 2.17 – Representação do sistema de amarração de uma máquina Pelamis [30].	56
Figura 2.18 - Exemplos de simulação (momento e potência) obtidos da operação do Pelamis em mar moderado [32].	57
Figura 2.19 – Central piloto europeia da energia das ondas do Pico, Açores – Portugal, corte vertical [33].	58
Figura 2.20 – Representação dos componentes constituintes do sistema OWC e vista amplificada do seu grupo (turbina e gerador) [36].	59
Figura 2.21 – Gráfico da série temporal com a potência pneumática disponível na câmara de ar, com a potência pneumática disponível na turbina e a potência eléctrica entregue à rede [36].	60
Figura 2.22 – Gráfico com um excerto da série temporal de potência eléctrica entregue à rede durante um período funcionamento do OWC [35].	61
Figura 2.23 – Representação da rampa com dupla curvatura do Wave Dragon [38].	61
Figura 2.24 – Princípio básico do funcionamento do Wave Dragon [38].	62
Figura 2.25 – Gráfico com o desempenho das turbinas comuns de acordo com as suas características [39].	62
Figura 2.26 – À esquerda: Turbina do Wave Dragon à escala; Direita: Princípio de funcionamento do Wave Dragon [38].	63
Figura 2.27 – Representação da secção de rampa e principais partes constituintes do Wave Dragon, corte vertical [38].	64
Figura 2.28 – Protótipo do Wave Dragon durante o lançamento em Março de 2003. As aberturas da câmara de ar utilizadas no sistema de controlo de estabilidade [38].	64
Figura 2.29 – Sinóptico principal do software de SCADA do Wave Dragon [38].	65
Figura 2.30 – Esquema unifilar da tecnologia Wave Dragon composta por 16 grupos (turbina e gerador), controlados individualmente por um conversor AC/DC/AC [41].	66
Figura 2.31 – Representação do sistema de amarração utilizado na unidade de demonstração [38].	66

Figura 2.32 – Representação da configuração dos cabos de amarração [42].	67
Figura 2.33 – Gráfico com a série temporal da potência estimada, potência hidráulica e produção real obtida durante o funcionamento do Wave Dragon [43].	68
Figura 2.34 – Ilustração do dispositivo WaveRoller [44].	68
Figura 2.35 – Efeito da diminuição da profundidade nas características da onda [44].	69
Figura 2.36 – Ilustração da transformação de energia cinética em energia eléctrica [44].	69
Figura 2.37 – Ilustração de um módulo com três placas e seu funcionamento [44] e [45].	70
Figura 2.38 – Principais partes constituintes do AquaBuOY e seu princípio de funcionamento [49] e [50].	72
Figura 2.39 – Esquema de princípio do PTO da tecnologia AquaBuOY [52].	73
Figura 2.40 – Sistema de amarração e de ligação à rede da tecnologia AquaBuOY [52].	74
Figura 2.41 - Princípio de Funcionamento © AWS Ocean Ltd.	75
Figura 2.42 - Esboço de uma secção transversal e fotografia do gerador linear de ímanes permanentes utilizado no AWS [54].	76
Figura 2.43 – Gráficos com a Potência estimada e potência real verificada [60].	79
Figura 2.44 – Ilustração da aplicação principal de simulação do AWS – TDM [57].	80
Figura 2.45 – Força de excitação da onda e velocidade vertical do flutuador [62].	81
Figura 2.46 - Nova geração AWS.	81
Figura 2.47 – Esquema do sistema de conversão: (a) Pico OWC, (b) AWS TM , (c) AquaBuOY TM , (d) WaveDragon TM e (e) Pelamis TM [66].	82
Figura 2.48 - Exemplo de um esquema de protecção contra falhas de concepção no <i>layout</i> do parque [67].	85
Figura 2.49 – Comparação entre custo e eficiência do cabo DC e AC [68].	86
Figura 2.50 – Exemplos de aplicação para diferentes tipos de ligação à redes [68].	86
Figura 2.51 - Exemplo de sistema de recolha AC [67].	87
Figura 2.52 - Exemplo de sistema de recolha de DC [67].	87
Figura 2.53 – Descrição das partes constituintes de um cabo [69].	89
Figura 2.54 - Descrição de um cabo submarino de média tensão, 2XS2YRAA [69].	90
Figura 2.55 – Mapa da Europa com as zonas de testes de energia das ondas.	91
Figura 2.56 - Diagrama de instalação do parque para a conversão de energia das ondas em energia eléctrica em Espanha, Biscay Marine Energy Platform.	92
Figura 2.57 – Comparação de possíveis dimensões de parque de energia das ondas com cerca de 20MW potência instalada (vista de topo).	94
Figura 2.58 - Configuração geral do sistema e ligações eléctricas [21].	95
Figura 2.59 – Possível cenário de ligação da Zona Piloto à subestação da Marinha Grande.	97
Figura 2.60 - Zona Piloto (Área Geográfica).	98
Figura 3.1 - Movimentos de translação e rotação de um dispositivo.	100
Figura 3.2 - Sistema de extracção de energia hidráulico-eléctrico, PTO.	100

Figura 3.3 – Diagrama de blocos do modelo matemático estudado.	101
Figura 3.4 - Densidade espectral de energia para um estado de mar $H_s=T_e=1$	102
Figura 3.5 – Variação da superfície da onda do mar.	104
Figura 3.6 – Diagrama de transferência de $A(s)$ para $B(s)$, através da função de transferência de Laplace $G(s)$	108
Figura 3.7 – Diagrama do procedimento para encontrar a função de transferência do modelo, recorrendo à função INVFREQS.M [79].	111
Figura 3.8 – Modelo do sistema hidráulico.	111
Figura 3.9 – Símbolo eléctrico do díodo.	112
Figura 3.10- Esquema de montagem de um circuito rectificador de onda completa com ponte de díodos e condensador.	113
Figura 3.11- Diferença de Potencial obtida aos terminais da resistência RL da montagem da Figura 3.10.	113
Figura 3.12 – Esquema de um cilindro hidráulico (corte vertical).	114
Figura 3.13 – Sequência do movimento do cilindro hidráulico para uma onda sinusoidal.	117
Figura 3.14 – Limites do curso do cilindro hidráulico representado por um sistema mola-amortecedor.	118
Figura 3.15 – Sequência de carregamento do acumulador.	120
Figura 3.16 – Corte transversal de um motor hidráulico Parker V12 [82].	123
Figura 3.17 – Esquema equivalente de uma linha monofásica com parâmetros distribuídos em π	134
Figura 3.18 – Esquema da rede eléctrica para um conversor.	135
Figura 3.19 – Esquema da rede eléctrica para três conversores ligados em série.	136
Figura 3.20 – Esquema da rede eléctrica para três conversores ligados em paralelo.	137
Figura 3.21 - Modelo funcional do gerador assíncrono em regime transitório.	140
Figura 4.1 – Diagrama de blocos da plataforma de simulação implementada.	142
Figura 4.2 – Parâmetros da função bloco modelo da onda.	143
Figura 4.3 - Esquema do modelo matemático implementado para o bloco modelo da onda.	143
Figura 4.4 – Parâmetros do bloco modelo do flutuador.	144
Figura 4.5 – Coeficientes da função de transferência da radiação.	145
Figura 4.6 – Esquema do modelo matemático implementado para o flutuador.	145
Figura 4.7 – Esquema do modelo matemático implementado para o bloco do sistema hidráulico.	146
Figura 4.8 – Coeficientes do bloco do Sistema Hidráulico.	147
Figura 4.9 – Modelo matemático implementado em Matlab Simulink.	148
Figura 4.10 – Modelo matemático implementado para o bloco modelo de válvulas de retenção.	150
Figura 4.11 – Modelo matemático implementado para o bloco do modelo de paragem.	152
Figura 4.12 – Modelo matemático implementado para o bloco do modelo do acumulador.	153

Figura 4.13 – Modelo matemático implementado para o bloco do modelo do motor hidráulico. ...	154
Figura 4.14 – Parâmetros do bloco do modelo para a Máquina Síncrona.	156
Figura 4.15 – Modelo matemático implementado para o bloco do modelo da Máquina Assíncrona.	157
Figura 4.16 - Exemplo da rede eléctrica estudada para uma máquina eléctrica com potência de curto-circuito no ponto de recepção de 10MVA representada em S.I. e em valores p.u..	159
Figura 4.17 – Modelo matemático implementado em Simulink da Rede Eléctrica.	160
Figura 4.18 – Modelo matemático implementado em Simulink do parque de ondas.	161
Figura 4.19 – Ilustração do atraso temporal imposto.	162
Figura 4.20 – Parâmetros da função bloco modelo da onda.	163
Figura 4.21 – Modelo matemático implementado em Simulink da onda com o atraso aplicado à Força de excitação ou difracção.	163
Figura 4.22 - Rede eléctrica em série com os parâmetros especificados.	165
Figura 4.23 – Rede eléctrica em paralelo com os parâmetros especificados.	166
Figura 5.1 – Densidade espectral de energia para $H_s=2m; T_e=8s$	171
Figura 5.2 – Variação da superfície da onda em metros, para $H_s=2m; T_e=8s$	172
Figura 5.3 – Densidade espectral de energia para $H_s=4m; T_e=11s$	172
Figura 5.4 – Variação da superfície da onda em metros, para $H_s=4m; T_e=11s$	173
Figura 5.5 – Variação da superfície da onda e sua influência na velocidade e deslocamento do corpo para $H_s=2m; T_e=8s$	174
Figura 5.6 – Variação da superfície da onda e sua influência na velocidade e deslocamento do corpo $H_s=4m; T_e=11s$	175
Figura 5.7 – Variação da Força PTO e da Força Hidrodinâmica de acordo com a evolução da velocidade de deslocamento do corpo da Figura 5.8.	175
Figura 5.8 – Variação da velocidade de deslocamento para $H_s=2m; T_e=8s$	176
Figura 5.9 – Variação das Forças de Radiação, de Hidrostática, de Excitação e de Hidrodinâmica Total para $H_s=4m; T_e=11s$	176
Figura 5.10 – Variação das Forças de Radiação, de Hidrostática, de Excitação e de Hidrodinâmica Total para $H_s=2m; T_e=8s$	177
Figura 5.11 – Variação da Força PTO e da Força Hidrodinâmica de acordo com a evolução da velocidade de deslocamento do corpo da Figura 5.12.	177
Figura 5.12 – Variação da velocidade de deslocamento para $H_s=4m; T_e=11s$	178
Figura 5.13 – Variação de pressão para $H_s=4m; T_e=11s$	179
Figura 5.14 – Variação de pressão para $H_s=2m; T_e=8s$	179
Figura 5.15 – Variação do caudal deslocado da câmara 1 e 2 para o cilindro do acumulador para $H_s=2m; T_e=8s$	181
Figura 5.16 – Variação do caudal do acumulador para $H_s=2m; T_e=8s$	181

Figura 5.17 – Variação do caudal deslocado da câmara 1 e 2 para o cilindro do acumulador para $H_s=4m; T_e=11s$.	182
Figura 5.18 – Variação do caudal do acumulador para $H_s=4m; T_e=11s$.	182
Figura 5.19 – Variação do caudal do motor para $H_s=4m; T_e=11s$.	183
Figura 5.20 – Variação do caudal do motor para $H_s=2m; T_e=8s$.	183
Figura 5.21 – Variação do volume de óleo no acumulador para $H_s=2m; T_e=8s$.	184
Figura 5.22 – Variação do volume de óleo no acumulador para $H_s=4m; T_e=11s$.	185
Figura 5.23 – Evolução das Potências (activa da máquina assíncrona, motor hidráulico e cilindro hidráulico) para $H_s=2m; T_e=8s$.	186
Figura 5.24 – Evolução das Potências (activa da máquina assíncrona, motor hidráulico e cilindro hidráulico) para $H_s=4m; T_e=11s$.	186
Figura 5.25 – Evolução da tensão no barramento 5, para $H_s=2m; T_e=8s$.	187
Figura 5.26 – Evolução da tensão no barramento 3, para $H_s=2m; T_e=8s$.	188
Figura 5.27 – Evolução da tensão no barramento 5, para $H_s=4m; T_e=11s$.	188
Figura 5.28 – Evolução da tensão no barramento 3, para $H_s=4m; T_e=11s$.	189
Figura 5.29 – Evolução da Potência Activa e Reactiva para os casos da associação série e paralelo das máquinas para $S_{cc}=10MVA$.	191
Figura 5.30 – Evolução da tensão nos barramentos 5, 7, 9, 11 para os casos da associação série e paralelo das máquinas para $S_{cc}=10MVA$.	192
Figura 5.31 – Evolução da Potência Activa e Reactiva para os casos da associação série e paralelo das máquinas e das condições 2.	193
Figura 5.32 – Evolução da tensão nos barramentos 5, 7, 9, 11 para os casos da associação série e paralelo das máquinas e das condições 2.	194
Figura 5.33 – Evolução da Potência Activa e Reactiva para os casos da associação série e paralelo das máquinas e das condições 3.	195
Figura 5.34 – Evolução da tensão nos barramentos 5, 7, 9, 11 para os casos da associação série e paralelo das máquinas e das condições 3.	196
Figura 5.35 – Evolução da Potência Activa e Reactiva para os casos da associação série e paralelo das máquinas e das condições 4.	197
Figura 5.36 – Evolução da tensão nos barramentos 5, 7, 9, 11 para os casos da associação série e paralelo das máquinas e das condições 4.	198

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Resultados teóricos Anuais por tipo de energia [10].	26
Tabela 2.1 – Tabela com a potência média anual (kW/m) em função de H_s e T_e , (todas as direcções).	46
Tabela 2.2 – Tabela comparativa de tecnologias.	50
Tabela 5.1 – Tabela com a especificação dos parâmetros utilizados na simulação.	171
Tabela 5.2 – Potência incidente para ondas de pequena e média amplitude de períodos curtos e médios.	173
Tabela 5.3 – Resultados da pressão do acumulador, potência mecânica do motor hidráulicos e potência do gerador eléctrico para variações da pressão de carregamento com um estado de mar $H_s=4m$ $T_e=11s$.	180
Tabela 5.4 – Resultados do Volume de óleo armazenado no acumulador, Potência mecânica fornecida pelo motor hidráulico e potência eléctrica gerada pela máquina assíncrona por variação do volume total do acumulador.	185
Tabela 5.5 – Resultados da potência mecânica gerada pelo cilindro hidráulico, da potência eléctrica da máquina assíncrona e da potência mecânica do motor hidráulico durante para 2000s de simulação com um estado de mar $H_s=4m$ e $T_e=11s$.	186
Tabela 5.6 – Resultados das tensões nos barramentos 3 e 5, potência eléctrica activa e reactiva da máquina assíncrona para diferentes valores da S_{cc} e sobre condições de teste 1 e 2.	189
Tabela 5.7 – Resultados das tensões nos barramentos 5, 7, 9, 11, potência eléctrica activa e reactiva do total das máquinas assíncronas para diferentes valores da S_{cc} e sobre condições de teste 1 e 2.	199
Tabela C.1 - Coeficientes da função de transferência estável de excitação da onda.	214
Tabela C.2 - Coeficientes da função de transferência instável de excitação da onda.	214
Tabela C.3 - Coeficientes da função de transferência de radiação.	215

Abreviatura e Símbolos

Lista de abreviaturas

DGEG	Direcção Geral de Energia e Geologia
EIA	Energy Information Administration
EMEC	European Marine Energy Center
IEA-OES	Implement Agreement on Ocean Energy Systems
OPEP	Organização dos Países Exportadores de Petróleo
OTEC	Ocean Thermal Energy Conversion
PTO	Power Take-Off
REN	Redes Energéticas Nacionais, SGPS
SEE	Sistemas Eléctricos de Energia
WEC	Wave Energy Converter

Lista de Símbolos

B	Constante de amortecimento
C	Capacitância ou capacidade electrostática
D	Cilindrada
$e_q; e_d$	Força electromotriz transitória decompostas sobre os eixos d e q
f	Frequência
$f(\Theta)$	Função de espalhamento ou dispersão
F_a	Força de atrito
f_{base}	Frequência eléctrica
F_D	Força do amortecimento
F_{exc}	Força de excitação ou de difracção
F_{hc}	Força desenvolvida pelo cilindro hidráulico
F_{hs}	Força Hidrostática
F_{HT}	Força Hidrodinâmica
f_p	Frequência de pico
F_{PTO}	Força de oposição ao movimento natural de oscilação
F_r	Força resultante

F_{rad}	Força de radiação
F_S	Força da Mola
g	Aceleração da gravidade
G	Condutância ou perditância
H	Constante de inércia
h	Profundidade
H_m	Altura média da onda
$H_{m\acute{a}x}$	Altura máxima da onda
H_{rms}	Valor médio quadrático da altura de onda
H_s	Altura significativa (Significant wave height)
I_{sbase}	Corrente de pico por fase no estator
J	Inércia global do motor hidráulico e da máquina assíncrona
K	Constante de rigidez da mola
L_m	Indutância mútua de magnetização entre os enrolamentos do estator e o rotor
L_r	Indutância do rotor
L_{rr}	Auto-indutância dos enrolamentos do rotor
L_s	Indutância do estator
L_{sbase}	Indutância de base
L_{ss}	Auto-indutância dos enrolamentos do estator
m	Massa do corpo
$M(\infty)$	Massa adicional
m_0, m_1	Momentos espectrais m_0 e m_2
p	1Número de par de pólos da máquina assíncrona.
p_{acc}	Pressão no acumulador
P_t	Pressão do reservatório
P_w	Potência média associada a condições de mar em águas profundas
q_{acc}	Caudal do acumulador
q_m	Caudal do motor
R_f	Resistência de fricção
R_r	Resistência do rotor
R_s	Resistência do estator,
s	Deslizamento ou escorregamento
$S(\omega)$	Densidade espectral de energia
S_{base}	Potência Aparente trifásica de base
T	Período de Onda
T_0	Constante de tempo transitória em circuito aberto
T_a	Binário acelerador
T_{base}	Binário de base
T_e	Período de energia (energy period)
T_z	Período médio (Average wave period)
V_{acc}	Volume do acumulador
$V_{g\acute{a}s}$	Volume de gás;
$V_{\acute{o}leo}$	Volume de óleo no acumulador;
V_{sbase}	Tensão de pico por fase no estator
ω_{base}	Frequência eléctrica angular de base
ω_{mbase}	Velocidade de rotação do rotor de base

w_r	Velocidade angular do rotor (ou velocidade do gerador)
w_s	Velocidade angular do estator
X	Reactância em circuito aberto
X'	Reactância transitória
X_m	Reactância de magnetização
$X_s; X_r$	Reactância dos enrolamentos do estator e do rotor
Z_{sbase}	Impedância de base
β	Coefficiente de compressibilidade do fluido
γ	Fase da onda
$\eta(t)$	Função da variação da superfície da onda
Θ	Direcção de propagação da onda
λ	Comprimento de Onda
λ_{sbase}	Dispersão do Fluxo magnético de base
ρ	Massa volúmica do fluido

Capítulo 1 - Introdução

Nos últimos anos têm-se verificado um interesse crescente, a nível mundial, pela produção de energia eléctrica a partir das energias contidas nos Oceanos, em particular a Energia das Ondas. Tal implica de imediato a formulação de algumas questões. Qual o seu potencial energético? Será possível transformar estas fontes de energia em energia útil? O que desperta o actual interesse da comunidade científica e o mundo empresarial nesta fonte de energia?

1.1 Recurso Energético Mundial

Os oceanos contêm grande número de recursos naturais por explorar, em particular recursos energéticos de diferentes tipos. Se não vejamos, a superfície do globo terrestre é composta por 29,2% de Terra e cerca de 70,8% de água. Destes 70,8% de água 97,4% representam água salgada, contida nos Oceanos (96,5%) e Mares (0,9%) sendo apenas 2,6% a parcela representativa de água doce, contida na atmosfera, rios, lagos e lençóis freáticos superficiais [1]. A percentagem de ocupação dos Oceanos na superfície terrestre permite constituir o maior concentrador de energia solar do planeta. A energia solar é caracterizada como a fonte de todas as energias, dando origem a gradientes térmicos, correntes de maré, marés, ventos e ondas. Para o qual existem diferentes formas potenciais de aproveitamento da energia contida nos Oceanos, das quais se destacam algumas:

- Energia associada ao gradiente Térmico: Esta forma de energia é obtida da diferença da temperatura entre a água na superfície e as profundezas do oceano, por efeito da incidência da radiação solar. Através de processos designados na terminologia anglo saxónica por - Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) é possível utilizar para gerar electricidade, dessalinizar água salgada, apoiar a aquacultura em águas profundas, climatizar o ambiente (refrigeração e ar condicionado), assim como auxiliar o crescimento dos produtos hortofrutícolas e a extracção mineral [2];

- Energia associada ao gradiente de Salinidade: Da diferença de concentração de salinidade entre o encontro da água dos oceanos e os rios, em locais como a foz dos rios, obtêm-se uma energia potencial criada pela diferença de pressão com base no fenómeno natural de osmose¹. As moléculas de sal existentes na água salgada fazem deslocar a água doce por intermédio de membranas semi-permeáveis, provocando o aumento da pressão num reservatório de água salgada e por conseguinte o caudal de água salgada necessário para accionar um conjunto turbina gerador eléctrico de forma a produzir energia eléctrica [3];
- Energia das correntes de maré: Corrente é nome que se designa ao movimento horizontal da água, existente nos oceanos, rios, baías e portos por influência da maré, vento e diferenças de densidade. 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 eléctrica por conceitos semelhantes aos utilizadas na energia eólica recorrendo ao uso de turbinas de eixo horizontal ou vertical instaladas à superfície ou imersas por sistemas flutuantes ou fixas ao fundo oceânico. Este tipo de energia em comparação com a energia eólica possui maior quantidade de energia devido à densidade das correntes de maré, ser superior às correntes de vento [4];
- Energia das Marés: Energia resultante da rotação da Terra no seio dos campos gravitacionais da Lua e do Sol. A energia potencial obtida pela diferença de altura da maré, 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 turbina e gerador eléctrico. A produção de energia eléctrica é possível explorando a existência de diferenças de nível de água a montante e a jusante da barragem originando um caudal de água, por abertura das comportas, forçado por acção da gravidade a accionar a turbina [5];
- Energia das Ondas dos Oceanos. A origem desta forma de energia, criada pela acção 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, energia potencial criada pela massa de água que se encontra acima do nível do solo pode ser transformada em energia eléctrica de diversos métodos. Para tal recorre-se à utilização de tecnologias relacionadas com o tipo de movimento (rotativo e de translação), dos métodos de

¹ Osmose - Nome dado ao movimento da água entre meios com concentrações diferentes de solutos separados por uma membrana semipermeável.

extracção de energia (hidráulicos, mecânicos, pneumáticos e eléctricos), de localização (na costa, próximo da costa e longe da costa) e posição (em terra, flutuantes e imersos) [6].

Ao contrário da energia associada ao gradiente térmico, em que a diferença de temperatura se mantém praticamente constante ao longo do ano, a energia das ondas apresenta uma elevada variabilidade em função das características do vento (Figura 1.1) e profundidade do local.

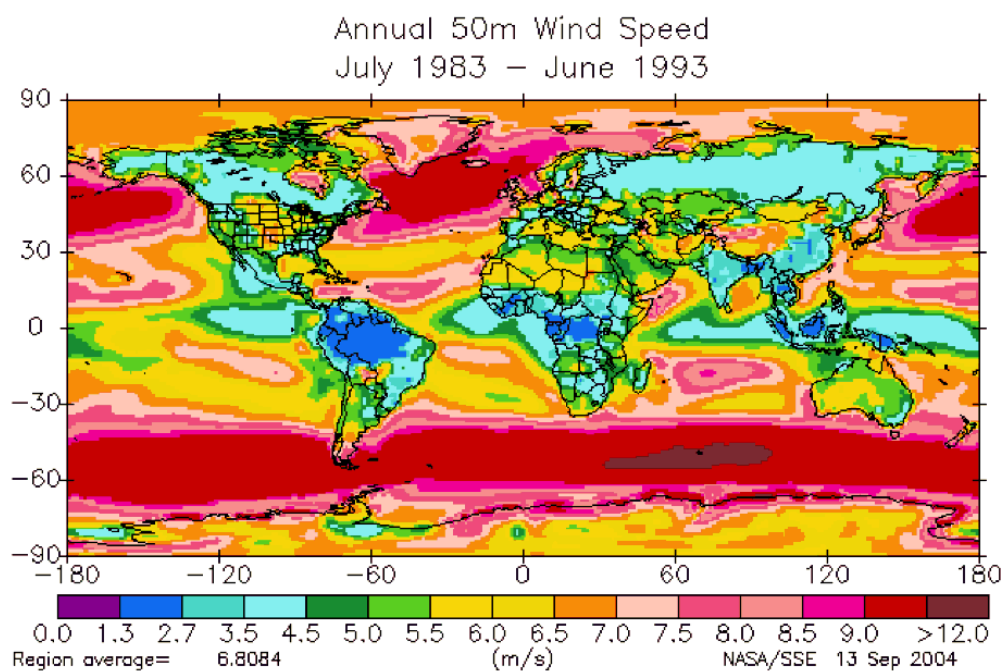


Figura 1.1 – Mapa mundial com o potencial do recurso vento, velocidade média anual, medida a 50 metros de altitude, entre Julho de 1983 e Junho 1993 [7].

Tipicamente a potência transportada pelas ondas do mar é medida em quilowatt por metro de frente de onda (kW/m). Ao comparar os dados de velocidade de vento apresentados na Figura 1.1 com a distribuição anual do potencial energético atribuído às ondas do mar, Figura 1.2, observa-se que ambas as figuras apresentam os valores mais elevados para as mesmas regiões do globo terrestre.

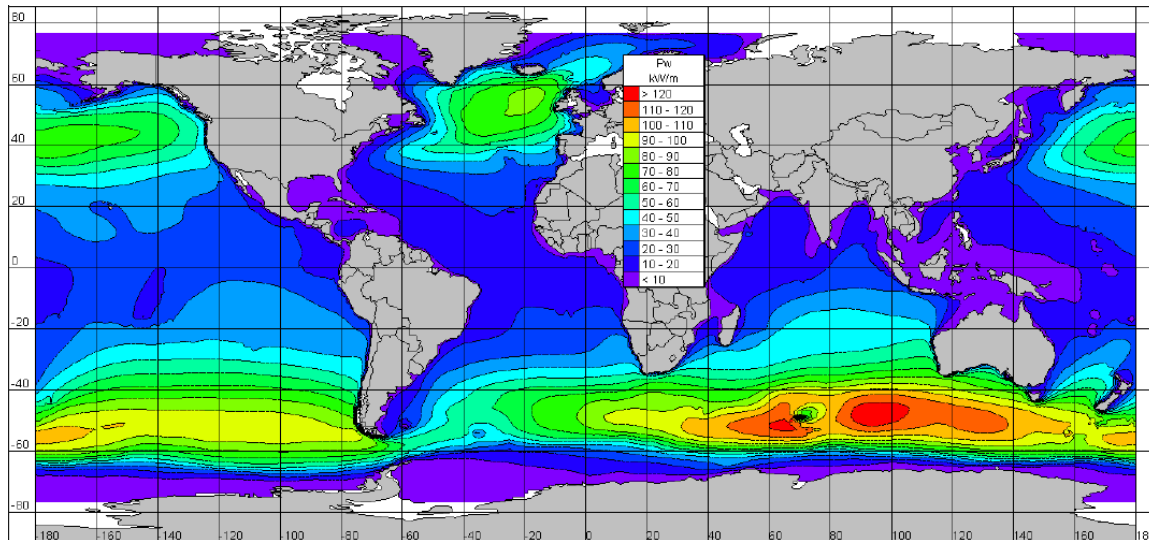


Figura 1.2 – Distribuição anual em valores médios associado à potência transportada pelas ondas do mar [8].

Tomando como referência, as linhas de latitude verifica-se, que as ondas com maior potência ocorrem entre os 40° e 60° para ambos os hemisférios (Norte e Sul). Zonas costeiras, como Oeste da Europa, América do Norte, América do Sul, Sul de África, Austrália e Nova Zelândia caracterizam-se por um elevado recurso energético e por conseguinte com condições geográficas favoráveis à implementação da energia das ondas.

Em [9] estimava que a potência do recurso disponível nas ondas de superfície, a nível global, seria de aproximadamente 1 a 10 TW para profundidades iguais ou superiores a 100 m. Em 2003 o World Energy Council publicava no seu relatório anual que a energia útil estimada era superior a 2TW. Deste modo estima-se que o recurso explorável esteja compreendido entre 10 a 25% [6] do máximo recurso disponível.

Das diferentes formas de energia dos Oceanos mencionadas e tendo em conta os dados da Tabela 1.1, [10], a energia das ondas apresenta-se como a maior das fontes de energia dos Oceanos por explorar.

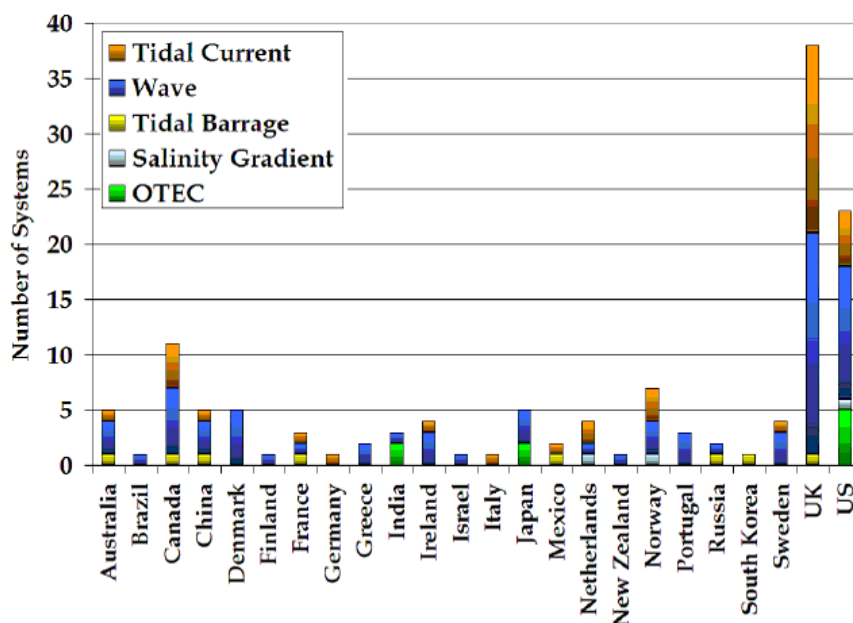
Tabela 1.1 – Resultados teóricos Anuais por tipo de energia [10].

Tipo de Energia	Energia teórica anual
Gradiente de Temperatura	10000 TWh/ano
Gradiente de Salinidade	2000 TWh/ano
Correntes marítimas	+800 TWh/ano
Marés	+300 TWh/ano
Ondas	8000 a 80000 TWh/ano

1.2 Desenvolvimento

As soluções para transformar a energia das ondas contida nos Oceanos e Mares em energia útil, não são recentes. Com efeito a primeira patente mundial para o aproveitamento desta forma de energia em energia mecânica foi publicada em 1799, Paris (França) por Girard (pai e filho). Outras referências, desde então, documentam a existência de outras soluções, como Leishman & Scobie, em 1976, que descreve o desenvolvimento de sistemas para conversão da energia das ondas desde a primeira patente Britânica, submetida em 1855, até ao ano de 1973. No entanto foi precisamente desde o ano de 1973, após o primeiro choque petrolífero², que uma intensiva actividade de pesquisa e desenvolvimento deste tipo de sistemas começou a dar os primeiros passos. No final do ano de 1973 existiam 340 patentes registadas. Passados mais de 200 anos sobre o registo da primeira patente de um sistema para conversão de energia das ondas, existem actualmente mais de 1000 patentes com técnicas para aproveitamento desta forma de energia [11].

De acordo com os dados publicados no relatório anual de 2007 pela *Implement Agreement on Ocean Energy Systems* (IEA-OES), Figura 1.3, as actividades de desenvolvimento da energia dos Oceanos, continuam a ser praticadas em inúmeros países, particularmente nos estados membros da Comissão Europeia, Estados Unidos da América, Canadá, Austrália, China, Japão entre outros.



² 1º choque petrolífero – Outubro de 1973

Figura 1.3 - Actividades de Investigação, Demonstração e Comercialização desde Dezembro de 2007 relacionadas com a Energia dos Oceanos [12].

A Europa assume-se como líder no desenvolvimento de tecnologias para aproveitamento da Energia das Ondas, destacando-se o Reino Unido como a região que mais contribui para esta posição.

A energia das Ondas, dado o seu potencial energético, detém o maior número de projectos em actividade, mais de 70, na totalidade das suas diferentes fases, desde a concepção, aos ensaios em tanque, com modelos em escalas inferiores às que se destinam à validação do conceito em ambiente real para fins de demonstração, pré-comercialização³ e por fim comercialização com a construção de parques de ondas, ver Figura 1.4.

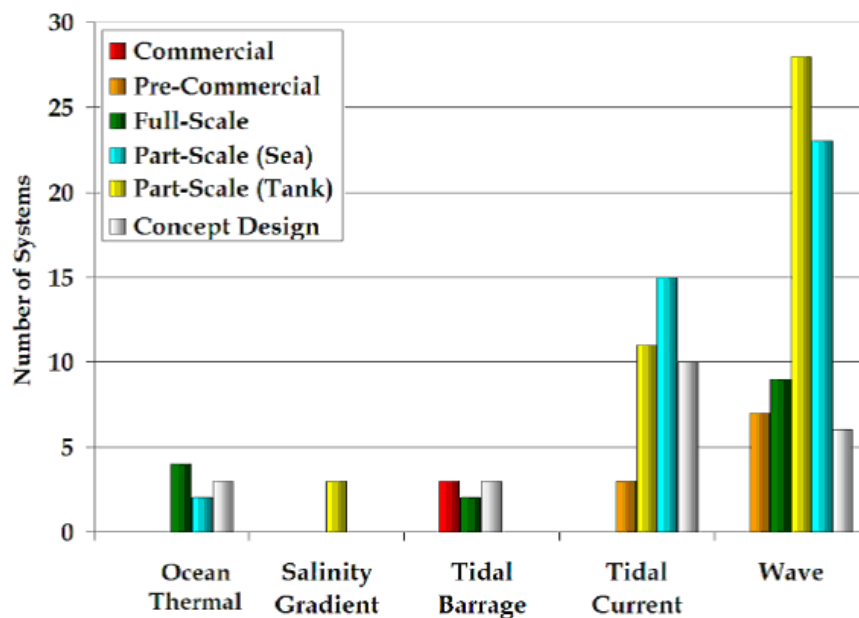


Figura 1.4 - Maturidade da Tecnologia para diferentes formas de aproveitamento da Energia dos Oceanos [10].

1.3 Potencial Económico

Apesar do potencial, deste recurso natural ser elevado, o desenvolvimento de políticas governamentais que permitam financiar e promover medidas que reduzam o risco associado ao desenvolvimento, desta forma de energia, era até ao 1º choque petrolífero de Outubro de 1973

³ Pré-comercialização: Fase de projecto, onde se espera que um conjunto de tecnologias obtenha o nível avançado de desenvolvimento que permita passar à fase de comercialização.

pouco relevante para o desenvolvimento do sector. O aumento do preço do petróleo resultado das crises petrolíferas de 1973 e 1979, no primeiro caso provocado pelo embargo das nações árabes após a guerra Israelo-Árabe e no segundo caso por revisão dos preços de mercado pela Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP) conduziram a uma diminuição drástica do crescimento económico e em conjunto a uma subida abrupta da inflação (estagflação⁴), atingindo um máximo histórico, Figura 1.5.

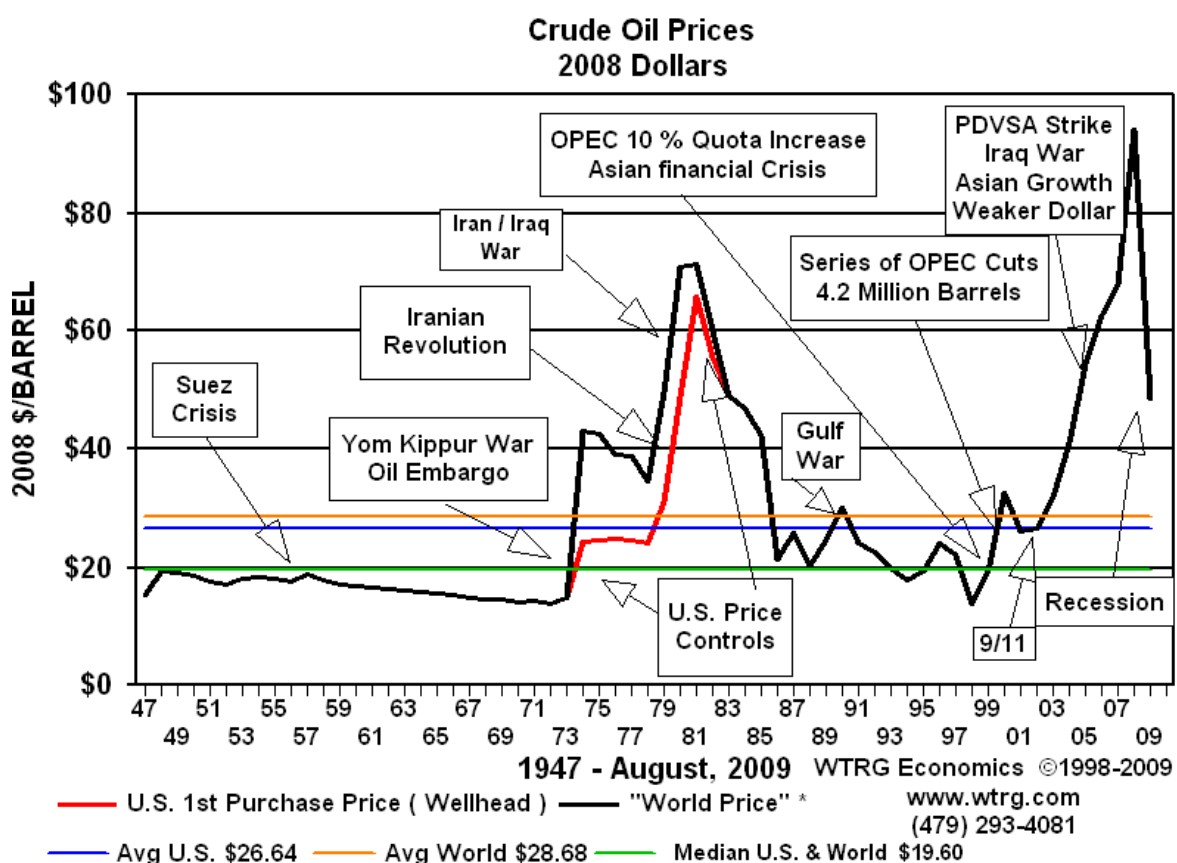


Figura 1.5 - Evolução do preço do petróleo desde 1947 a Maio de 2008 [13].

Estes acontecimentos provocaram nos países que partilham as necessidades de importação de energia e possuem condições geográficas favoráveis ao aproveitamento da energia das Ondas uma obrigação de rever os seus programas governamentais de fomento à exploração desta forma de energia [14]. A directiva comunitária 2001/77/EC é um exemplo de uma das medidas, adoptadas pelos países da União Europeia para a promoção da electricidade produzida a partir de

⁴ Estagflação – Inflação elevada em recessão económica.

fontes de energia renováveis, estabelecendo como meta que pelo menos 22% do consumo de electricidade em 2010 seja proveniente de fontes de energia renovável.

Analizando o consumo mundial de electricidade e os valores de importação de energia, verifica-se que os países de maior consumo, Figura 1.6, são respectivamente os mais importadores, Figura 1.7, e por sua vez os que apresentam o melhor recurso disponível para o aproveitamento da energia das ondas.

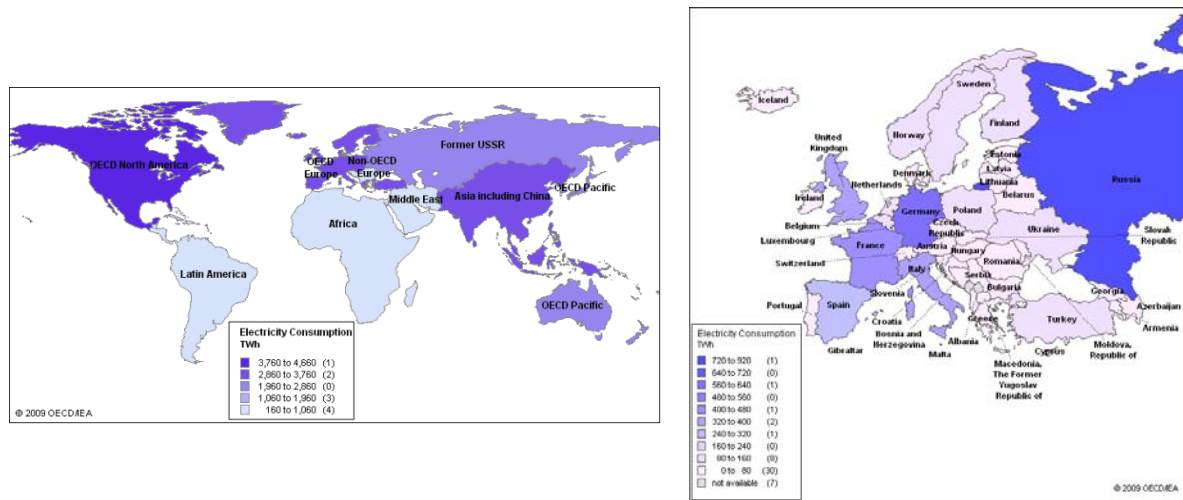


Figura 1.6 – Consumo de Electricidade 2006, resultado da soma da produção e importação de electricidade menos as exportações e perdas nas redes de transmissão e distribuição de electricidade) [15].

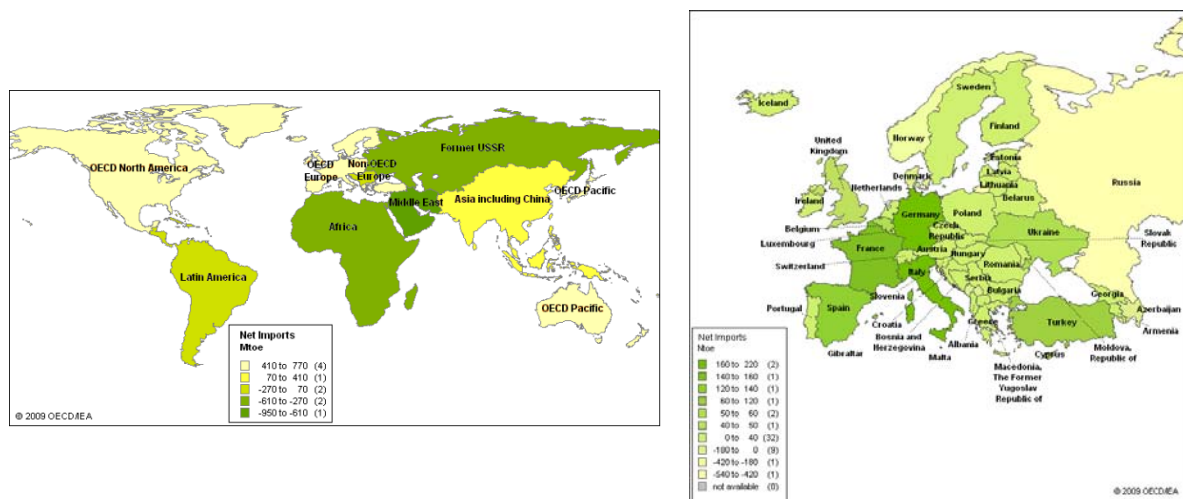


Figura 1.7 – Rede de importações 2006 (O número positivo evidencia o número de importações o número negativo as exportações) [15].

Se acrescentarmos às previsões da *Energy Information Administration* (EIA) que apontam um crescimento médio de 2,4% do consumo de electricidade, salvo países de rápido crescimento

económico como a China, que apresentam valores médios de 4,3%/ano, torna-se imperativo a aposta em fontes de energia alternativas. O Oceano aparece assim como um dos maiores fornecedores de energia renovável. Contudo, apenas alguns países da Europa detêm o acesso a este recurso, energia das ondas, sendo Portugal um deles. Estima-se que o recurso disponível na Europa seja de cerca de 300GW enquanto que em Portugal Continental seja cerca de 15GW e 6GW nos arquipélagos da Madeira e Açores [16].

Portugal situa-se numa região oceânica cujo recurso é considerado médio alto, em virtude do valor médio anual de energia das ondas ser cerca de 40 kW/m. Para além desta vantagem existem outros factores que classificam Portugal como um dos países mais favoráveis ao aproveitamento da energia com base nas ondas do mar. Destes factores mais relevantes salientam-se para além do potencial do recurso, as condições atmosféricas favoráveis, a existência de pontos de ligação à rede eléctrica ao longo da costa, águas relativamente profundas perto da costa, tradição na indústria naval com boas infra-estruturas e localizadas perto dos potenciais locais de instalação dos parques de conversão de energia das ondas em energia eléctrica [17].

1.4 Objectivos

Devido à irregularidade das ondas do mar com variações em amplitude, fase e direcção, associado a condições extremas de operação não é fácil explorar a energia das ondas para a produção de electricidade. Tal tem criado grandes desafios aos investigadores e engenheiros na procura de soluções que permitam que as estruturas que serão utilizadas para aproveitamento desta forma de energia, suportem os esforços solicitados e ao mesmo tempo tenham capacidade de fornecer energia à rede eléctrica de forma ininterrupta.

Outro dos factores inerentes às dificuldades de desenvolvimento desta forma de energia prende-se com os elevados custos dos modelos a escalas perto do real para demonstração da viabilidade do projecto, já que os modelos matemáticos não têm permitido, devido ao elevado esforço computacional exigido, reproduzir todos os fenómenos associados ao comportamento destes dispositivos. Na modelação de sistemas dinâmicos é então frequente considerar algumas simplificações que visam reduzir o esforço computacional, desenvolvendo-se modelos numéricos rápidos e simples que permitam com alguma fiabilidade e de uma forma mais económica, demonstrar os resultados obtidos em ensaios experimentais do sistema físico, por exemplo, em tanque de ondas, a escalas reduzidas.

Esta dissertação tem como objectivo a modelação numérica de sistemas de conversão de energia das ondas em energia eléctrica e o estudo das condições de operação em regime dinâmico de parques de conversores de energia das ondas. Tal inclui sistemas de armazenamento de energia e a definição de soluções de disposição da infra-estrutura dos cabos submarinos que

conduzam à interligação dos conversores de energia das ondas em electricidade à rede eléctrica situada em terra.

Os principais objectivos definidos para este trabalho foram os seguintes:

- Construção de modelos numéricos que representem o princípio de funcionamento dos sistemas de conversão de energia das ondas em energia eléctrica;
- Construção de uma plataforma de simulação da operação de parques de ondas para avaliar o impacto no comportamento dinâmico na rede eléctrica decorrente da ligação destes equipamentos;
- Identificação de requisitos técnicos para a ligação dos equipamentos de conversão de energia das ondas à rede eléctrica.

1.5 Estrutura da dissertação de mestrado

O documento está estruturado sob a forma de seis capítulos. Sendo que os capítulos 1, 2, 3 apresentam conceitos de introdução teórica ao tema em questão com os quais se pretende facilitar a interpretação do trabalho desenvolvido. Nos restantes capítulos, nomeadamente capítulo 4 e 5, descreve-se a contribuição realizada no âmbito do trabalho científico. O capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho e por fim nas referências descreve-se a documentação consultada.

Capítulo 2 – Estado da Arte: Neste capítulo caracteriza-se o recurso recorrendo à teoria linear das ondas de superfície, assim como se classifica e se descreve o tipo de tecnologias de sistemas de conversão, dando maior destaque aos sistemas que se encontram num estado mais avançado de desenvolvimento. Ainda neste capítulo são focados os desenvolvimentos ao nível dos parques de ondas e redes eléctricas Offshore.

Capítulo 3 – Modelos Matemáticos: Neste capítulo descrevem-se em detalhe os modelos matemáticos adoptados, que foram transpostos para ambiente Matlab Simulink, para permitir simular em regime dinâmico a resposta dos flutuadores com corpos de simetria axial com um grau de liberdade (Oscilação Vertical) ligados à rede eléctrica sobre diferentes topologias de rede (série e paralelo). Na secção do conversor de energia das ondas é descrito o método de caracterização das ondas de superfície, o movimento oscilatório do corpo do flutuador, sistema hidráulico com método de armazenamento de energia associado e a máquina assíncrona de rotor em curto-circuito. Na secção da Rede Eléctrica destaca-se a modelação dos componentes (transformadores e condutores eléctricos) que perfazem as redes eléctricas. Na secção dos Parques de conversão de energia das ondas são apresentadas as topologias a estudar.

Capítulo 4 – Plataforma de Simulação: Neste capítulo são identificadas as variáveis de entrada e saída dos diferentes blocos que compõem a formulação matemática adoptada em ambiente Matlab Simulink.

Capítulo 5 – Resultados de Simulação: Neste capítulo são apresentados em primeiro lugar os resultados, da dinâmica de movimentos de um conversor de energia das ondas no que a velocidades, forças, pressões, caudais, tensão e potência dizem respeito, E seguidamente é analisado o efeito na tensão da rede por variação das condições da rede eléctrica por topologia (três conversores em série ou três conversores em paralelo) e características do ponto de recepção.

Capítulo 6 – Conclusões: Neste capítulo são apresentadas as conclusões to trabalho realizado, os objectivos alcançados e as perspectivas de desenvolvimento futuro.

Capítulo 2 - Estado da Arte

2.1 Introdução

Neste capítulo, caracteriza-se o recurso energético das ondas recorrendo à teoria linear das ondas de superfície, assim como se classifica e se descreve o tipo de tecnologias que se encontram num estado mais avançado de desenvolvimento, procurando evidenciar, sempre que possível, através da informação disponível o seu princípio de funcionamento. São assim descritos os sistema de extracção de energia, designado na terminologia anglo-saxónica por PTO (Power Take-Off), métodos de controlo utilizados e formas de integração na rede eléctrica. Ainda neste capítulo são descritos os desenvolvimentos ao nível das redes eléctricas Offshore e parque de Ondas existentes.

2.2 Ondas

As ondas de superfície do Oceano são o resultado da interacção de diferentes forças. As forças predominantes são a pressão atmosférica originada pela acção do vento, os tremores de terra, a gravidade da Terra e dos corpos celestiais (Sol e a Lua), as forças de Coriolis (devido à rotação da terra) e a tensão à superfície do Oceano.

As ondas geradas pelo processo de transferência de energia provocada pela acção do vento (originada pelo diferencial térmico da Terra) sobre a superfície do Oceano, estão geralmente presentes em qualquer local do oceano, próximos da costa ou a milhares de quilómetros desta.

A abordagem teórica do problema, envolve a modelação de um fluxo de ar turbulento sobre uma superfície que varia no espaço e no tempo. Consideráveis progressos têm sido alcançados neste domínio nos últimos 40 anos, estando descritos em [18].

O processo principal da formação da onda reside na existência de um fluxo inicial de ar algures no Oceano, que exerce uma tensão tangencial sobre a superfície do Oceano, resultando na formação e crescimento de ondas. O fluxo de ar turbulento próximo da superfície dá origem a uma rápida variação da tensão de corte e diferenças de pressão. Quando estas variações se encontram em fase com as ondas já existentes ocorrem novos desenvolvimentos do estado da onda. O processo é maximizado quando a velocidade do vento é igual à velocidade da onda. A quantidade de energia transferida e a dimensão das ondas resultantes dependerá da duração, da velocidade, da distância (“*fetch*”) que o vento sopra sobre a superfície do Oceano, da profundidade e topografia do fundo do mar [19]. A quantidade de energia transferida durante um determinado período de tempo (sucessivas cristas de onda a passar num determinado ponto fixo) é definida de acordo com [20], tendo em conta a classificação do tipo de ondas, apresentado em 1951 por Munk.

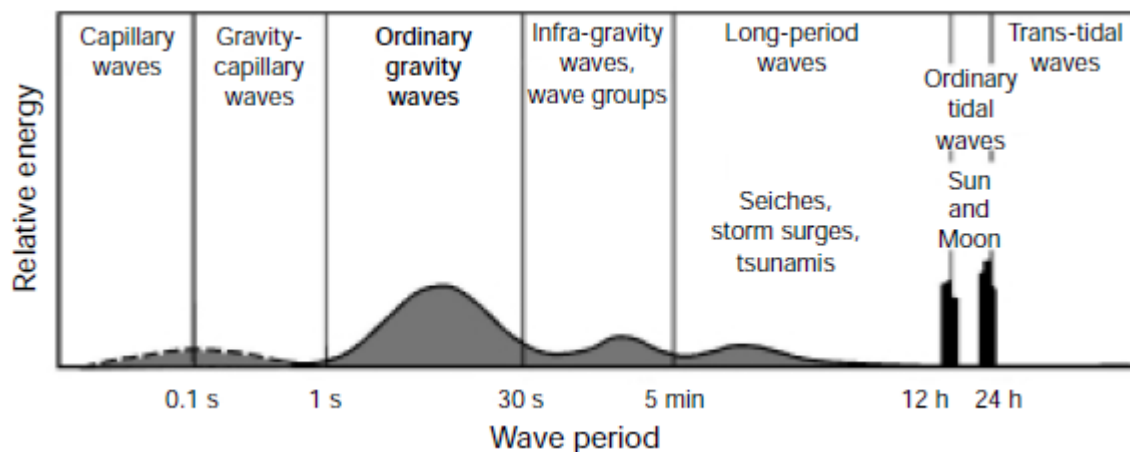


Figura 2.1 – Classificação das ondas do Oceano segundo o período de Onda (Munk 1951) [20].

As ondas geradas num dado local (vagas) originam uma aparência desordenada na superfície do oceano desse local. À medida que estas ondas de forma irregular se afastam do local de formação e se propagam a grandes distâncias, em águas profundas com um mínimo de perda de energia, vão adquirindo um aspecto mais ordenado a que se dá o nome de ondulação, designado na terminologia anglo-saxónica de “*swell*”, ver Figura 2.2.

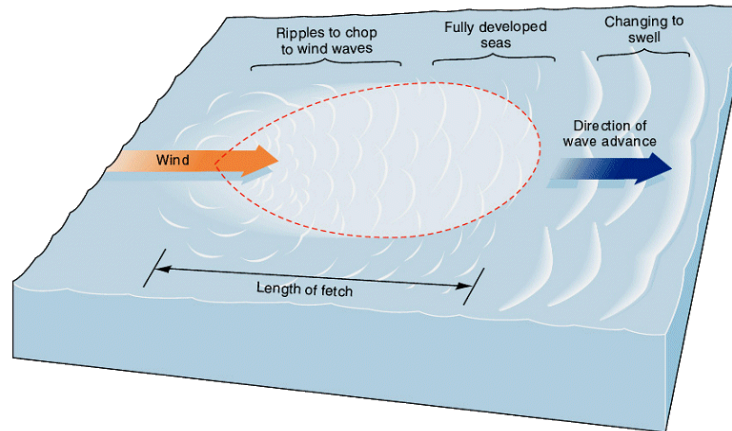


Figura 2.2 – Desenvolvimento das Ondas de Superfície por acção do vento na superfície oceânica [21].

2.2.1 Teoria Linear

Em águas profundas, segundo (Southgate, 1981), as ondas sucedem-se com um perfil aproximadamente sinusoidal. Caracterizando-se em termos da distância (λ - Comprimento de Onda) e tempo (T - Período) entre sucessivas cristas (*crests*) ou cavas (*troughs*), ver Figura 2.3.

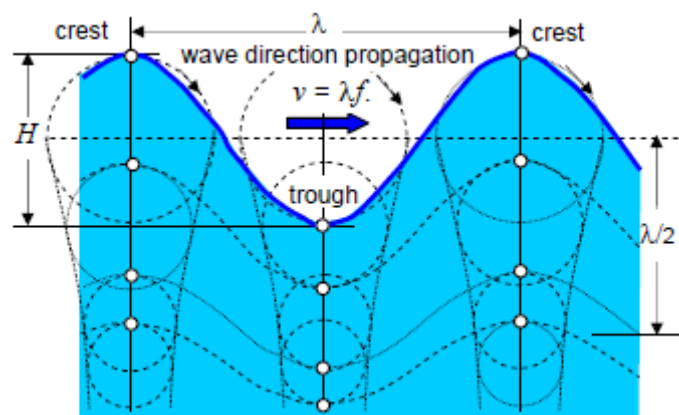


Figura 2.3 – Propagação das ondas do mar [22].

Relacionando-se os parâmetros do comprimento de onda e do período resulta (2.1), onde g é a aceleração da gravidade.

$$\lambda = \frac{g \cdot T^2}{2\pi} \quad (2.1)$$

A velocidade das ondas é obtida pela relação entre o comprimento de onda e o inverso do período (f - frequência). Desta relação obtém-se que ondas de maior comprimento viajam mais rápido que as ondas de menor comprimento. A frequência é representativa do número de ondas que ocorre num determinado local.

2.2.2 Influência da Profundidade

Ao analisar o efeito da profundidade na trajectória das partículas de água verifica-se que à medida que as ondas se propagam, a distribuição das partículas de água à superfície e em profundidade descrevem um movimento circular, desde que a profundidade não seja muito baixa relativamente ao comprimento de onda (águas profundas). Próximo da superfície, a trajectória circular descrita é do mesmo tamanho que a altura de onda. À medida que aumenta a profundidade a amplitude do círculo diminui exponencialmente, de tal forma que se considera que 95% da energia das ondas é armazenada entre a superfície e uma profundidade igual a um quarto do comprimento de onda.

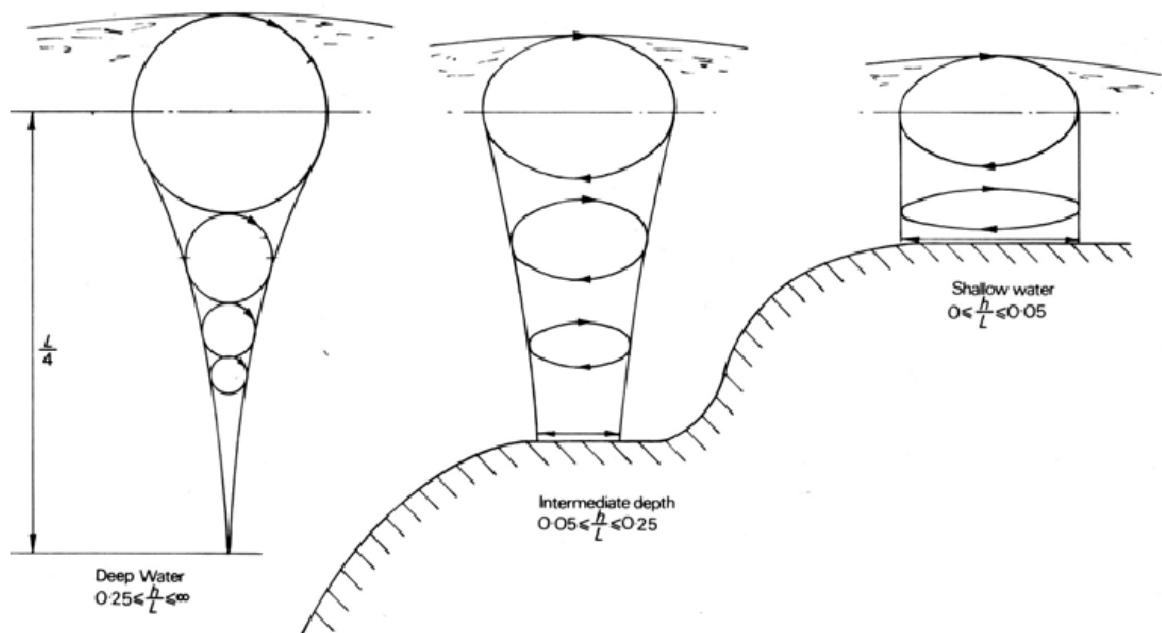


Figura 2.4 – Trajectórias circulares descritas pelas partículas de água em função da profundidade (h) e comprimento de onda (L) [21].

Enquanto o valor da profundidade for superior a metade do comprimento de onda ($\lambda/2$) a influência do fundo do mar no movimento das partículas torna-se desprezável, uma vez que corresponde a menos de 4% dos movimentos que se registam à superfície [20]. Consoante o aproximar da costa e por conseguinte, com a diminuição da profundidade (águas pouco profundas, “*Shallow Water*”, profundidade menor que $\lambda/2$) a forma da onda do mar altera-se de diferentes formas segundo Southgate 1981 e 1987. Apenas o período permanece constante. A velocidade de propagação da onda diminui com a diminuição da profundidade e por conseguinte o comprimento de onda também diminui de acordo com a equação (2.2).

$$v = \lambda \cdot \frac{1}{T} \quad (2.2)$$

De acordo com o perfil estabelecido de uma onda sinusoidal, a potência da onda pode ser descrita segundo (2.3), onde ρ é densidade da água do mar, H a altura da onda (dobro da amplitude) e P a potência expressa por unidades de comprimento da crista da onda.

$$P = \frac{\rho \cdot g^2 \cdot T \cdot H^2}{32\pi} \quad (2.3)$$

A formulação adoptada na teoria linear para relacionar os diferentes parâmetros descritos em função de diferentes tipos de profundidade é apresentada no Anexo A.

2.2.3 Ondas de Superfície no Oceano

O perfil regular (*swell*) descrito na teoria linear pode apenas ser observado quando as ondas deixam de estar sob a influência do vento. Na realidade a acção do vento cria uma constante variação da altura, período e direcção das ondas formando um perfil desordenado e irregular. Estes fenómenos têm vindo a ser demonstrados por equipamentos de medição, como é o caso das bóias ondógrafos localizadas em diferentes pontos do globo terrestre [23] com a principal função de caracterizar o recurso oceânico, desde a sua orientação, altura de onda, período e temperatura, apenas para citar algumas das medidas possíveis de obter com este tipo de equipamento.

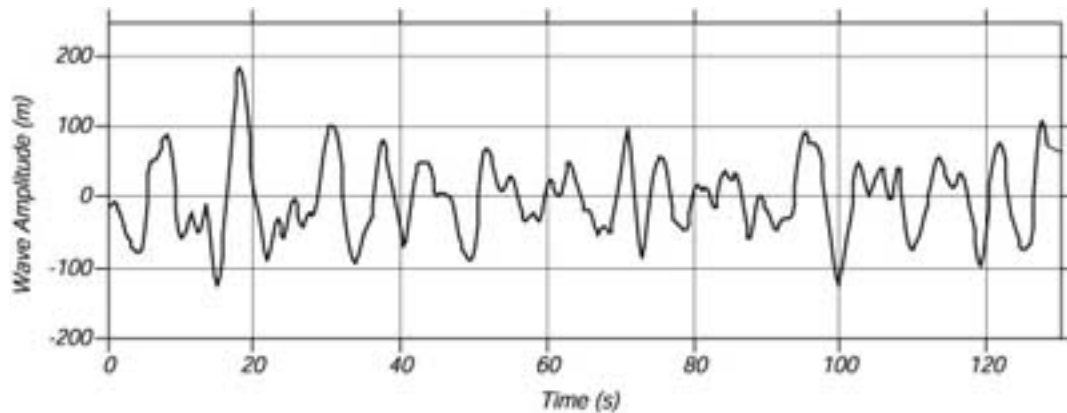


Figura 2.5 – Registro de uma bóia oceanográfica ao largo do Atlântico Norte [24].

Observou-se que para um determinado período de tempo, entre uma hora a três horas, que as ondas não evoluem consideravelmente. Permanecendo em regime estacionário, com uma determinada orientação, altura e período representativo [24].

Parâmetros estatísticos têm que ser usados para descrever este tipo de estados. Um estado de mar é normalmente descrito pela altura significativa (H_s – na literatura anglo-saxónica *significant wave height*) e um período de onda. Utiliza-se o período médio da onda (T_z – na literatura anglo-saxónica *average wave period*) se a série temporal é analisada estatisticamente, ou o período de energia (T_e – na literatura anglo-saxónica *energy period*) se o espectro das condições de mar foi obtido de medições realizadas em mar. Os parâmetros mais utilizados para determinar as características dos dispositivos de aproveitamento da energia das ondas são o valor médio quadrático da altura de onda, H_{rms} , ou a altura significativa ($H_s \sim 4H_{rms}$) e o período de energia (T_e).

2.2.3.1 Distribuição estatística para pequenos períodos de tempo da altura de onda e período

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 pelas passagens repetidas no nível médio da superfície da onda. O tempo entre sucessivos movimentos ascendentes cruzando o nível médio define o período (T) da onda. A distância vertical entre a cava e a crista da onda por sua vez define a altura individual da onda (H). Figura 2.6. Sendo assim, o período torna-se particularmente importante quando se pretende analisar o comportamento das estruturas flutuantes ao período de ressonância.

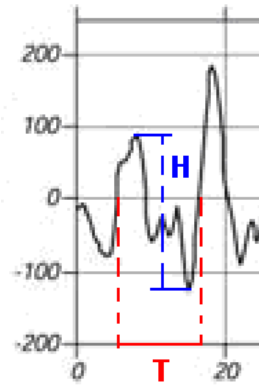


Figura 2.6 - Caracterização da altura individual da onda.

A altura média da onda, H_m , pode ser definida como a média das alturas individuais, (2.4), enquanto que a altura significativa, H_s , deriva da análise estatística e é considerada como um terço da média das ondas maiores presentes na série temporal analisada. O que representa 1,6 vezes o valor da altura média.

$$H_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i \quad (2.4)$$

$$H_s = H_{1/3} = 1,6 \cdot H_m \quad (2.5)$$

Da experiência recolhida da Engenharia Oceanográfica demonstra-se, em [25], que estatisticamente o número de ondas de diferentes alturas que podem ocorrer em determinados períodos de tempo, geralmente curtos (aproximadamente 20 minutos) ou a fracção de ondas que poderão ser maiores do que uma certa altura de onda (h), podem ser obtidos por uma função distribuição de probabilidade de Rayleigh para um dado parâmetro de H_s , através da expressão (2.6).

$$P\{H \leq h\} = 1 - \exp\left[-2\left(\frac{h}{H_s}\right)^2\right] \quad (2.6)$$

A altura máxima provável de ocorrer para uma série de ondas individuais (N) numa condição de mar com altura significativa (H_s) pode ser expressa segundo (2.7).

$$H_{\max} = H_s \sqrt{\frac{1}{2} \ln(N)} \quad (2.7)$$

2.2.3.2 Distribuição da Energia das Ondas

O método de determinação da altura significativa, até agora apresentado, pode, por sua vez, ser derivado analiticamente da série de ondas a analisar. Para tal é necessário determinar a energia contida em diferentes frequências da série de ondas.

Os estados de mar caracterizados pelos parâmetros H_s e T_e podem ser determinados através do conhecimento das condições de vento (Hasselman et al, 1976; Darbyshire and Draper 1963). A modelação da superfície do Oceano numérica ou em tanques de ondas experimentais utiliza espectros de ondas derivados do conhecimento das condições de vento para estados de mar em desenvolvimento, Espectro de JONSWAP e, totalmente desenvolvidos, Espectro de Pierson e Moskowitz, expressão (2.8) onde A é a constante e B função da velocidade de vento.

$$S(f) = \frac{A}{f^5} e^{(-B \cdot f^{-4})} \quad (2.8)$$

A modelação do recurso é descrita por Dean e Dalrymple (1991), assim como para aplicações mais específicas por Goda (2000) e Tucker e Pitt (2001). O conceito de espectro é baseado no trabalho de Joseph Fourier (1768 - 1830), que mostrou que quase qualquer função $f(t)$, pode ser representada no intervalo $(-T/2 < t < T/2)$ como a soma de uma série infinita de funções co-seno e seno com frequência de onda harmónica. A aplicação das séries de Fourier vêm confirmar a aplicabilidade das equações da Teoria Linear das Ondas de Superfície do Oceano. O espectro de energia das ondas é deste modo obtido da derivada da análise de Fourier à elevação da Onda, como se demonstra na Figura 2.7.

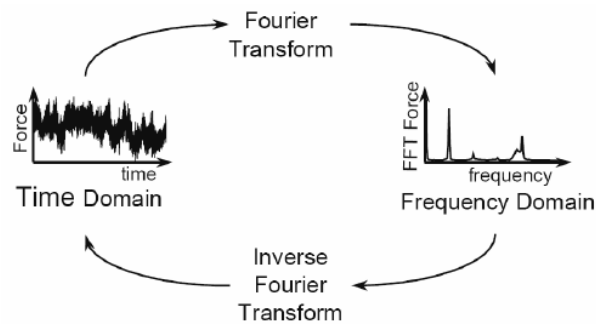


Figura 2.7 – Esquema de transformação de uma série temporal para o domínio das frequências através da transformada de Fourier e o tratamento inverso [26].

Deste modo a variação da superfície pode ser interpretada como a sobreposição de um número infinito de ondas regulares propagando-se em diferentes direcções, amplitudes, períodos e fases, como se pode verificar pela Figura 2.8.

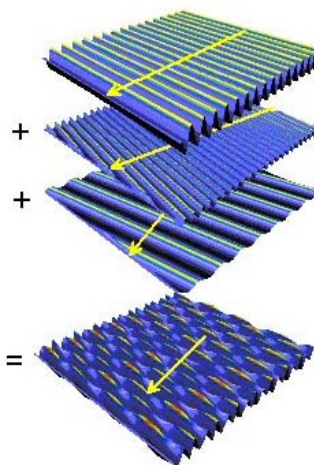


Figura 2.8 – Resultado da soma de ondas com diferentes amplitudes, comprimentos e direcções [27].

A energia contida em cada componente de onda é proporcional ao quadrado da altura de onda, podendo deste modo a distribuição de cada frequência ser apresentada pelo espectro de energia das ondas, $S(f)$, que descreve a densidade de energia contida em diferentes frequências como se verifica na Figura 2.9.

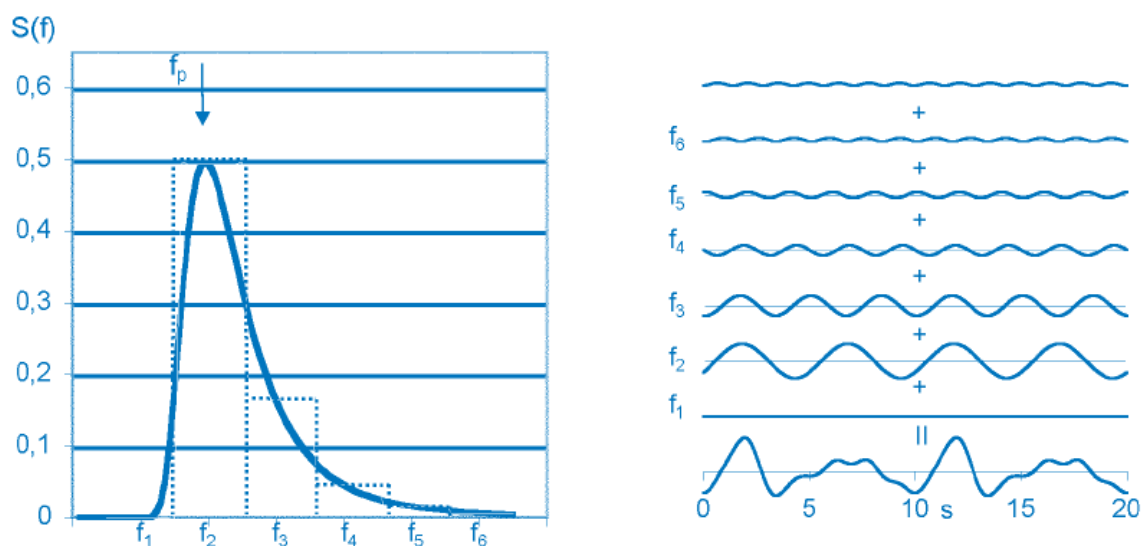


Figura 2.9 – O espectro de energia das ondas mostra a distribuição de energia para cada frequência [25].

De acordo com a Figura 2.9 as ondas contêm energia $S(f)$ dentro da gama de frequências $(f_1 - \Delta f/2 ; f_1 + \Delta f/2)$. O total de energia do espectro (m_0) deriva do total da área formado pelo espectro. O espectro caracteriza-se frequentemente por apresentar um valor de pico para uma determinada frequência. A frequência para o qual ocorre esse valor é designado por frequência de pico (f_p). O período que corresponde a essa frequência é considerado o período de pico da onda (T_p), dentro das condições de mar que contêm maior quantidade energia e pode ser definido através da expressão (2.9).

A altura significativa por sua vez é proporcional à raiz quadrada da área do espectro, conforme se explicita na expressão (2.10).

$$T_p = \frac{1}{f_p} \quad (2.9)$$

$$H_s = H_{m_0} = 4\sqrt{m_0} \quad (2.10)$$

Conclui-se pelo conhecimento do espectro que descreve as condições de mar, consideradas estacionárias durante um intervalo de tempo, torna-se possível identificar a altura significativa, H_s , o período da onda e a potência dos estados de mar. Sendo para tal necessário calcular os momentos espectrais definidos por (2.11), (2.12) e (2.13).

$$m_0 = \int S(f) df \quad (2.11)$$

$$m_{-1} = \int f^{-1} S(f) df \quad (2.12)$$

$$m_2 = \int f^2 S(f) df \quad (2.13)$$

O período médio pode ser determinado pela relação entre os momentos espectrais m_0 e m_2 recorrendo à expressão (2.14).

$$T_z = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (2.14)$$

O período de pico como anteriormente referido, corresponde à frequência para o qual ocorre o maior valor de energia. O período de pico é aproximadamente 1,4 vezes o valor do período médio, (2.15), e por último o período de energia foi introduzido em estudos de potência das ondas, uma vez que é proporcional ao momento m_{-1} , que por sua vez está fortemente relacionado com baixas frequências do espectro (longos períodos de ondas), conforme se expressa em (2.16).

$$T_p = 1,4T_z \quad (2.15)$$

$$T_e = \sqrt{\frac{m_{-1}}{m_0}} \quad (2.16)$$

A aproximação entre o período de energia e o período médio pode ser expressa segundo (2.17).

$$T_e = 1,2T_z \quad (2.17)$$

2.2.3.3 Potência das Ondas do Mar

A potência média associada a condições de mar em águas profundas (Watt por metro crista da onda), que descreve a potência da onda média que passa por um metro de superfície fictícia de largura vertical perpendicular à direcção de propagação e se estende até ao fundo do mar, pode ser calculado através da expressão (2.18). Substituindo na expressão (2.18) m_{-1} com base nas expressões (2.10) e (2.16) obtém-se (2.19).

$$P_w = \frac{\rho \cdot g^2}{4\pi} m_{-1} \quad (2.18)$$

$$P_w = \frac{\rho \cdot g^2}{64\pi} H_s^2 T_e \quad (2.19)$$

A partir dos dados obtidos ao largo da costa portuguesa por uma bóia de medições e do cálculo do nível de potência média de cada medida na tabela de dispersão do nível médio de energia da onda é obtido pela média do nível de potência total (portanto, visto como um nível de energia) pelo número de ocorrências (H_s, T_e) ,

2.2.3.4 Direcção

Na fase inicial de geração, as cristas das ondas são pequenas podendo-se propagar em diferentes direcções em função da direcção do vento. Quando as ondas se encontram numa fase de maior desenvolvimento, ou seja, quando o vento consegue estabelecer uma direcção de propagação predominante, persiste um determinado ângulo sobre a direcção média de propagação das ondas. A Figura 2.10 apresenta as rosas da direcção das ondas com a frequência de ocorrência e a potência média da onda ao longo do período de medição de funcionamento de uma bóia oceanográfica na costa portuguesa pelo INETI.

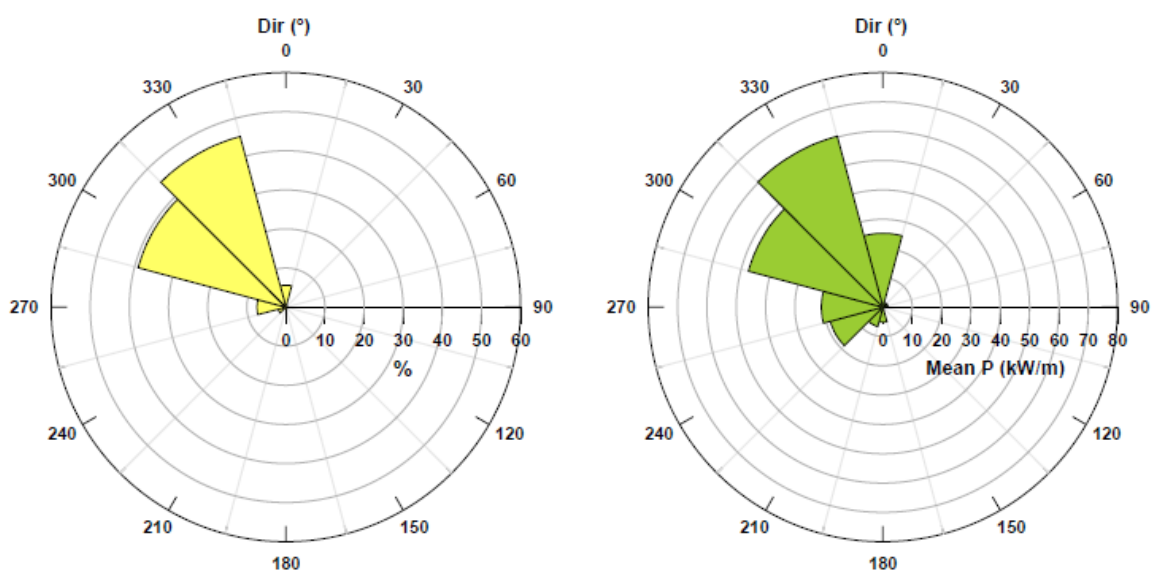


Figura 2.10 – Rosas com a direcção média anual da onda por sector θ e potência média dos estados do oceano com sectores de θ de 30° .

Nas zonas de geração das ondas (“qualquer lugar do oceano no qual exista vento”) ou onde as ondas se aproximam da costa as direcções da onda variam devido a factores como a radiação provocada pelas variações da profundidade. Torna-se, indispensável reproduzir o campo de ondas em função de um espectro direccionado. As indicações são que os modelos de previsão que não consideram a direcção da onda conseguem prever alturas de onda durante a refacção vinte por cento superiores quando comparadas com os modelos que consideram os modelos de direcção espectral (Collins, et al. 1981). Deste modo recorre-se a equações mais refinadas (Longuet-Higgins, 1963, Mitsuyasu et al, 1964 e Hasselmann 1980) do que as anteriormente descritas para a descrição dos estados de mar que incluem a propagação da onda em diferentes direcções (Θ). A premissa básica de todas as funções de propagação paramétricas é que o único pico do espectro direccionado é adequadamente descrito pelo produto de duas funções, como se expressa em (2.20).

A função do espectro de ondas é por uma função de espalhamento ou dispersão $f(\Theta)$, *definida por (2.21)*, que descreve a quantidade de energia que se movimenta em diferentes direcções (Θ).

$$S(f, \Theta) = S(f) * f(\Theta) \quad (2.20)$$

Onde s é o parâmetro de dispersão que é função da frequência e da velocidade do vento e A uma constante.

$$f(\Theta) = \begin{cases} A \cdot \cos^{2s}(\Theta) & |\Theta| < \frac{\pi}{2} \\ 0 & \text{outro caso} \end{cases} \quad (2.21)$$

O integral da função para todas as direcções é considerado unitário, conforme (2.22).

$$\int_0^{2\pi} f(\Theta) d\Theta = 1 \quad (2.22)$$

A relação entre o parâmetro constante A e o parâmetro de dispersão é fornecido por (2.23).

$$A = \frac{1}{\pi} \frac{2 * 4 * 6 * \dots * 2s}{1 * 3 * 5 * \dots * (2s - 1)} \quad (2.23)$$

A caracterização do recurso oceânico, para um determinado local de instalação, ganha particular importância no projecto de dispositivos de conversão de energia das ondas, no que diz respeito à quantificação das cargas que podem ocorrer na estrutura e potência a produzir.

2.3 Tecnologias

Ao longo dos anos têm-se assistido ao desenvolvimento e investigação de diversos conceitos para o aproveitamento da energia das ondas para produzir electricidade, no entanto apenas alguns conseguiram atingir a fase de desenvolvimento de implementação em mar real. Tal acontecimento pode ser explicado, de acordo com Twidell & Weir em [28], devido a alguns dos problemas que este tipo de tecnologias enfrenta:

- Existência de estados de mar tipicamente irregulares em amplitude, fase e direcção;
- Necessidade de prever tempestades e estados extremos;
- Regimes de funcionamento mais atraentes muito afastados da costa, e por conseguinte com maiores os custos de desenvolvimento;
- Dificuldade na integração com máquinas eléctricas;
- Diversidade de conceitos associada à forma de aproveitamento da energia das ondas explorando energia potencial ou cinética.

A existência de diversos conceitos e por conseguinte diferentes métodos de aproveitamento leva a que existam diferentes tipos de classificação das tecnologias, a saber:

- Com a sua localização e profundidade para as quais estão desenhados (na linha da costa “Onshore” ou “Shoreline”, perto da costa “Nearshore”, ou ao largo “Offshore”);
- Princípio de operação como se apresenta na Tabela 2.2;
- Estado do dispositivo (Sistema de primeira, segunda e terceira geração), relativo ao tempo de desenvolvimento e custos económicos [29].

Deste modo consideraram-se os diferentes princípios de operação como critério para apresentar os conceitos presentes na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Tabela comparativa de tecnologias.

	Nome do Dispositivo	Princípio de Operação	Terminologia Anglo-saxónica	Organização	País
	Pelamis	Atenuador	Attenuator	Pelamis Wave Power Ltd	UK (Escócia)
	Pico OWC	Coluna de Água Oscilante (CAO)	Oscillating Water Column – OWC	Wave Energy Centre	Portugal (Açores)
	Wave Dragon	Dispositivo de Galgamento	Overtopping Device	Wave Dragon Aps	Dinamarca
	Waveroller	Conversores Oscilantes de Translação das Ondas	Oscillating Wave Surge Converters – OWSC	AW Energy Oy.	Finlândia
	AquaBuOY	Sistema Oscilante de Absorção Pontual com Simetria Axial	Axisymmetrical Point Absorber	Finavera Renewables	Irlanda
	AWS (Archimedes Wave Swing)	Dispositivo Submerso de Diferença de Pressão	Submerged Pressure Differential	AWS Ocean Energy Ltd	UK (Escócia) original Holanda

Outras soluções poderiam ter sido enquadradas neste exercício de classificação, como o McCabe Wave Pump (atenuador), o Mighty Whale (coluna de água oscilante flutuante), o Oyster (Conversores Oscilantes de Translação das Ondas), o Tapchan (Dispositivo de Galgamento costeiro) e o Wavebob (Sistema oscilante de Absorção Pontual com Simetria Axial), só para citar alguns dos nomes que designam os dispositivos. Estes e outras soluções são apresentados e mencionados em várias referências entre as quais se destacam [6], [30] e [31]. As soluções a seguir descritos têm em comum o facto de todos eles terem sido testados em condições de mar real.

2.3.1 PELAMIS

O sistema Pelamis é uma estrutura de aço semi-submersa de 120 metros de comprimento e 3,5 metros de diâmetro composta por quatro secções cilíndricas alinhadas com a direcção de propagação das ondas. Estas secções são unidas por juntas articuladas, onde se encontram os três módulos de conversão de potência, designados na terminologia anglo-saxónica por *Power Conversion Module* (PCM).

2.3.1.1 Power Take-Off

Quando as ondas incidem sobre a estrutura, cada PCM permite o movimento em torno de dois eixos independentes, esses eixos estão desfasados 90° um do outro. No entanto os eixos não se encontram perfeitamente alinhados na horizontal e vertical, são parcialmente deslocados 25° a 30° para permitir formar um par de eixos ortogonais inclinados, conforme se demonstra na Figura 2.11.

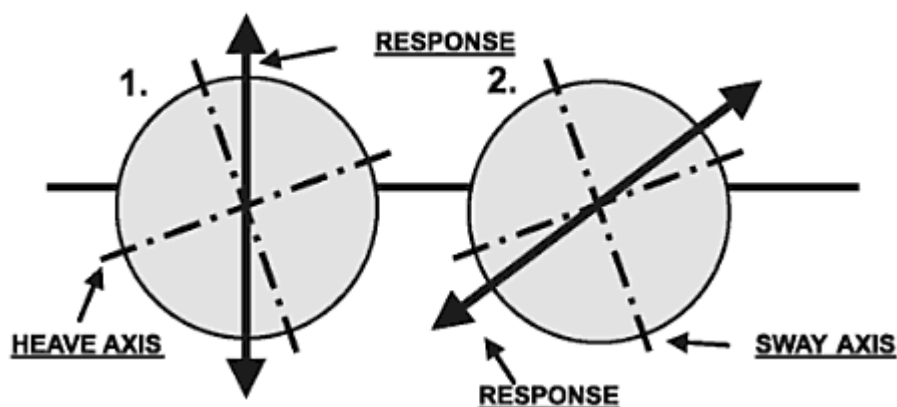


Figura 2.11 – Representação da resposta do movimento de cada PCM à incidência das ondas na estrutura.

O eixo que permite o movimento numa direcção mais vertical é designado como eixo de arfagem (*Heave*), o eixo que permite mais liberdade nos movimento laterais é conhecido como o eixo de deriva (*Sway*). Juntos, esses eixos permitem que o movimento se realize em qualquer direcção, como uma junta universal num eixo de transmissão de um automóvel [6].

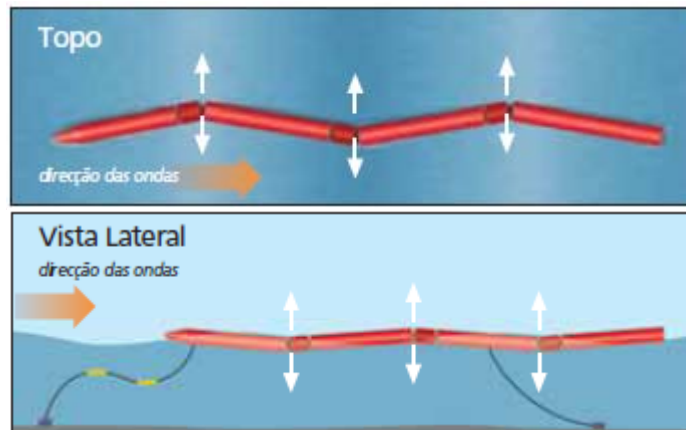


Figura 2.12 – Representação do movimento de cada máquina, vista de topo e vista lateral.

Aos movimentos descritos pelas juntas articuladas é-lhes associado uma resistência imposta pelo accionamento dos cilindros hidráulicos para bombear óleo biodegradável a alta pressão, por intermédio de acumuladores para os motores. Os motores hidráulicos por sua vez accionam os geradores eléctricos de forma a produzir electricidade.

2.3.1.2 Controlo

A descrição apresentada, pelos autores, pode ser analisada e desenvolvida em duas partes distintas. A primeira parte, que se designa de transmissão primária consiste no recurso aos cilindros hidráulicos e respectivo controlo para transformar a energia contida nas ondas em energia passível de ser armazenada por interacção com a estrutura. A segunda parte, ao qual designam transmissão secundária, é composta por motores hidráulicos acoplados a geradores eléctricos trifásicos. Esta separação, fornecida pelos acumuladores de alta pressão, permite obter uma eficiente absorção de uma grande parcela da energia incidente. A eficiência global de conversão de energia varia entre uma gama de cerca de 70% nos níveis de baixa potência para mais de 80% à potência total instalada [6]. Para se obter estes valores estabelece-se que o binário resistente imposto pelos cilindros terá que ser variável ao longo de cada ciclo de onda. Recorrendo a válvulas controladas electronicamente para regular em tempo real o caudal que circula entre os cilindros, os

acumuladores e os reservatórios. Estabelecendo desta forma diferentes combinações de funcionamento nas câmaras dos cilindros. A Figura 2.13 apresenta um dos sinópticos utilizados pelos utilizadores no controlo do Pelamis, onde se pode verificar as medidas que se regista por módulo de potência do ponto de vista hidrodinâmico e potência geradas. Na Figura 2.14 apresenta-se o diagrama simplificado do PTO do Pelamis.



Figura 2.13 – Ilustração da aplicação gráfica do interface com o utilizador para o controlo do Pelamis [6].

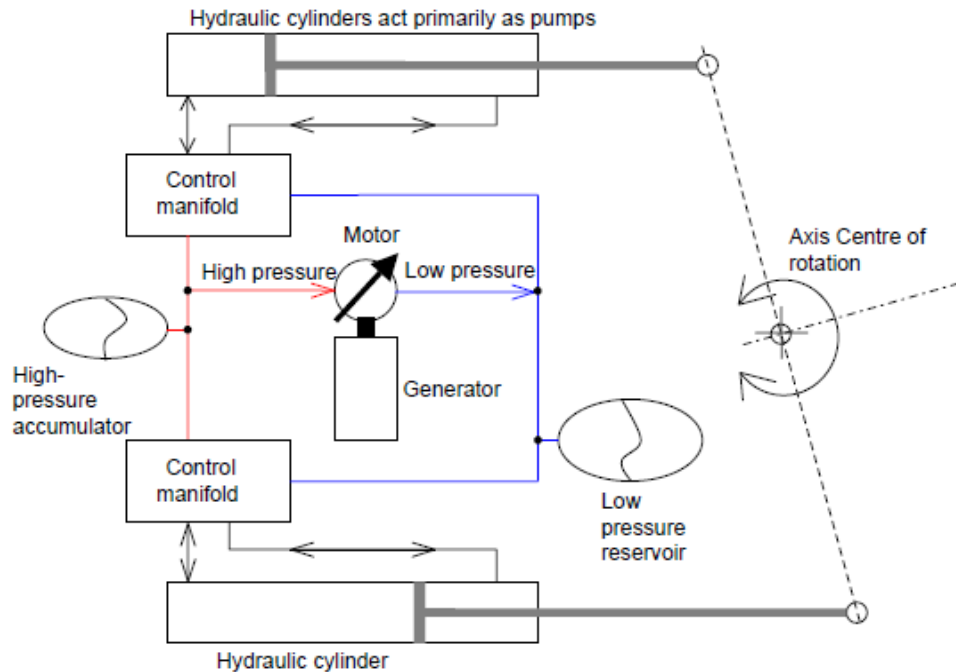


Figura 2.14 – Representação simplificada do esquema do sistema de PTO do Pelamis [32].

A potência total instalada do Pelamis P-750 é de 750 kW distribuída, como anteriormente referido, por três módulos de potência, representado na Figura 2.15, cada um com capacidade para gerar uma potência de 250 kW. Cada circuito hidráulico que compõe os módulo de potência tem a capacidade de gerar uma potência de 125 kW.

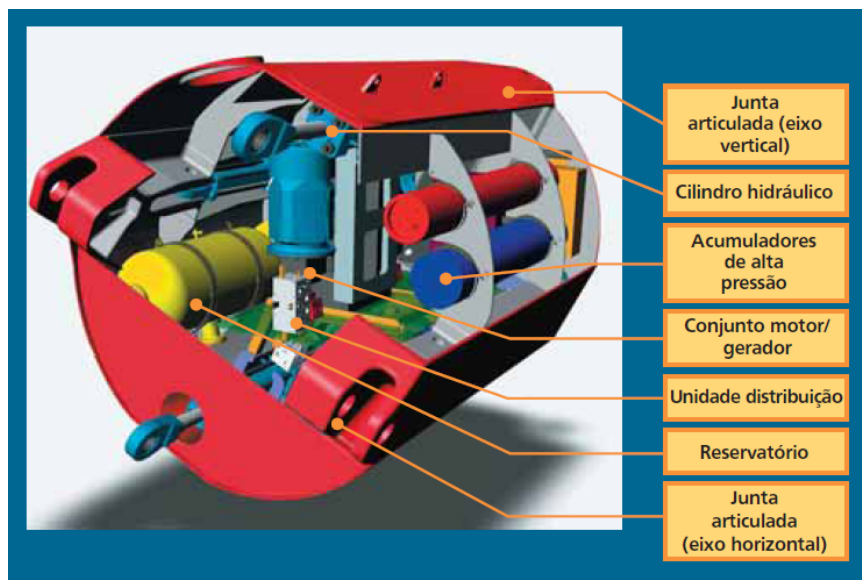


Figura 2.15 – Representação gráfica do módulo de potência do Pelamis [6].

2.3.1.3 Integração na Rede Eléctrica

A electricidade é produzida em cada um dos módulos por geradores eléctricos de indução com uma tensão de 690 V, é transportada por intermédio de cabos eléctricos instalados no interior do Pelamis até ao “nariz” onde se encontra instalado o transformador. O transformador, por sua vez encarrega-se de elevar o nível de tensão (especificado pelas necessidades de interligação da rede eléctrica e pelo projecto do parque de ondas) antes de se ligar ao cabo submarino, que se encontra estático no fundo do mar. A ligação do Pelamis ao cabo submarino é feita por um cabo flexível e conectores regulamentados para o efeito. Deste modo a energia eléctrica produzida é entregue à rede eléctrica através de um único cabo submarino, como se apresenta na Figura 2.16.

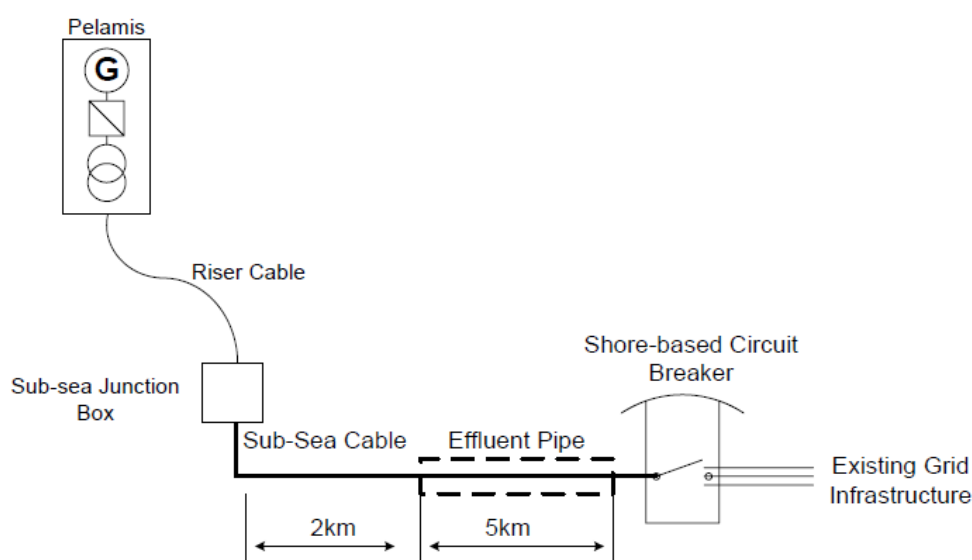


Figura 2.16 – Interligação eléctrica de uma máquina do tipo Pelamis [29].

2.3.1.4 Sistema de Amarração

O Pelamis foi desenhado para ser instalado em regiões com 50 a 70 m de profundidade (tipicamente entre 5 e 10 km da costa) onde os climas de ondas de águas profundas (mais poderosos) podem ser aproveitados. A sua fixação no local de instalação é conseguida recorrendo a um sistema de amarração, solidário com o movimento que o Pelamis descreve em função da direcção dominante de propagação das ondas de superfície. Esse sistema de amarração recorre a um sistema de bóias e pesos que previnem a tensão excessiva nos cabos enquanto mantêm a máquina em posição, conforme se pode observar pela Figura 2.17.

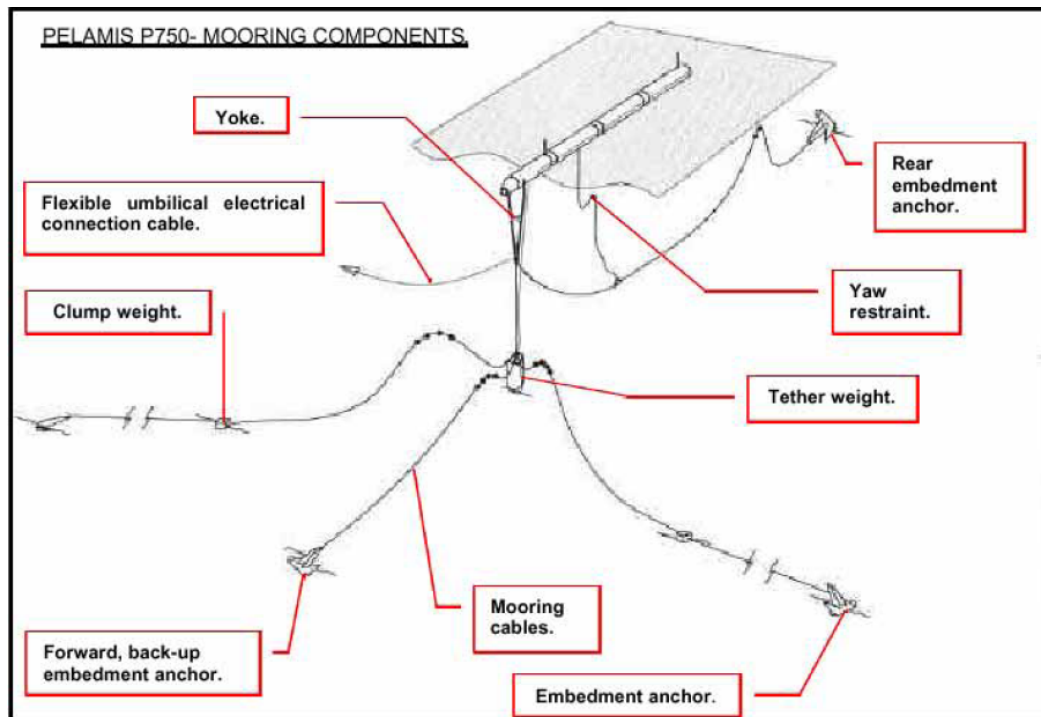


Figura 2.17 – Representação do sistema de amarração de uma máquina Pelamis [30].

2.3.1.5 Sobrevivência

Uma das características chaves do Pelamis é a sobrevivência. Todos os conversores de energia das ondas fazem uso das forças hidrostáticas em climas de ondas moderados (impulsão *versus* peso ou pressão hidrostática). No entanto, e em casos extremos (como por exemplo as tempestades) são as forças hidrodinâmicas que dominam (inércia, resistência, etc.). O Pelamis minimiza os efeitos nefastos e é praticamente invisível no que diz respeito a grandes efeitos hidrodinâmicos. A configuração das juntas permite o ajuste da resposta da máquina induzindo um comportamento ressonante que maximiza a captura de energia em estados de mar moderados. O controlo dessa configuração permite a maximização da captura de energia para os regimes menos poderosos e a garantia de sobrevivência da máquina nos regimes mais energéticos [33].

2.3.1.6 Resultados Numéricos e Experimentais

Modelos Numéricos foram utilizadas para simular a hidrodinâmica e dinâmica geral do sistema. Os modelos foram desenvolvidos no domínio da frequência e no domínio do tempo (Figura 2.18). No domínio da frequência os modelos permitiram uma optimização global do sistema recorrendo a modelos lineares na modelação do comportamento do controlo do dispositivo [32].

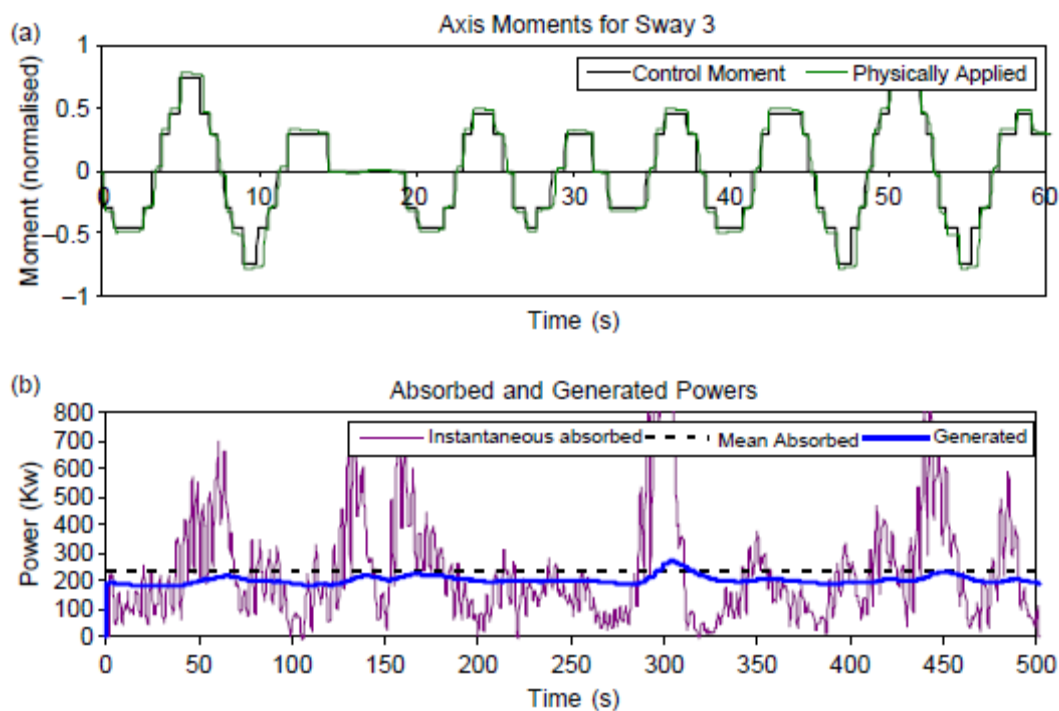


Figura 2.18 - Exemplos de simulação (momento e potência) obtidos da operação do Pelamis em mar moderado [32].

2.3.2 Pico OWC

O dispositivo de coluna de água oscilante construído na linha da costa, “shoreline”, no lugar do Cachorro, Ilha do Pico, nos Açores para conversão de energia das ondas, foi um dos primeiros sistemas a ser construído (1995-1999) à escala real [34]. É constituído essencialmente por uma estrutura oca, em betão, formando uma câmara pneumática de baixa pressão, ver Figura 2.19, que comunica com a água do mar através de uma abertura na parte inferior da parede frontal e com a atmosfera através de um orifício colocado na parte superior onde se encontra instalado o PTO.

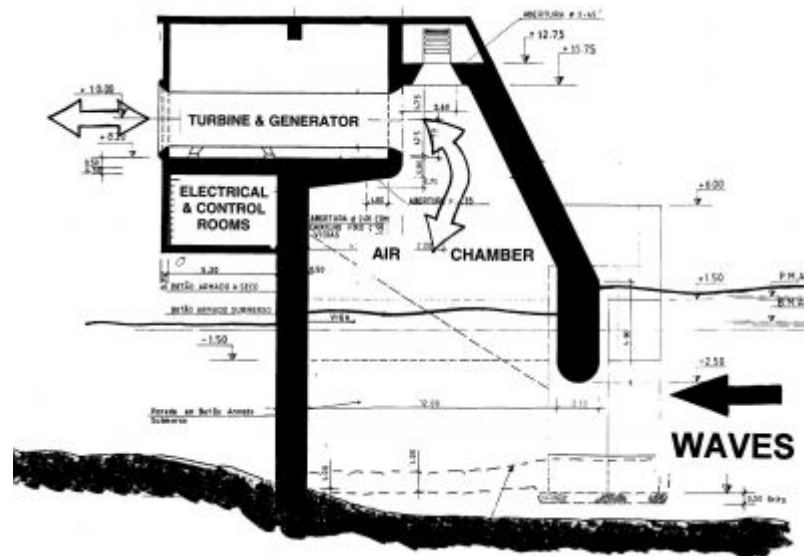


Figura 2.19 – Central piloto europeia da energia das ondas do Pico, Açores – Portugal, corte vertical [33].

2.3.2.1 Power Take-Off

As ondas, ao incidirem na estrutura, provocam uma oscilação do nível da superfície livre da água (massa de água) no interior da câmara pneumática, parcialmente submersa, forçando o ar existente a fluir em sentidos alternados, consoante a coluna de água oscilante. Por conseguinte, a compressão e a descompressão desse fluxo de ar bidireccional é direccionado por uma conduta em contacto com a atmosfera, onde se encontra instalada uma turbina de ar (Turbina Wells), auto-rectificadora com 2,3 metros de diâmetro e com pás simétricas que asseguram um sentido de rotação unidireccional, necessário ao accionamento do gerador assíncrono, não sendo para tal necessário qualquer sistema de rectificação por válvulas.

2.3.2.2 Controlo

As turbinas Wells apresentam como uma das vantagens a particularidade de operar em condições em que o caudal de ar turbinado oscila entre zero e um valor máximo, permitindo deste modo optimizar a sua resposta em função das condições do estado do mar existentes, por variação da velocidade de rotação. Actuando sobre o gerador assíncrono do tipo duplamente alimentado (na literatura anglo-saxónica *DFIG – Double Fed Induction Generator*) com potência nominal de 400kW por intermédio de conversores electrónicos de potência com o recurso a

estratégias de controlo estudadas [35] é possível estabelecer a velocidade de rotação do grupo turbina-gerador para valores desejados. Na Figura 2.19 apresenta-se os principais componentes descritos, assim como uma vista ampliada do grupo turbina-gerador implementado.



Figura 2.20 – Representação dos componentes constituintes do sistema OWC e vista ampliada do seu grupo (turbina e gerador) [36].

O efeito de inércia dos elementos rotativos que compõem a turbina apresenta-se como uma vantagem neste tipo de dispositivo, dado que se torna possível armazenar temporariamente energia sob a forma de energia cinética (efeito *flywheel*), permitindo suavizar as oscilações de potência a entregar à rede eléctrica [35].

2.3.2.3 Integração na rede Eléctrica

A energia eléctrica é injectada na rede local da Electricidade dos Açores (EDA) por intermédio de dois transformadores colocados em contentores a 100 metros do dispositivo [36].

2.3.2.4 Sistema de Amarração

O Coluna de água Oscilante apresentado não necessita de sistemas de amarração dado de tratar de um construção realizada em solo da Ilha dos Açores.

2.3.2.5 Sobrevivência

Para evitar sobrecargas na turbina, por aumento da pressão na câmara pneumática e entrada em perda de potência em condições de mar agitado, existe uma válvula de alívio cuja posição se pode controlar entre 0% e 100%, evitando caudais excessivos na turbina.

2.3.2.6 Resultados Numéricos e Experimentais

Alguns dos resultados apresentados na Figura 2.21 indicam que fechando a válvula de alívio a potência pneumática disponível na câmara de ar é praticamente igual à que se encontra disponível na turbina Wells. O que significa que as perdas aerodinâmicas são muito pequenas. Também é visto que a energia eléctrica entregue à rede é muito mais estável, como resultado da estratégia de controlo e da inércia da turbina [6].

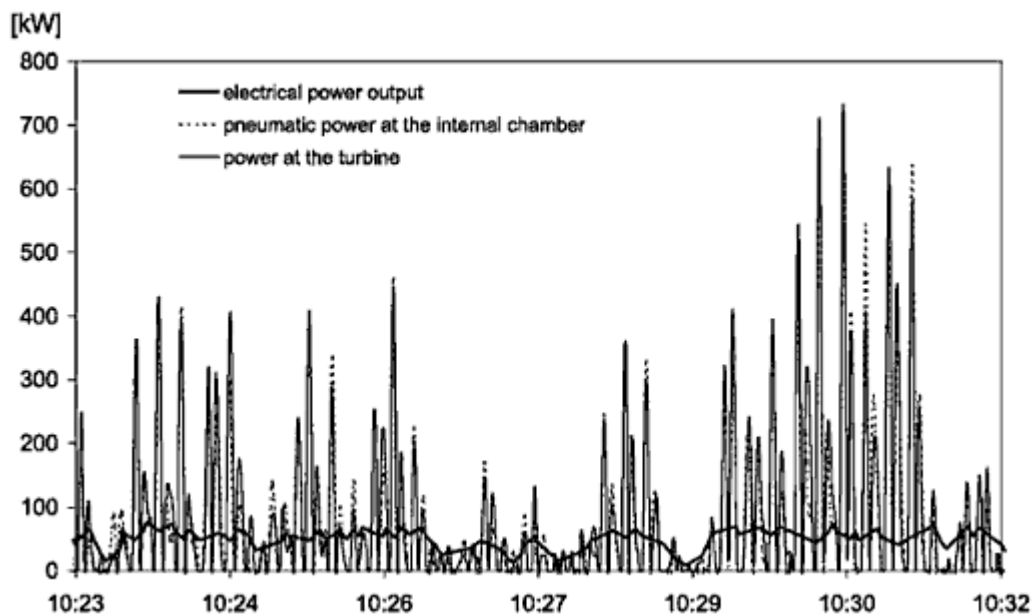


Figura 2.21 – Gráfico da série temporal com a potência pneumática disponível na câmara de ar, com a potência pneumática disponível na turbina e a potência eléctrica entregue à rede [36].

Das medições efectuadas foi possível constatar que os valores relativos à potência média fornecida à rede eléctrica e os valores médios quadráticos da pressão de ar no interior da câmara pneumática eram coincidentes com os obtidos pelo modelo numérico utilizado para projectar a aerodinâmica da turbina [35]. Note-se que os dados obtidos só são possíveis porque a velocidade do fluxo de ar que se aproxima da turbina é muito uniforme [37].

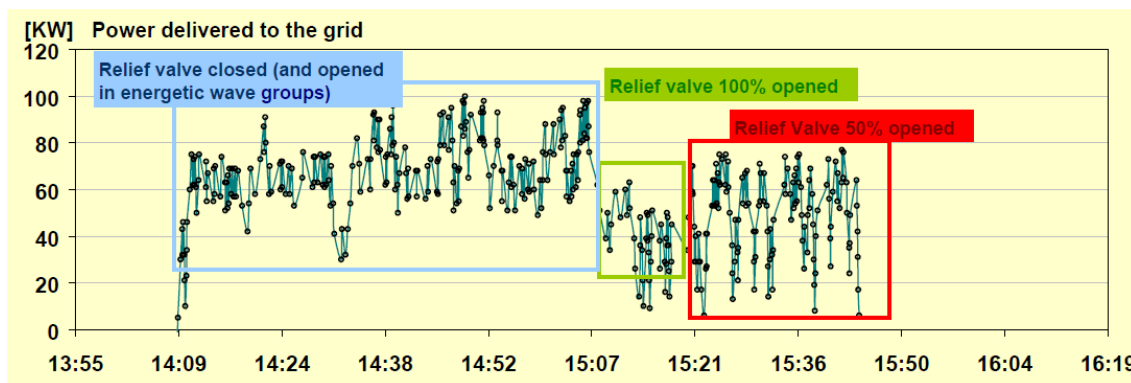


Figura 2.22 – Gráfico com um excerto da série temporal de potência eléctrica entregue à rede durante um período funcionamento do OWC [35].

2.3.3 Wave Dragon

O Wave Dragon é um conversor de energia das ondas do tipo de galgamento, flutuante e desenhado para ser instalado em profundidades superiores a 20 metros [6].

O seu princípio de funcionamento baseia-se no já conhecido e comprovado modo de funcionamento das centrais Hidroeléctricas. Consiste basicamente em dois reflectores de ondas em aço e/ou de betão armado que concentram a onda incidente para uma rampa com dupla curvatura (elíptica e circular), Figura 2.23. Parte da água que é transportada pela onda incidente ao “galgar” a rampa é armazenada temporariamente num grande reservatório sobrelevado relativamente ao nível médio da superfície livre do mar, Figura 2.24. Esta água armazenada é posteriormente libertada para accionar o sistema de extracção de energia, composto por turbinas.

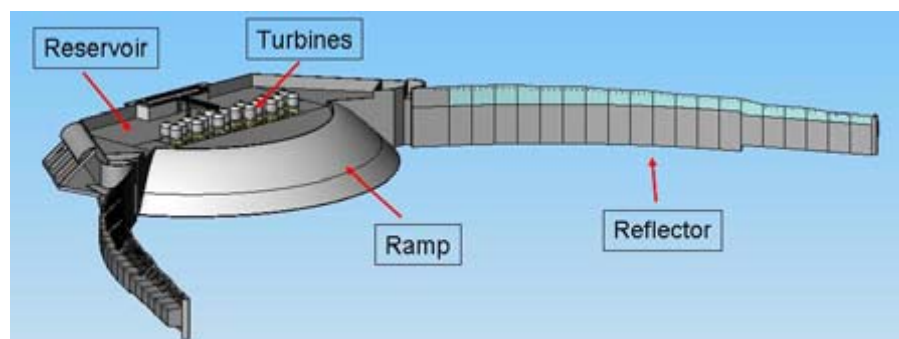


Figura 2.23 – Representação da rampa com dupla curvatura do Wave Dragon [38].

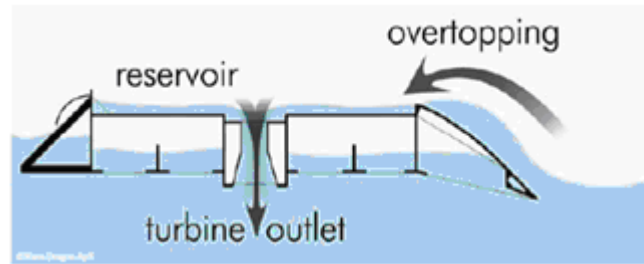


Figura 2.24 – Princípio básico do funcionamento do Wave Dragon [38].

2.3.3.1 Power Take-Off

As condições de funcionamento das turbinas do Wave Dragon diferem fortemente das utilizadas nas centrais hidroeléctricas, pelo facto de terem que operar para valores de queda de água muito baixos, variando entre 0,4 e 4 metros. O que para além de se encontrar no limite da experiência das turbinas existentes (ver Figura 2.25) apresenta uma variação extremamente ampla.

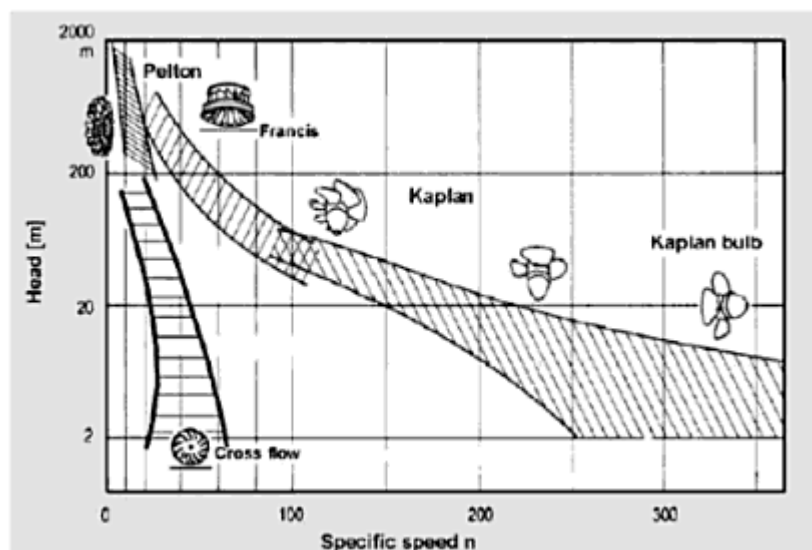


Figura 2.25 – Gráfico com o desempenho das turbinas comuns de acordo com as suas características [39].

Por outro lado, devido à distribuição estocástica do galgamento da onda e da capacidade limitada de armazenamento, as turbinas têm de ser controladas desde o zero à plena carga, com muita frequência. O ambiente de operação hostil (Condições climáticas adversas) é outro dos factores que difere das turbinas utilizadas nas centrais hidroeléctricas. Devido em particular, à

janela temporal limitada, para acesso à plataforma *offshore* para trabalhos de manutenção, permitida pelas condições climáticas, dado se tratar de uma estrutura não tripulada.

As turbinas hidráulicas do Wave Dragon são turbinas de baixa queda do tipo Kaplan adaptadas para operar a velocidades variáveis que se encontram acopladas a geradores eléctricos síncronos de ímanes permanentes.

2.3.3.2 Controlo

Para se obter a produção máxima de energia, as turbinas precisam de ser ligadas e desligadas com muita frequência. De forma a viabilizar o projecto, duas configurações da turbina foram projectadas (Figura 2.26). Encontrando-se em testes no protótipo [40].

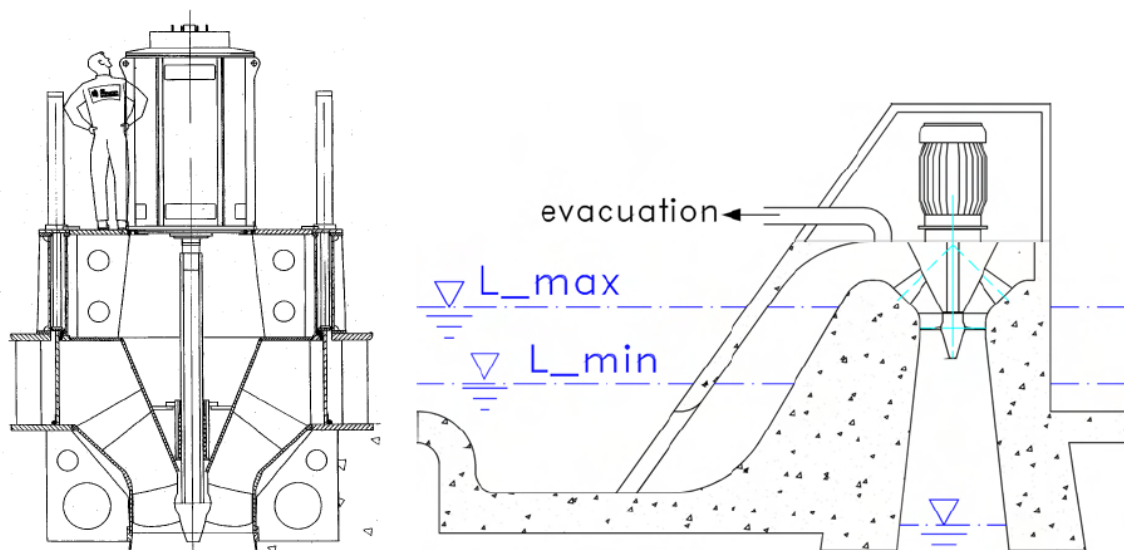


Figura 2.26 – À esquerda: Turbina do Wave Dragon à escala; Direita: Princípio de funcionamento do Wave Dragon [38].

O funcionamento eficiente do nível de descarga é assegurado pela utilização de 16 turbinas relativamente pequenas que podem ser ligadas e desligadas individualmente, ao invés de um pequeno número de grandes turbinas.

Para garantir uma elevada eficiência para diferentes quedas de água, as turbinas directamente acopladas a geradores síncronos de ímanes permanentes são operadas a velocidade variável, recorrendo a conversores de electrónica de potência que controlam a velocidade de rotação dos geradores eléctricos.

Uma das principais características de funcionamento do Wave Dragon é a capacidade de ajustar a sua condição de flutuabilidade durante condições de tempestade ou em situações de variação da altura de onda de forma a maximizar a energia produzida e garantir estabilidade do

dispositivo. Este processo é conseguido, alterando a pressão nas câmaras de ar que se encontram abertas ao mar (Figura 2.27).

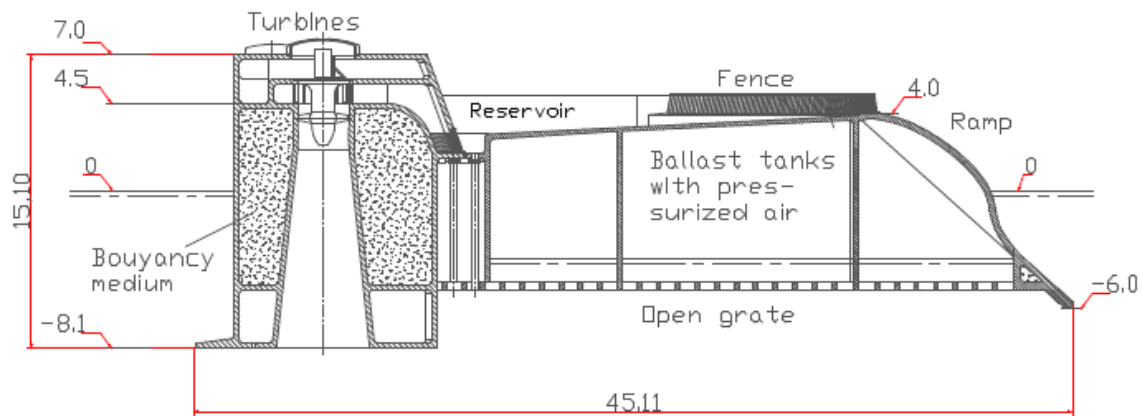


Figura 2.27 – Representação da secção de rampa e principais partes constituintes do Wave Dragon, corte vertical [38].



Figura 2.28 – Protótipo do Wave Dragon durante o lançamento em Março de 2003. As aberturas da câmara de ar utilizadas no sistema de controlo de estabilidade [38].

A variação da condição de flutuabilidade tem presente o nível de água armazenado no reservatório. Se o nível de água armazenada está próximo do nível total do reservatório, o bordo livre (altura entre a linha de água à superfície do mar e o topo da rampa) pode ser aumentado. Por

outro lado, o bordo livre deve ser diminuído se o nível de água se encontrar próximo do instante de desligar as turbinas [38].

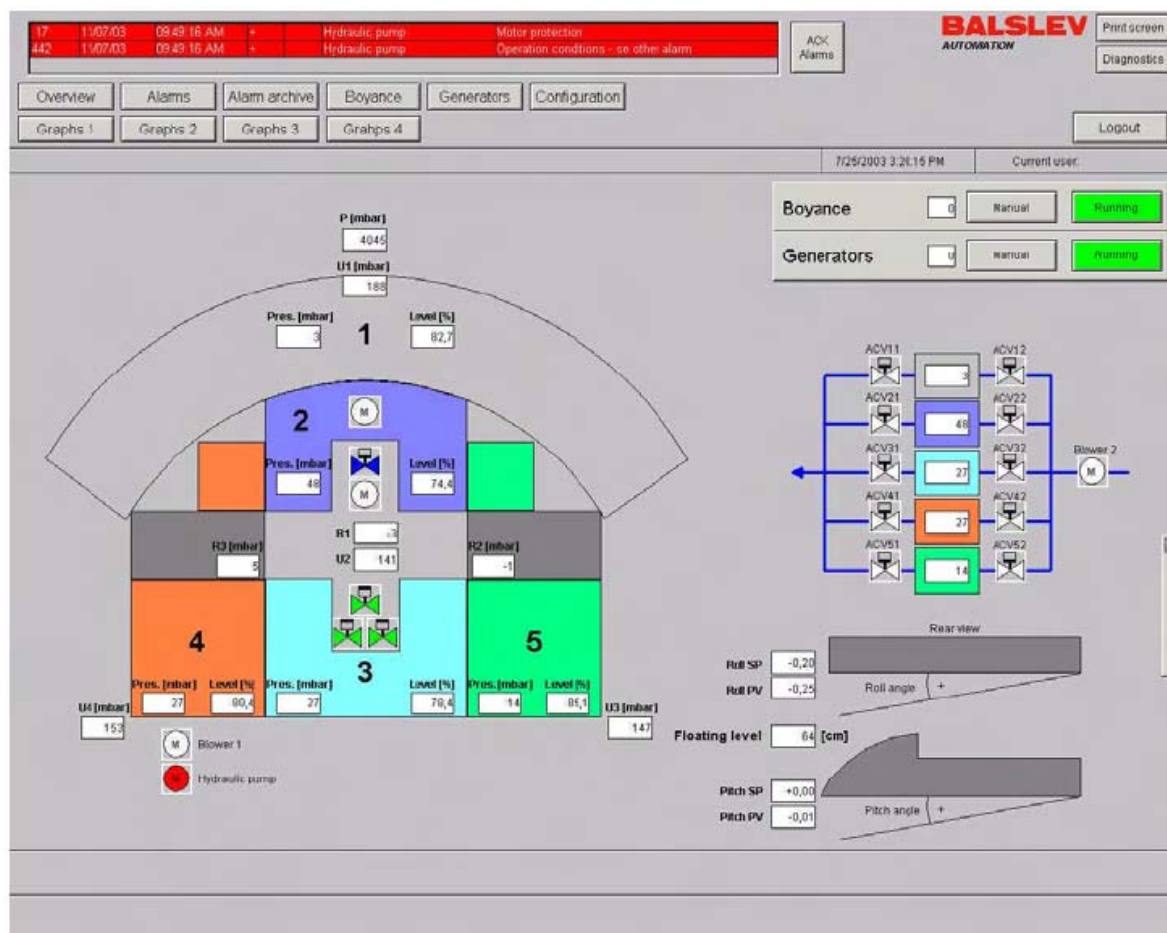


Figura 2.29 – Sinóptico principal do software de SCADA do Wave Dragon [38].

2.3.3.3 Integração na Rede Eléctrica

O Wave Dragon utiliza conversores electrónicos de potência e um transformador instalado no próprio para interligar com a rede eléctrica no nível de tensão especificado. Supondo que o sistema no Wave Dragon vai ser construído com base em 16 geradores, a topologia apresentada na Figura 2.30 poderia ser aplicada. Cada gerador tem um conversor dedicado AC/DC/AC projectado para a potência nominal do gerador. Este sistema permite maximizar a eficiência de cada gerador [41].

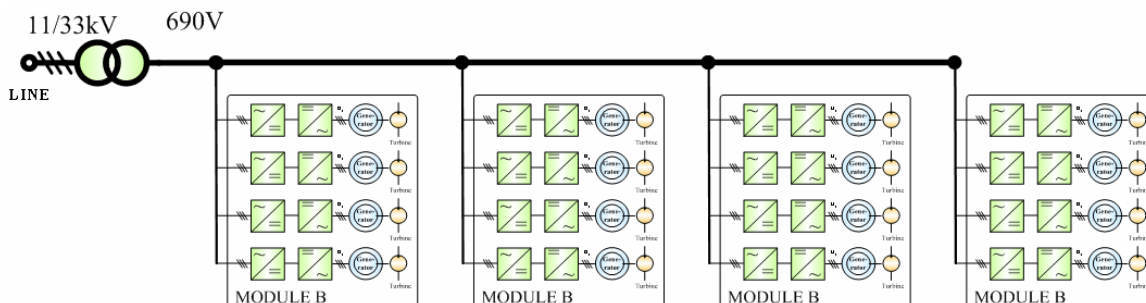


Figura 2.30 – Esquema unifilar da tecnologia Wave Dragon composta por 16 grupos (turbina e gerador), controlados individualmente por um conversor AC/DC/AC [41].

2.3.3.4 Sistema de Amarração

O sistema de amarração é uma parte vital do conceito Wave Dragon. Sendo assim o sistema utilizado pelo Wave Dragon é um tipo de amarração em forma de catenária, Figura 2.31. Ele não só permite amarrar o Wave Dragon ao fundo do mar, como é projectado para interagir e até neutralizar o Wave Dragon, a fim de reduzir as forças no sistema de amarração e fixar os reflectores de onda. Estes reflectores de ondas são mantidos em posição por parte do sistema de amarração e em parte por uma configuração de cabos, conforme se demonstra na Figura 2.32.

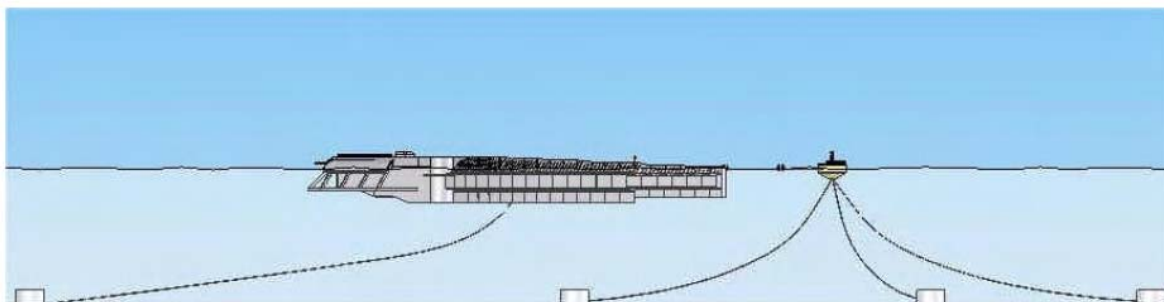


Figura 2.31 – Representação do sistema de amarração utilizado na unidade de demonstração [38].

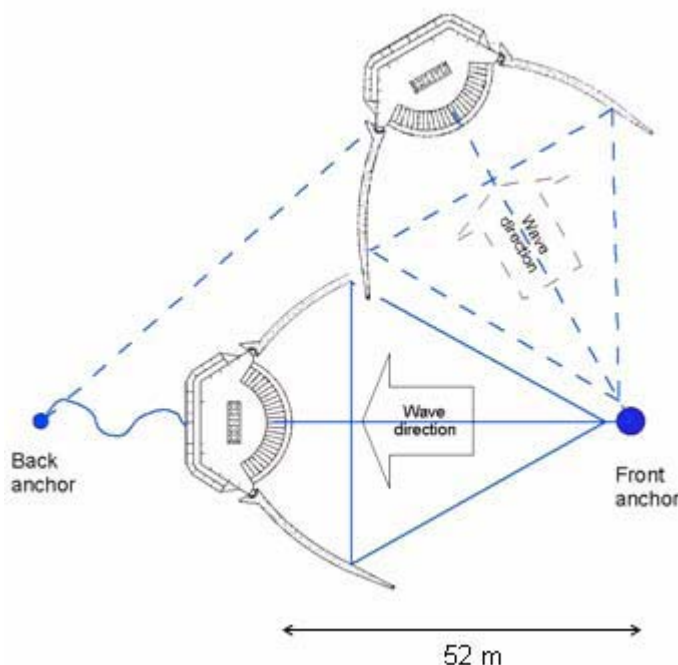


Figura 2.32 – Representação da configuração dos cabos de amarração [42].

2.3.3.5 Sobrevivência

Permite variar as condições de flutuabilidade para condições de tempestade de modo a garantir a estabilidade do dispositivo.

2.3.3.6 Resultados Numéricos e Experimentais

Em Abril de 2003 e após diversos estudos realizados do ponto de vista numérico e experimental [EMU 2000, Kofoed 2000], o Wave Dragon foi instalado no Norte da Dinamarca em Nissum Bredning, como sendo o primeiro dispositivo flutuante a nível mundial a se encontrar ligado à rede eléctrica de forma contínua [6]. Os testes realizados confirmaram que o desempenho previsto nos ensaios experimentais em tanque de ondas e nos modelos testados da turbina foram obtidos num protótipo à escala real.

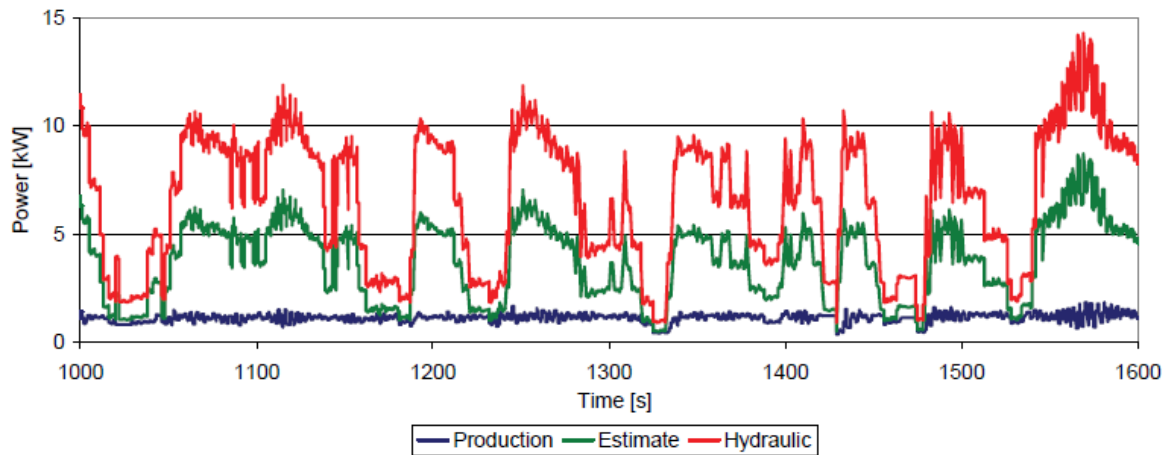


Figura 2.33 – Gráfico com a série temporal da potência estimada, potência hidráulica e produção real obtida durante o funcionamento do Wave Dragon [43].

2.3.4 WaveRoller

O dispositivo WaveRoller, desenvolvido pela AW-Energy's, é constituído por uma placa articulada, ancorada no fundo do mar em profundidades de água moderada (ou seja, até cerca de 20 m) e orientada perpendicularmente à direcção de propagação das ondas (Figura 2.34), oscilando como um pêndulo invertido devido ao movimento das partículas de água.

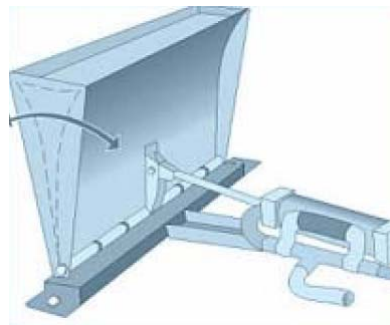


Figura 2.34 – Ilustração do dispositivo WaveRoller [44].

Como anteriormente referido, as partículas de água movimentam-se de forma circular. Quando se aproximam da costa a energia que transportam é comprimida pela redução da profundidade. Quando o valor da profundidade corresponde a metade do valor do comprimento de onda o movimento da partícula de água deixa de ser circular passando a descrever uma trajectória elíptica e por conseguinte adequada ao conceito do WaveRoller. Esta trajectória mantém-se até se atingir a linha para a qual o movimento das partículas passa a descrever uma trajectória praticamente horizontal (linha de rebentação).

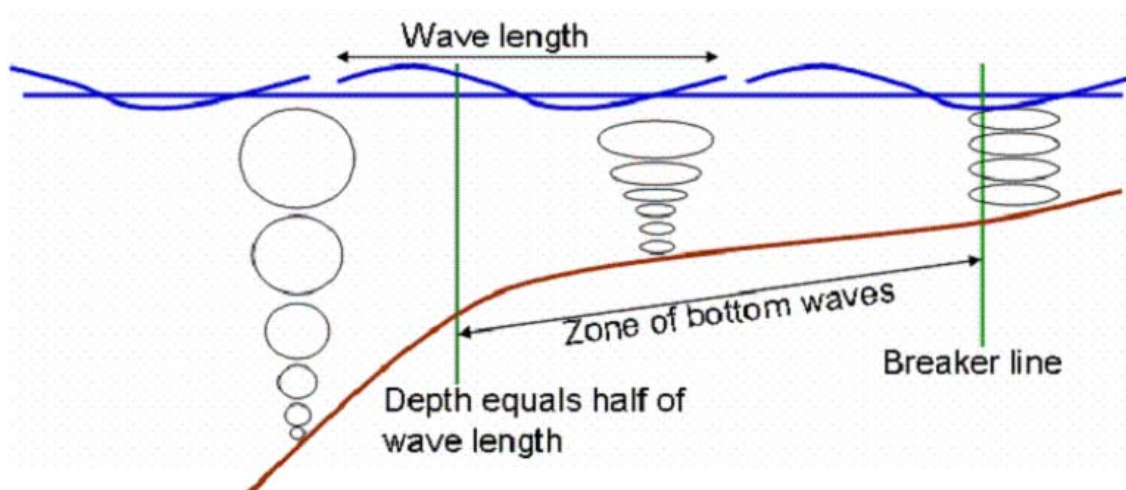


Figura 2.35 – Efeito da diminuição da profundidade nas características da onda [44].

2.3.4.1 Power Take-Off

A energia cinética gerada no movimento oscilatório descrito pela placa articulada é aproveitada para produzir energia eléctrica recorrendo a uma bomba de pistões acoplada a um gerador eléctrico, Figura 2.36.

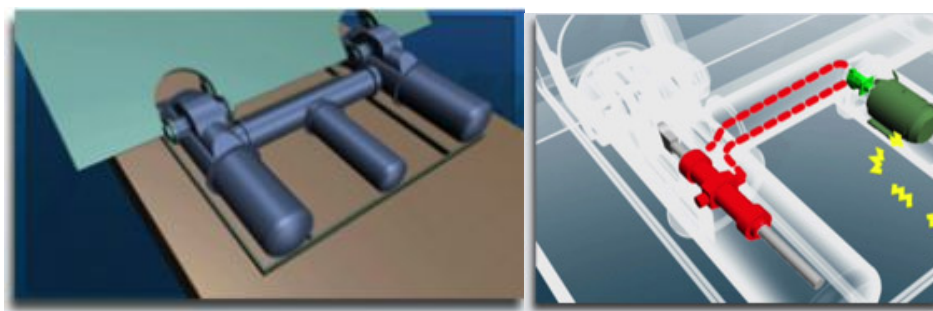


Figura 2.36 – Ilustração da transformação de energia cinética em energia eléctrica [44].

O WaveRoller é um conceito modular. Na prática, isso significa que a potência instalada na central é formado pela ligação de um número de módulos de produção. Cada módulo é composto por 3 a 5 placas articuladas, Figura 2.37, com sistema de geração acoplado. O sistema é escalável e não há limite superior tecnológico para a capacidade da central.

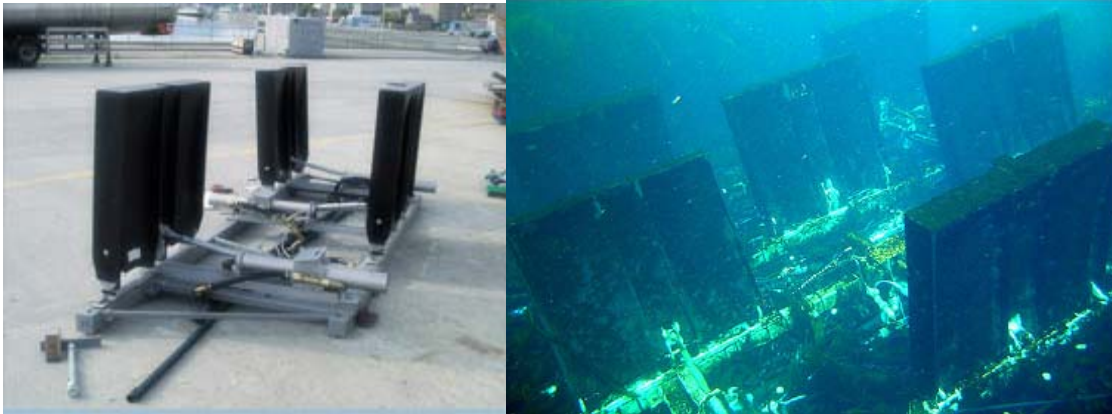


Figura 2.37 – Ilustração de um módulo com três placas e seu funcionamento [44] e [45].

2.3.4.2 Controlo

Para maximizar a captação de energia, por cada módulo, é necessário reduzir a profundidade da água, ou mais precisamente a distância da dobradiça ao centro de pressão da onda. Embora seja possível ajustar este tipo de dispositivo para a frequência da onda incidente, os benefícios não serão significativos, uma vez que o dispositivo é susceptível de se encontrar uma grande parte do tempo com o movimento restrito devido aos elevados ângulos de rotação ou, devido a elevadas perdas por efeitos viscosos ou, por ambos. Fundamentalmente este tipo de dispositivos, nesta parte do projecto têm uma potência relativamente pequena, provavelmente com potência inferior a 50 kW (WaveRoller é indicado para a potência nominal de 13 kW), devido ao limitado volume varrido durante o seu movimento [46].

2.3.4.3 Integração na rede Eléctrica

Desconhece-se o modo como é feita a interligação com a rede eléctrica.

2.3.4.4 Sistema de Amarração

O WaveRoller é instalado no fundo do mar, desconhecendo-se porém o modo como a estrutura de aço é fixa no fundo do mar.

2.3.4.5 Sobrevivência

Não se conhecem outras estratégias de sobrevivência para além de se instalarem em locais cujo efeito da profundidade não provoque esforços para além do seu limite de translação.

2.3.4.6 Resultados Numéricos e Experimentais

O efeito da profundidade no desempenho dos dispositivos Oscilantes de Translação das Ondas têm vindo a ser investigados analiticamente, numericamente e experimentalmente. Demonstra-se que embora a média anual de potência da onda incidente seja reduzida significativamente pela diminuição da profundidade, uma grande parte desta redução se deve a um inexplicável, mas, elevado valor de dissipação de energia das marés. Também se demonstra que a captura de energia está mais relacionada com a força da onda incidente do que com a potência da onda incidente. Resultados experimentais demonstraram que tanto a força de translação das ondas, como a potência absorvida pelas placas articuladas aumentam em águas pouco profundas [47].

Durante 1999 e 2004, o dispositivo WaveRoller foi alvo de modelações numéricas e testes laboratoriais a pequenas escalas, na Finlândia. Em 2005, foram realizados testes no mar pelo European Marine Energy Center (EMEC) em Orkney (Reino Unido) e no Equador com protótipos à escala de 1:3. Os ensaios destinaram-se a comprovar a força das ondas e a viabilidade tecnológica do dispositivo. Em Abril de 2008, foram instalados em Peniche, dispositivos mais evoluídos desta tecnologia, correspondendo à sua segunda geração.

2.3.5 AquaBuOY

O sistema AquaBuOY é um dispositivo flutuante de absorção pontual com simetria axial, cujo seu princípio de funcionamento consiste em dois componentes estruturais de aço. O corpo da bóia e o tubo, designado como tubo de aceleração. À medida que a bóia se movimenta verticalmente sobre a superfície das ondas, a água do mar movimenta-se do exterior para o interior do tubo de aceleração e vice-versa. O tubo de aceleração é um cilindro oco acoplado ao corpo da bóia, aberto em ambas as extremidades para permitir a entrada e saída livre da água do mar em qualquer direcção, cuja posição perpendicular em relação à propagação da onda é mantida por um sistema de amarração. Os movimentos alternados da massa de água no interior do tubo de aceleração accionam um pistão que se movimenta em oposição de fase relativamente ao movimento do corpo da bóia. A força de amortecimento originada pelo movimento do pistão é então convertida em energia útil por um sistema de extracção de energia (PTO) - "Hose-Pump" [48].

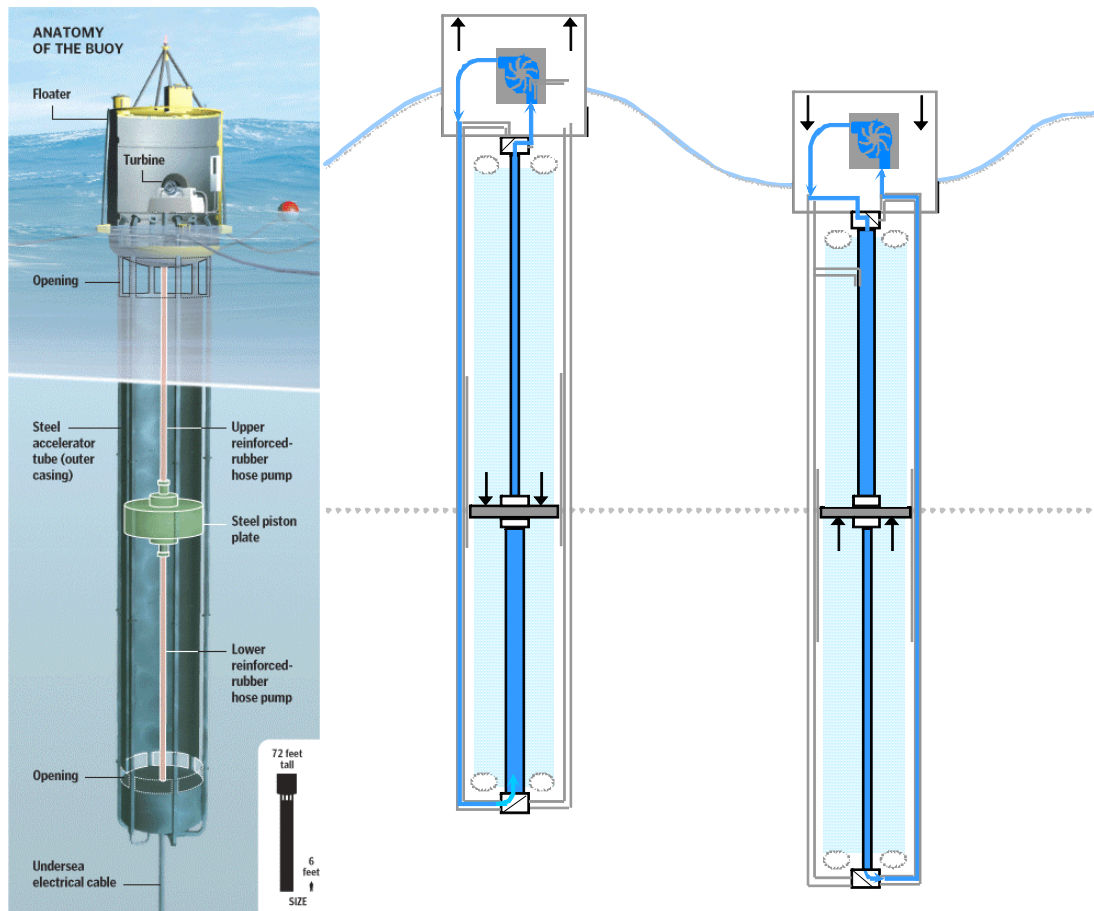


Figura 2.38 – Principais partes constituintes do AquaBuOY e seu princípio de funcionamento [49] e [50].

2.3.5.1 Power Take-Off

As “Hose-Pump” são produzidas a partir de mangueiras de borracha reforçado. A borracha da mangueira é composta por um material elástico de forma a garantir as propriedades de elasticidade, a menos que tenha sido reforçada. Quando reforçada com camadas de arame pode alterar substancialmente a força e a capacidade de manter o fluído sob pressão. Além disso, o reforço do ângulo formado na compressão tem uma grande influência sobre a forma como a mangueira irá responder à carga axial e pressão interna. Para que a mangueira possa tornar-se uma bomba-mangueira, o reforço do ângulo deve ser menor que 50° , permitindo que o volume interior da mangueira diminua à medida que a mangueira se estende. O reforço do ângulo faz com que seja possível prever a diminuição do volume interno, assim como a quantidade de água que se extrai.

Os resultados numéricos e experimentais indicam que a eficiência medida na bomba-mangueira, durante a conversão de energia mecânica em energia hidráulica (caudal e pressão), se situa-se entre os 70 e 80%. Mantendo-se este valor constante para potências de entrada, 25% acima da potência nominal [51].

O sistema de extracção de energia consiste em utilizar duas mangueiras de borracha que bombeiam água, “Hose-Pump”, alternadamente para um acumulador, de forma a suavizar a variação de potência gerada ao longo dos ciclos de onda. A água pressurizada no acumulador é então descarregada, para uma turbina hidráulica do tipo Pelton que se encontra acoplada a um gerador eléctrico. Este sistema, por sua vez, pode ser concebido como um circuito fechado, conforme se apresenta na Figura 2.39, cuja produção de electricidade é feita no próprio sistema ou em ciclo aberto, sendo a ligação à rede realizada em terra (Figura 2.39).

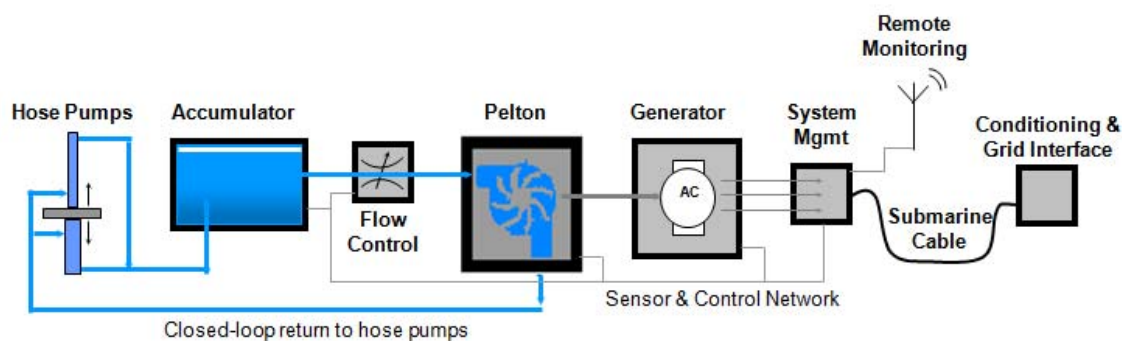


Figura 2.39 – Esquema de princípio do PTO da tecnologia AquaBuOY [52].

2.3.5.2 Controlo

Os sistemas AquaBuOY são projectados para maximizar a sua produção de energia para condições de onda moderada. O desempenho deste dispositivo é limitado às capacidades do PTO, que ajusta a resposta do dispositivo com a onda incidente, através de uma variação lenta da pressão no acumulador hidráulico.

2.3.5.3 Integração na rede Eléctrica

O AquaBuOY é sincronizado com a rede utilizando um conversor electrónico de potência AC-DC-AC. A interligação com a rede eléctrica é efectuada com um nível de tensão superior ao da tensão de produção, por intermédio de um transformador elevador de tensão. Recorre-se a um cabo flexível para ligar o dispositivo ao cabo submarino instalado no fundo do mar através de uma junção eléctrica.

2.3.5.4 Sistema de Amarração

O sistema de amarração apresenta uma configuração em forma de catenária “*slack-mooring*”, à semelhança da Figura 2.40.

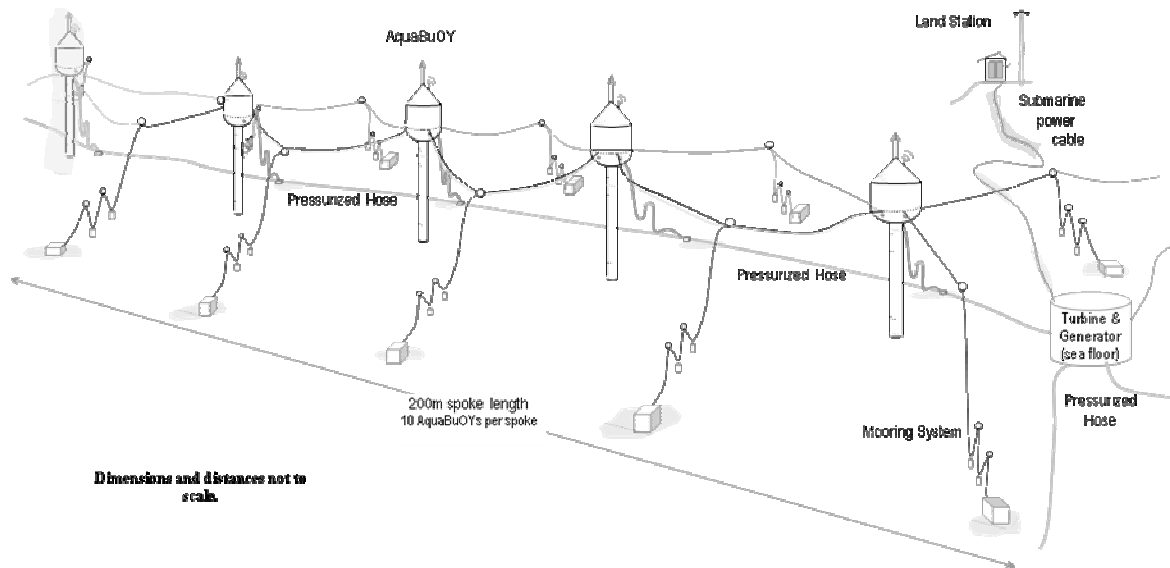


Figura 2.40 – Sistema de amarração e de ligação à rede da tecnologia AquaBuOY [52].

2.3.5.5 Sobrevivência

Em condições de tempestade e por conseguinte em situações de elevados deslocamentos do pistão, a estratégia de sobrevivência passa por permitir que o pistão exceda o seu curso de trabalho e se desloque para uma área onde a secção transversal interior do tubo de aceleração seja consideravelmente superior à do pistão. Desta forma proporciona-se a comunicação de água entre as duas câmaras do cilindro (“*bypass*”) [30].

2.3.5.6 Resultados Numéricos e Experimentais

Um antecessor do dispositivo AquaBuOY foi testado em tanque de ondas e a uma escala no oceano com diâmetro de 3,3 m. Muitos resultados destes testes não estão disponíveis.

2.3.6 AWS (Archimedes Wave Swing)

O Archimedes Wave Swing (AWS) é um sistema que converte a energia das ondas em energia eléctrica [53]. Originalmente desenvolvido pela Teamwork Technology BV (NL), actualmente os direitos são propriedade da AWS Ocean Energy Ltd (UK), o seu funcionamento consiste numa estrutura oca de aço submersa, composta por dois cilindros concêntricos cujo movimento relativo entre eles é criado por acção da onda incidente (Figura 2.41).

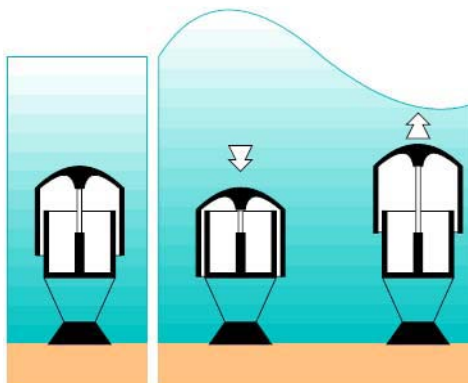


Figura 2.41 - Princípio de Funcionamento © AWS Ocean Ltd.

O cilindro inferior está fixo ao fundo do mar enquanto que o cilindro superior se movimenta verticalmente. No seu interior existe ar pressurizado a uma pressão tal que equilibra o peso exercido pela coluna de água exterior sobre a parte superior da estrutura em repouso. Quando a crista da onda se aproxima, a pressão hidrostática no topo da estrutura aumenta fazendo com que a parte superior da estrutura comprima o ar existente dentro do cilindro superior até que se registre uma igualdade entre pressões. O inverso acontece quando a cava da onda passa e o cilindro se expande. O movimento linear relativo entre os cilindros, é convertido em electricidade através de um sistema de extracção de energia (PTO – *Power Take-Off*).

2.3.6.1 Power Take-Off

A partir deste movimento linear é possível de forma directa produzir energia eléctrica recorrendo a um gerador eléctrico linear. O regime de funcionamento de um gerador linear quando aplicado num conversor de energia das ondas, caracteriza-se geralmente por forças de pico elevadas (dependendo da dimensão do dispositivo), velocidades baixas e deslocamentos irregulares criados pela acção da onda. Acresce-se o facto que os geradores lineares apresentam:

- A existência de força magnéticas elevadas de atracção entre o rotor e o estator. O que dificulta o projecto mecânico e o projecto dos rolamentos.
- O *espaço entre o estator e o rotor (entreferro)* é na maior parte das vezes relativamente grande. Sendo complicado realizar a construção mecânica de um gerador com um entreferro pequeno devido a tolerâncias de fabrico, limites de rigidez construtiva, forças de atracção entre estator e o rotor, expansão térmica, entre outras.
- Variação contínua de velocidade devido ao movimento irregular, o que exige que a ligação à rede tenha de ser sempre feita por intermédio de conversores electrónicos de potência [54].

De acordo com vários estudos realizados [55] e [56] , conclui-se que as máquinas eléctricas síncronas de ímanes permanente são o tipo de gerador mais adequado para a conversão da energia das ondas em energia eléctrica. Tendo sido este, o tipo de máquina seleccionado pela equipa do AWS. O gerador linear utilizado foi projectado e construído para este dispositivo. Na Figura 2.42 é possível ter uma percepção da configuração do gerador linear de ímanes permanentes. A parte desenhada ao centro representa o estator de ferro com as bobinas colocadas nas ranhuras do estator, a amarelo. As laterais representam o rotor da máquina (parte móvel) com os ímanes permanentes, a azul. As setas indicam a direcção da magnetização. O gerador é de dupla face para equilibrar as forças atractivas e por conseguinte as cargas aplicadas nos rolamentos [53].

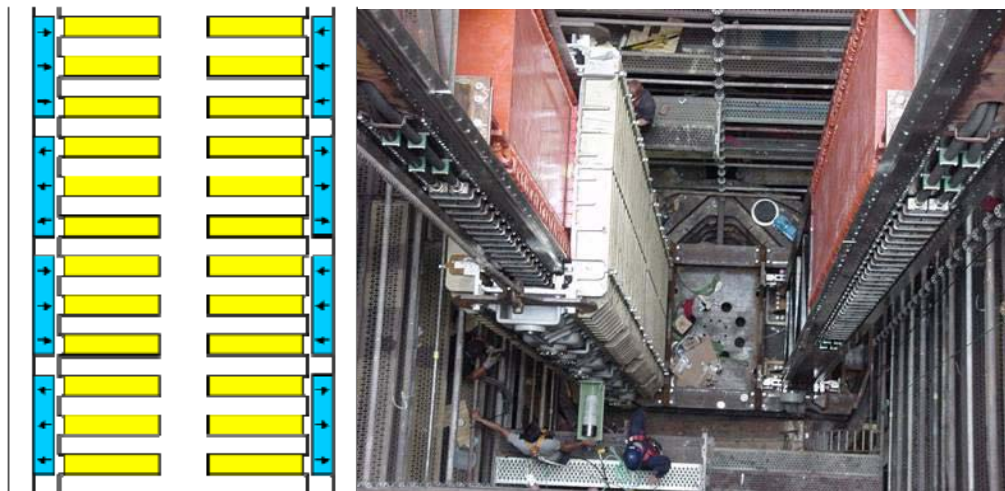


Figura 2.42 - Esboço de uma secção transversal e fotografia do gerador linear de ímanes permanentes utilizado no AWS [54].

2.3.6.2 Controlo

No comportamento dinâmico do AWS, dois movimentos são distintos e podem ser analisados e modelados separadamente:

- movimentos de baixa frequência, devido a mudanças na maré, ou de pressão atmosférica e / ou temperatura no interior do AWS - "Comportamento dinâmico lento";
- movimentos de alta frequência devido às ondas do mar - "Comportamentos dinâmicos rápidos".

Para estes dois movimentos diferentes, dois tipos diferentes de controlo são aplicado [57]. Para o primeiro, controlo do comportamento dinâmico lento é feito alterando o volume de ar e água dentro do tanque central do AWS, utilizando ar e reservatórios de água adicionais, para armazenar e assegurar o intercâmbio de ar com o tanque central. A variação destes parâmetros é assumida como quase estacionária. E o para o segundo, o controlo do comportamento dinâmico rápido é fornecido pelo gerador eléctrico linear para garantir que a amplitude do movimento do corpo que se encontra móvel é tão grande quanto possível para extrair o máximo de energia das ondas, dentro de certos limites operacionais pré-estabelecidos ($\pm 3,5$ metros). No entanto, para ondas de altura elevada, superiores a 5 metros, a força de amortecimento do gerador eléctrico linear não é suficiente e, portanto, uma força adicional é fornecida por dispositivos de amortecedores hidráulicos, designados por "*water dampers*".

De acordo com a amplitude da onda podem-se utilizar dois modos de controlo:

- Curso constante (ondas de maior amplitude) – A parte móvel oscila dentro dos limites pré-estabelecidos, sendo a força de amortecimento fornecida pelo gerador eléctrico linear e os amortecedores hidráulicos;
- Amortecimento constante (ondas de baixa amplitude) - A força de amortecimento é definida constante, igual ao coeficiente de amortecimento hidrodinâmico, a fim de extrair a máxima energia das ondas de pequena amplitude (Evans, 1976).

O AWS foi projectado para operar em torno das frequências de ressonância. Segundo a teoria da absorção pontual, "*point absorber*", a máxima energia que pode ser extraída das ondas é alcançada quando o dispositivo está em ressonância com as ondas incidentes [58]. Para manter o AWS ajustado com o período da onda é utilizado o modo de controlo do comportamento dinâmico "lento" [59].

2.3.6.3 Integração na rede Eléctrica

A ligação à rede do gerador linear é realizada por intermédio de conversores electrónicos de potência.

2.3.6.4 Sistema de Amarração

A estrutura de aço do primeiro protótipo foi instalada no fundo do oceano por recurso a um pontão. O pontão em si não é necessário para a conversão da energia das ondas, só foi edificado com a finalidade de tornar operacional o processo de submersão e de para ser mais fácil retirar o dispositivo durante a fase de teste . Em versões futuras do AWS o pontão não deverá ser utilizado.

2.3.6.5 Sobrevivência

Sendo um dispositivo submerso, o impacto em condições de tempestade é menos grave, devido ao facto do movimento das partículas de água decrescer com o aumento da profundidade. Para além disso, o AWS permite a alteração da frequência de oscilação através do preenchimento da sub-câmara de ar com água do mar, permitindo que o dispositivo deixe de estar em ressonância com as ondas incidentes.

2.3.6.6 Resultados Numéricos e Experimentais

Após o período de testes numéricos e experimentais (1995-2003), em Maio de 2004 foi instalado em Portugal, ao largo da Póvoa do Varzim, um protótipo de 2 MW, com 9,5 metros de diâmetro e 9 metros de curso. O gerador linear foi ligado a um cabo submarino com 6km de comprimento. Durante os testes, foram utilizadas cargas resistivas ou um inversor em fonte de corrente ligado à rede eléctrica. Dos testes realizados no dia 3 de Outubro de 2004, foram observadas aproximadamente às 14 horas e 30 minutos durante 15 minutos, as seguintes condições:

Estado do mar

- Altura significativa: $H_s=2.3$ metros ;
- Períodos de Onda: $T_p=11.7s$, $T_e \approx 10.5s$;

- Nível da maré: $\eta T = 1.43\text{m}$.

AWS

- Volume de água dentro AWS: $V = 1180\text{m}^3$;
- Pressão Ar media dentro AWS: $P_{\text{med}} = 32,3\text{m.c.a}$ (metros de coluna de água);
- Travões de água fechados.

Estação em Terra

- Resistência de entrada do conversor R AC = 2.75Ω .

Das medições registadas verifica-se em particular que a potência do gerador apresenta valores muito próximos dos que foram estimados pelo modelo numérico, Figura 2.43.

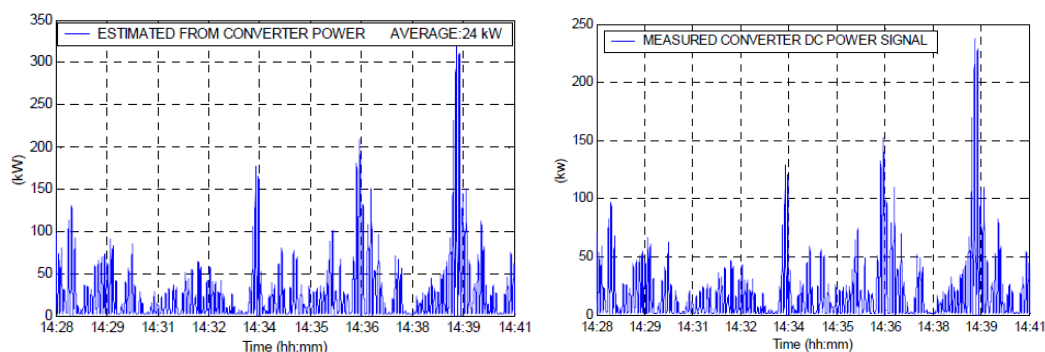


Figura 2.43 – Gráficos com a Potência estimada e potência real verificada [60].

Os modelos numéricos, não lineares, no domínio do tempo foram desenvolvidos. A teoria linear foi utilizada para descrever o comportamento hidrodinâmico do dispositivo, utilizando a usual decomposição da difracção e radiação. O gerador linear, o amortecimento hidráulico e a suspensão pneumática são descritos por meio de modelos integrados não lineares. Para tal, utilizaram o Matlab / Simulink pela facilidade de se implementar mudanças sempre que necessário [61]. A janela do simulador AWS TDM (“Arquimedes Wave Swing Time Domain Model”) contém os seguintes cinco blocos:

- Bloco da onda - Este bloco permite caracterizar e simular um estado de mar real;
- Bloco associado ao movimento lento - Este bloco calcula a média dos parâmetros que se caracterizam por um comportamento dinâmico lento (devido às mudanças na maré, pressão atmosférica e/ou temperatura), após um certo período de tempo. Estes parâmetros são introduzidos na simulação, substituindo os anteriores;
- Bloco do modelo dinâmico do AWS - Este bloco agrupa todas as forças que actuam no modelo numérico do AWS por intermédio de sub-blocos individuais. A equação global que descreve o movimento do AWS devido às ondas criadas por acção do vento também é implementada neste bloco;

- Bloco de controlo da rigidez da suspensão pneumática - Este bloco permite a afinação do movimento do corpo livre com o período da onda e da mudança da posição de equilíbrio, tendo em consideração as alterações nos parâmetros da câmara de água;
- Bloco de controlo da fluatuabilidade do movimento – Este bloco assegura que a amplitude do movimento do corpo livre do AWS é mantida tão grande quanto possível, mas dentro de seus limites operacionais pré-definidos. Também é responsável pela melhor distribuição da força de amortecimento necessário entre o gerador eléctricos linear e o amortecimento hidráulico [57].

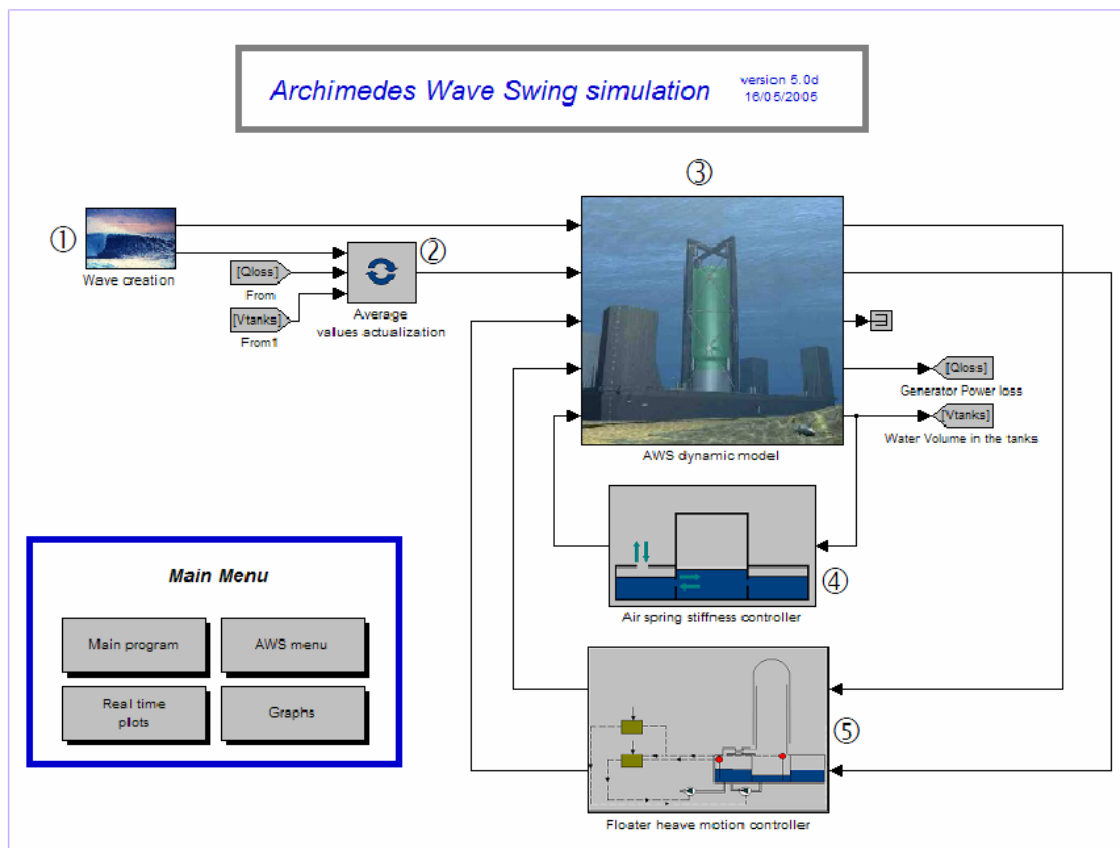


Figura 2.44 – Ilustração da aplicação principal de simulação do AWS – TDM [57].

Outros modelos têm sido estudados para este dispositivo. Com recurso a dados experimentais disponíveis, foi possível desenvolver modelos de redes neurais (NN) com precisão suficiente para controlar o AWS com modelos internos de controlo (IMC), tendo-se alcançado resultados significativos [62].

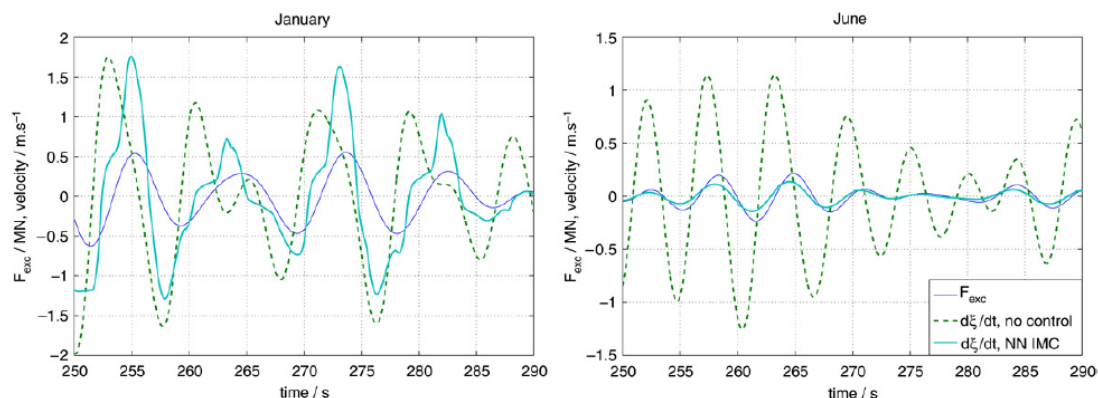


Figura 2.45 – Força de excitação da onda e velocidade vertical do flutuador [62].

A empresa concentra-se actualmente no desenvolvimento de um novo modelo (AWS II), cujo projecto é baseado nos resultados das experiências com o AWS original. O AWS II é uma bóia de forma cilíndrica submersa que não usará o sistema pontão (estrutura de aço instalada no fundo do mar que continha a parte fixa do AWS) do projecto original. O movimento relativo entre o flutuador e a parte inferior, ou silo, é convertido em electricidade através de um sistema hidráulico e um aparelho gerador motorizado [63]. Um elaborado estudo comparativo entre geradores lineares e sistemas hidráulicos para conversores de energia das ondas pode ser consultado em [64].



Figura 2.46 - Nova geração AWS.

2.4 Esquemas de Conversão

Dos sistemas apresentados e tendo por base a abordagem estabelecida na energia eólica [65], apresentam-se na Figura 2.47 os tipos de dispositivos anteriormente mencionados. Uma vez que não é contundente a descrição existente quanto ao esquema de princípio utilizado pelo WaveRoller, o mesmo não é apresentado.

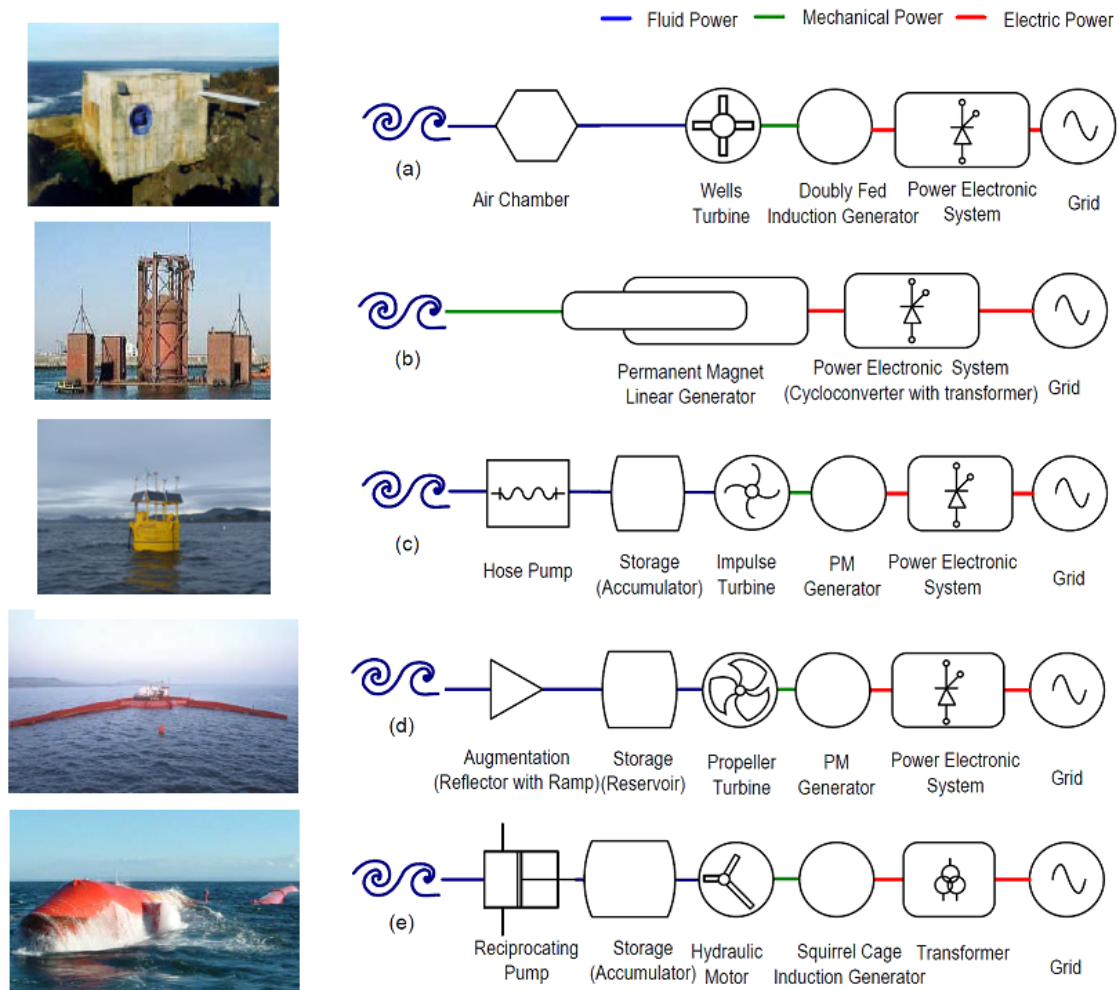


Figura 2.47 – Esquema do sistema de conversão: (a) Pico OWC, (b) AWS™, (c) AquaBuOY™, (d) WaveDragon™ e (e) Pelamis™ [66].

Muitos dos dispositivos de conversão de energia das ondas apresentados possuem sistemas de armazenamento de energia que suavizam a potência eléctrica produzida face à potência mecânica de entrada:

- Nos sistemas de coluna de água oscilantes a elevada inércia das turbinas e dos geradores eléctricos permitem a suavização da potência eléctrica em comparação com a potência de entrada das ondas. Actuam como um filtro passa baixo com uma constante de tempo de alguns segundos.;
- Os sistemas hidráulicos apresentam-se como um sistema amortecedor da variação da potência das ondas;
- Os reservatórios de água, como os utilizados na tecnologia WaveDragon caracterizam-se por uma forma de suavização de energia muito bem conhecida pela utilização de sistemas em centrais hidroeléctricas;
- No caso de tecnologias como o AWS, devido à inexistência de sistemas de armazenamento de energia eléctrica, é esperado que venha apresentar maiores problemas na qualidade da potência a entregar à rede. A energia mecânica que é fornecida pelas ondas ao sistema é directamente transformada em energia eléctrica por intermédio de geradores lineares.

Um único conversor de energia das ondas ligado a uma rede eléctrica forte, não é suficiente para influenciar a tensão e a frequência do sistema eléctrico. No entanto alguns problemas na rede de distribuição onde o sistema se encontra ligado podem ocorrer, tais como:

- Harmónicos;
- Efeito de flicker;
- Baixo Desempenho em falhas de rede.

Harmónicos:

A existência de harmónicos na rede eléctrica está geralmente associada à utilização de conversores electrónica de potência. Soluções como filtros, tecnologia muito bem conhecida e demonstrada em diversas aplicações, são empregues para solucionar a ocorrências destes efeitos.

Flicker:

Se não existir nenhum sistema de amortecimento a potência que é entregue à rede eléctrica varia com uma frequência aproximadamente de 0,2 Hz o dobro da frequência da onda. Tal situação irá provocar uma variação na tensão no ponto de interligação. Dependendo do tipo de rede a que se encontra ligado o conversor de energia das ondas, a variação de tensão no ponto de interligação será tanto maior quanto mais fraca for a rede. Deste modo, a existência de pontos de

interligação a redes fortes ou a utilização de sistemas de amortecimento da potência produzida pelos conversores podem ser a solução para o problema destes efeitos.

Falhas de Rede:

Na ocorrência de um curto-circuito na rede eléctrica a que se encontra ligado o conversor de energia das ondas, o valor da corrente eléctrica que está associado a esse defeito aumenta exponencialmente fazendo disparar as protecções do sistema eléctrico eliminando o defeito. No resto da rede eléctrica o defeito é visto como uma baixa de tensão. Os sistemas de conversão de energia das ondas com electrónica de potência na maioria dos casos não contribuem significativamente para o disparo das protecções, porque não entregam mais do que a corrente nominal. Na energia eólica alguns tipos de aerogeradores utilizam como procedimento desligarem-se da rede em caso da ocorrência de uma falha de rede, como por exemplo uma diminuição da tensão ou ocorrência de um curto-circuito. No entanto com o aumento de integração de uma elevada quantidade deste tipo de produção leva a que se estabeleça nova regulação para interligação à rede, requerendo que as unidades de produção de energia eléctrica permaneçam ligadas à rede durante falhas da rede, o que obriga a que utilizem sistemas com capacidade de (*ride through default*). O mesmo será necessário para os dispositivos de conversão de energia das ondas que utilizem conversores entre o gerador e a rede eléctrica.

2.5 Redes Eléctricas Offshore

Os chamados sistemas *offshore* são particularmente vocacionados para a extracção de energia em larga escala, através da sua instalação em parques (análogos aos parques eólicos), pelo que são aqueles onde a investigação recente tem focado a sua atenção [14]. Com o desenvolvimento crescente deste tipo de tecnologias, será necessário a criação de uma infra-estrutura eléctrica *offshore*, interligada a um ponto de recepção da rede eléctrica em terra. Infra-estrutura essa que se prevê composta por conjuntos de parques de ondas, “*clusters*”, dispostos de forma optimizada, formando uma vasta rede eléctrica *offshore*. Factores como a profundidade, o potencial energético do recurso, as condições geológicas do local, a distância do parque a terra, terão um papel importante no desenvolvimento de uma solução técnico-económica viável.

Estes dispositivos de conversão de energia das ondas, para além das restrições convencionais, tais como custos e minimização de perdas, estão sujeitos a um conjunto de exigências decorrentes das condições dos estados de mar particularmente adversas. Disponibilidade do parque, redundância dos sistemas, protecção contra defeitos (actividades humanas ou catástrofes naturais), acessibilidades para manutenção são fundamentais para este tipo de projectos. No relatório da IEA-OES [67] são feitas algumas considerações no que respeita:

Projecto de configuração do Parque:

- Garantia de continuidade de serviço ora por redundância dos cabos e aparelhagem de protecção, ora por sobredimensionamento dos cabos para permitir reconfiguração da rede eléctrica aquando do aparecimentos de defeitos na rede eléctrica;
- Instalação de transformadores e conversores electrónicos de potência submersos ou à superfície, etc.

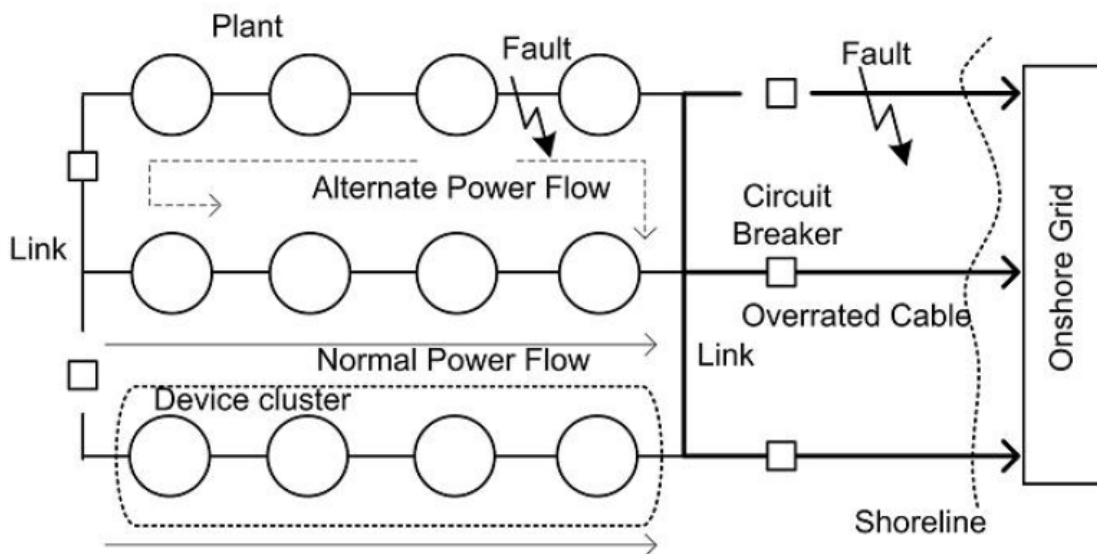


Figura 2.48 - Exemplo de um esquema de protecção contra falhas de concepção no *layout* do parque [67].

Seleção do Tipo de Cabo:

- Seleção do tipo de cabo (cabo de alta tensão ou de cabo de média tensão), e o número de cabos (únicos ou em paralelo de forma a garantir redundância);
- Considerações sobre o seu custo e capacidade;
- Necessidade de utilização de cabos flexíveis para os dispositivos flutuantes.

Conectores:

- As tarefas de manutenção de conversores de energia dos oceanos (por exemplo: bóias *offshore*) pode exigir conexão / desconexão do conversor. Conectores eléctricos devem facilitar essas tarefas para reduzir os custos de manutenção. O uso de conectores eléctricos poderia também dar alguma flexibilidade em termos de taxas de energia, níveis de tensão e acomodação de diferentes tipos de dispositivos no mesmo ponto de acoplamento.

Transmissão de energia em corrente contínua CC (“DC”) ou corrente alternada CA (“AC”):

- Consoante a distância a que os dispositivos de conversão de energia das ondas estejam instalados, a utilização do transporte em corrente contínua pode-se tornar competitiva ao nível do custo (Figura 2.49). Nesse caso, o custo e os aspectos técnicos das redes DC precisam ser minuciosamente analisados.

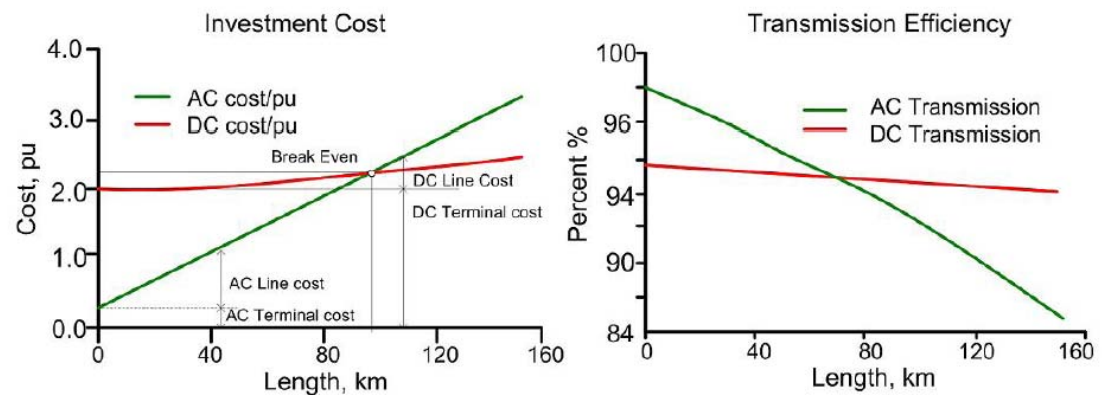


Figura 2.49 – Comparação entre custo e eficiência do cabo DC e AC [68].

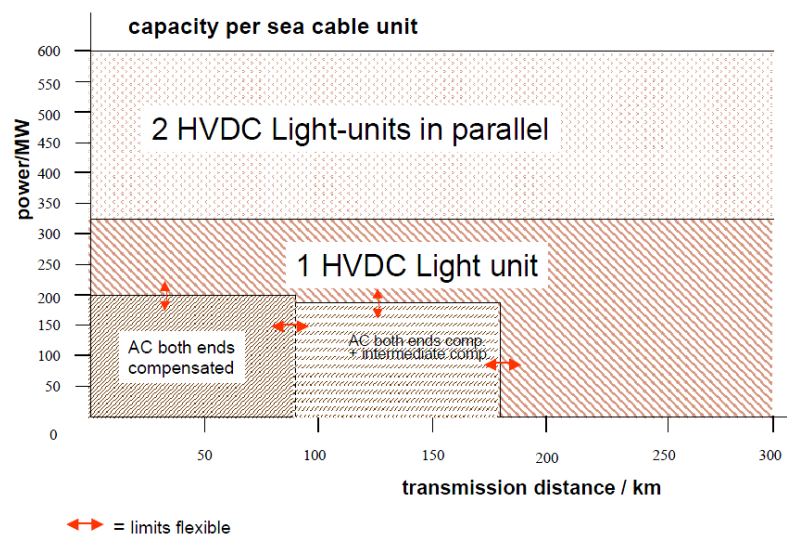


Figura 2.50 – Exemplos de aplicação para diferentes tipos de ligação à redes [68].

Em grandes projectos de eólica *offshore*, a transmissão em corrente contínua DC pode ser mais económica e tecnicamente adequada:

- Vantagens: menores perdas, maior flexibilidade no fornecimento de potência reactiva e consequentemente melhorias na estabilidade da tensão.

- Desvantagens: O preço dos conversores electrónicos de potência, uma vez que necessitam de ser colocados tanto no parque eólico como no ponto de recepção.

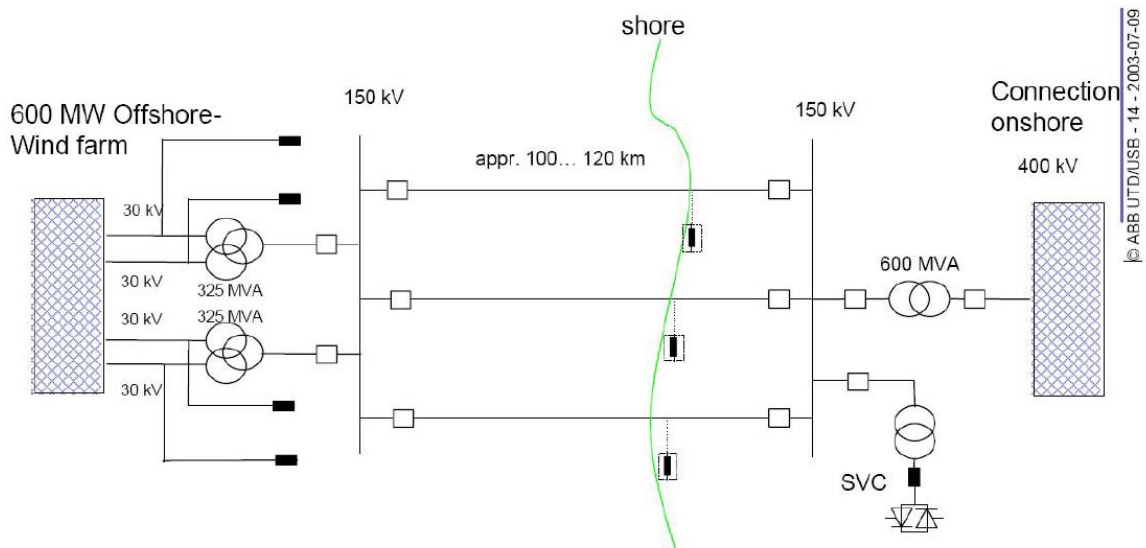


Figura 2.51 - Exemplo de sistema de recolha AC [67].

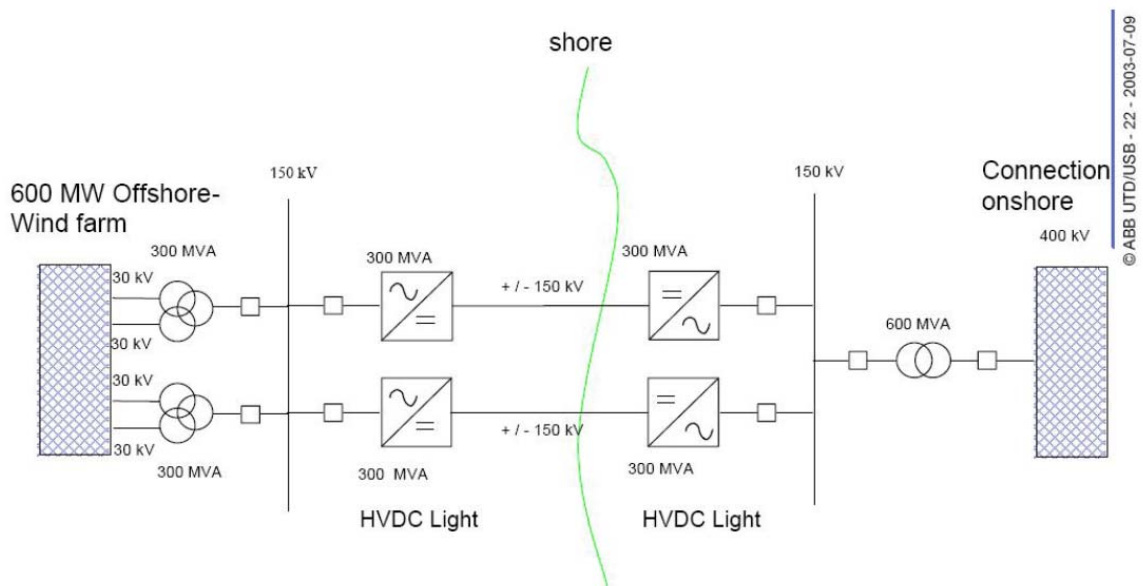


Figura 2.52 - Exemplo de sistema de recolha de DC [67].

2.6 Cabos Submarinos

A selecção do tipo de cabos submarinos a utilizar é um dos aspectos mais importantes na transmissão de energia eléctrica para terra. A sua especificação é um problema complexo, uma vez que envolve uma grande variedade de parâmetros. A título de exemplo, no local de instalação será necessário identificar qual a estabilidade do solo, probabilidade de actividade sísmica, existência de correntes oceânicas, entre outros. A precisão na quantificação destes parâmetros torna-se crucial do ponto de vista técnico e até mesmo económico, face ao tipo de instalação que será necessário realizar. Os cabos submarinos são caracterizados pela seguinte forma construtiva:

- **Alma Condutora:** caracteriza-se pela natureza do metal condutor, secção nominal e pela sua composição (alma condutora maciça ou multifilar). O cobre é o metal mais utilizado em média e alta tensão. Em alguns casos aplica-se o alumínio, no entanto em igualdade de resistência, o alumínio apresenta uma secção superior à do cobre. Quanto maior a secção, maior será o raio de curvatura necessário e mais trabalhosa se torna a instalação. Por outro lado, para as mesmas características eléctricas a massa do condutor de alumínio é sensivelmente metade da do cobre. O cobre apresenta-se assim como a opção mais indicada em virtude das suas características mecânicas (flexibilidade) e do seu diâmetro.
- **Écrans Condutores:** Dependendo do tipo de localização distingue-se as seguintes funções:
 - o **Écran sobre a alma condutora:** Permite criar uma superfície equipotencial à volta da alma condutora, procurando evitar a concentração de campos eléctricos nas irregularidades da superfície da alma condutora, aumentando deste modo o tempo de vida útil do isolante;
 - o **Écran sobre a camada isolante:** Geralmente ligado à terra para permitir criar uma superfície equipotencial à volta do isolante, prevenir contra os efeitos indutores dos campos electrostáticos externos e internos, assegurar o escoamento das correntes capacitivas bem como, a corrente de defeito à terra (curto-circuito homopolar) e por último, assegurar a protecção das pessoas e bens em caso de perfuração do cabo por um corpo condutor exterior, que fica sujeito ao potencial da terra.
- **Camada Isolante:** Caracterizada pelo tipo de material que garante o isolamento eléctrico. O isolante pode ser do tipo sintético, também designado por isolante seco e de papel impregnado a óleo sintético ou mineral, por processo estático ou sob pressão. Dos diferentes isolantes sintéticos existentes para cabos eléctricos, pode-se dividir em duas famílias:
 - o **Materiais Termoplásticos:**
 - PVC – Policloreto de vinilo;
 - PE – Polietileno.
 - o **Elastómeros e polímeros reticuláveis:**

- PEX – Polietileno reticulado;
 - TPR – Poliuretano.
- Revestimento: Têm como função garantir ao cabo uma forma determinada e assegurar a protecção contra acções exteriores. As partes deste revestimento, recebem o nome de bainhas e distinguem-se do seguinte modo:
- o Bainha de enchimento: O objectivo é preencher o espaço vazio entre condutores e estabelecer uma geometria determinada, geralmente cilíndrica;
 - o Bainha de estanquidade: Assegurar a protecção da camada isolante contra humidades ou agentes corrosivos, podendo ser metálica ou sintética.
 - o Revestimento exterior: Protecção mecânica e química do cabo constituída por uma bainha de material sintético.

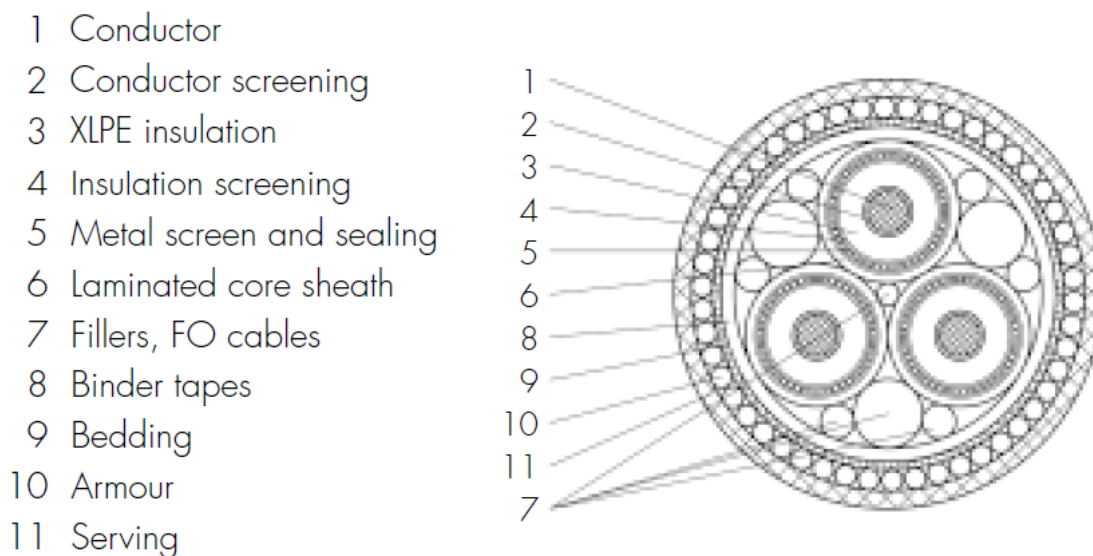


Figura 2.53 – Descrição das partes constituintes de um cabo [69].

Medium-voltage submarine cable, XLPE insulated

Typical design of a medium-voltage submarine cable with a maximum voltage up to 36 kV

Type: 2XS2YRAA

1. Conductor: copper, circular stranded compacted, longitudinal watertight by filling with a sealing compound (optional)
2. Conductor screening: extruded semi-conductive compound
3. Insulation: XLPE
4. Insulation screening: extruded semi-conductive compound
5. Screen: copper tapes
6. Separator: plastic foil
7. Sheath: PE
8. Fillers: polypropylene strings
9. Binder tapes

10. Bedding: polypropylene strings
11. Armour: galvanized round steel wires
12. Serving: hessian tapes, bituminous compound, polypropylene strings, lime wash

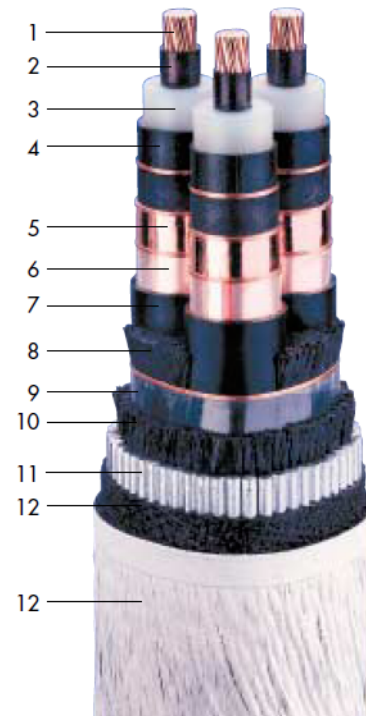


Figura 2.54 - Descrição de um cabo submarino de média tensão, 2XS2YRAA [69].

A camada isolante, até ao momento, dos cabos submarinos com maior aplicação é composta por isolantes a óleo impregnado [70]. Pelos inconvenientes da utilização do óleo, principalmente pelas características de instalação e exploração, têm vindo a ser substituídos por isolantes sintéticos. Os isolantes sintéticos, devido à utilização de diferentes materiais para perfazer o composto sintético são frequentemente designados por compostos. É precisamente dos isolantes sintéticos, mais precisamente da família dos elastómeros e polímeros reticuláveis, pelo seu comportamento elástico, associado a uma grande aptidão para a deformação, que surge o tipo de cabo mais promissor, na alternativa aos cabos de óleo impregnado. O cabo com isolante XLPE, designado na literatura anglo-saxónica "*cross-linked polyethylene cable*", por ausência de circulação de óleo, apresenta como vantagens:

- Menor número de ligações;
- Menos riscos para o meio ambiente;
- Temperaturas em regime de funcionamento nominal entre 90°C e 250°C para correntes de curto-circuito.

2.7 Parques de Produção Energia Eléctrica Offshore

Nos dias de hoje dá-se conta do aparecimento de diversas iniciativas, em particular pela Europa, na criação de infra-estruturas para testes de energia das ondas, Figura 2.55.

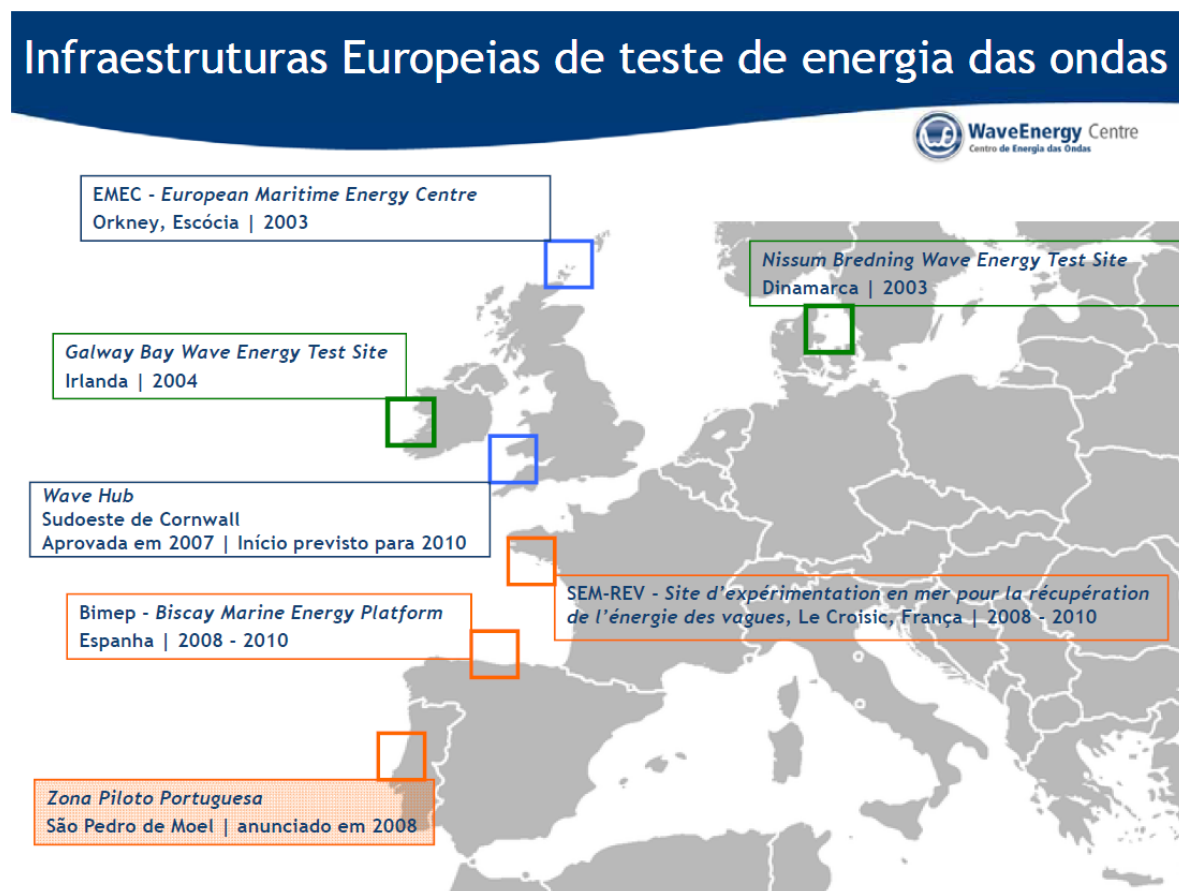


Figura 2.55 – Mapa da Europa com as zonas de testes de energia das ondas.

Algumas dessas infra-estruturas, como é o caso do EMEC, Nissun Bredning Wave Energy Test Site, Galway Bay Wave Energy Test Site, já se encontram em funcionamento há mais de 4 anos.

Sendo possível encontrar nos dois primeiros casos infra-estruturas com interligação à rede eléctrica por cabos submarinos⁵. Os níveis de tensão utilizados para interligação dos Parques de Ondas dependem de muitas variáveis, mas estão tipicamente compreendidos entre 12kV e 33kV [71].

⁵ O EMEC dispõe de cabos submarinos a 11kV com comprimentos entre 1 e 2km até profundidades de 50m.

A título de exemplo em Espanha-Bimep (Biscay Marine Energy Platform) prevê-se a instalação de um parque localizado ao largo da costa Basca numa área de 4x2km com 4 cabos submarinos a 13 kV como se apresenta na Figura 2.26.

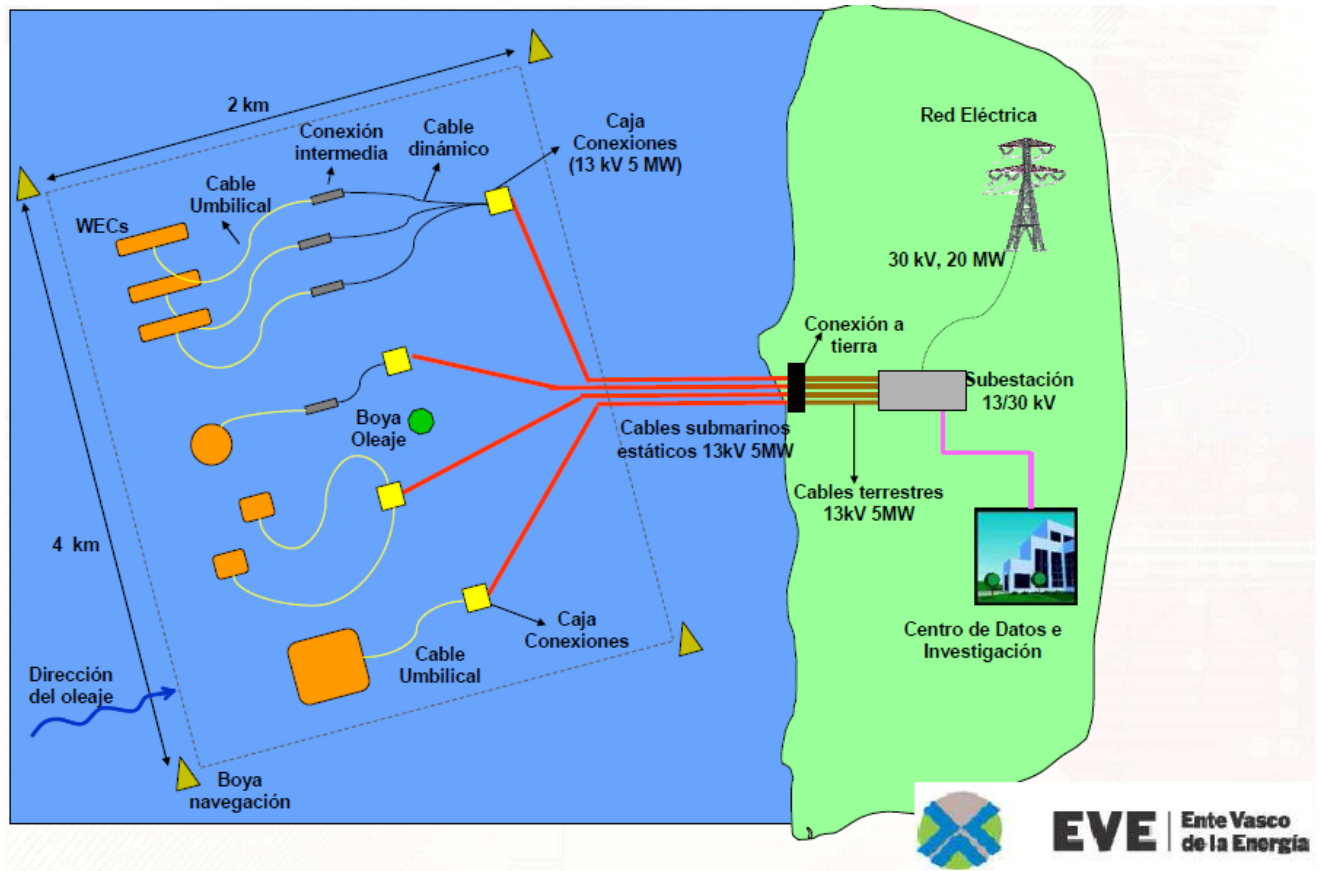


Figura 2.56 - Diagrama de instalação do parque para a conversão de energia das ondas em energia eléctrica em Espanha, Biscay Marine Energy Platform.

As Dimensões típicas de um parque de energia das ondas dependem essencialmente do tipo de tecnologia, podendo ser determinada como se segue e de acordo com [14].

Num clima de ondas com uma potência média anual de 30 kW por metro de frente de crista, os estados de mar com uma potência de 120 kW/m⁶ são suficientemente frequentes para poderem ser tomados como referência para efeitos do dimensionamento de centrais de energia das ondas [14].

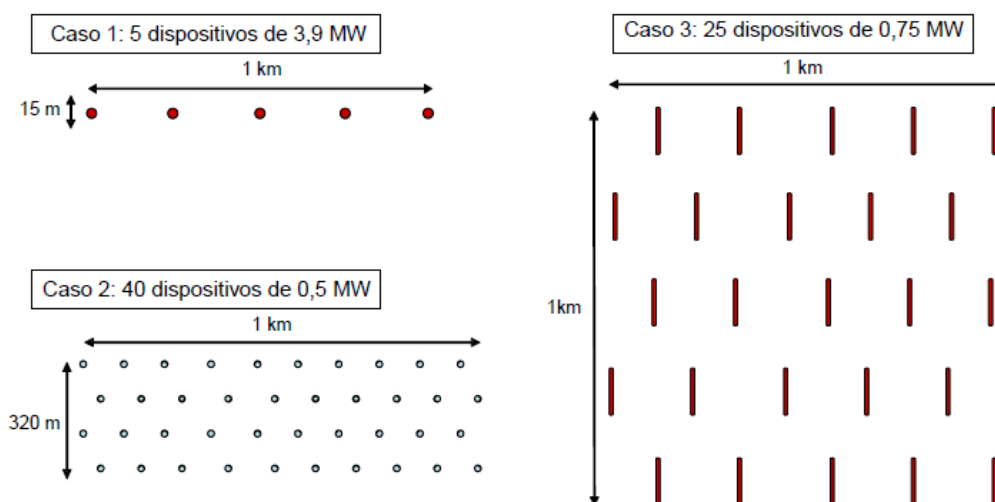
⁶ O fluxo de energia varia com o quadrado da altura da onda, pelo que este valor corresponde a uma onda com uma altura dupla da onda média, que na costa portuguesa vale cerca de 1,5 metros.

Considerando dispositivos pontuais⁷ de simetria axial sujeitos a oscilações verticais e ondas sinusoidais, a teoria linear das ondas de superfície indica que o limite máximo de extracção de energia das ondas é

$$\frac{W}{F_p} = \frac{\lambda}{\pi} \quad (2.24)$$

em que λ é o comprimento de onda e F_p a potência do clima de ondas de projecto (por metro de frente de crista). Para ondas de 12 segundos de período, o comprimento de onda é $\lambda=206$ m em águas de 50 m de profundidade, onde se espera que os dispositivos offshore venham a ser instalados. Daí resulta que a potência de projecto disponível para as características indicadas seja de $W=7,8$ MW.

O factor de carga⁸ de um dispositivo de conversão de energia das ondas estima-se que seja da ordem dos 25% o que leva a considerar que a potência disponível por máquina se situe nos 2 MW. Desprezando o factor de carga e considerando ainda que a maioria dos dispositivos apresentados, têm valores de potência instalada inferiores a 2MW, excepção feita ao WaveDragon, dita que o afastamento entre máquinas poderá ser inferior, ao que se teria considerando o limite máximo de extracção de energia das ondas ($\lambda < 200$ m). Com um afastamento de 200 metros, poderão ser instaladas cinco destas centrais por quilómetro e eventualmente em várias linhas paralelas à direcção típica da crista das ondas, à semelhança do Estudo Comparativo entre Tecnologias de Aproveitamento de Energia Eólica e Energia das Ondas [72], Figura 2.57.



⁷ Dispositivos de dimensão muito inferior ao comprimento de onda. Na prática estima-se que estes dispositivos sejam circulares e tenham um diâmetro de cerca de 15 metros.

⁸ Relação entre a potência média anual e a potência nominal de cada dispositivo.

Figura 2.57 – Comparação de possíveis dimensões de parque de energia das ondas com cerca de 20MW potência instalada (vista de topo).

Do estudo apresentado concluiu-se, que considerando um parque com 100MW, este poderá ter uma largura entre 15 m e 1 km, dependendo da tecnologia utilizada (dimensões dos dispositivos e limites do sistema de amarração) e o seu comprimento 5km. Tomando como base que o parque fica interdito à navegação e que não seria desejável que uma embarcação pesqueira perdesse mais do que 15 minutos a contornar o parque. Para além destas características é possível definir outras variáveis que condicionam o projecto de um parque, como por exemplo as ligações eléctricas. Um outro exemplo, para *clusters*, é apresentado pelo estudo desenvolvido pela EPRI [21] que analisa a configuração de um parque de energia das ondas composto por 4 *clusters*, cada um deles contendo 45 máquinas da tecnologia Pelamis, perfazendo 180 máquinas conectadas por cabos submarinos, Figura 2.58. Cada *cluster* é composto por três ramais de 15 máquinas cada. Os quatro *clusters* são conectados a terra através de cabos submarinos, cuja interligação eléctrica é conseguida através de caixas de junção em plena água. A existência destes quatro cabos submarinos independentes permite um certo grau de liberdade para alterar a disposição de cada *clusters*. Cada *cluster* tem 2,25km de comprimento e 1,8km de largura, o que implica uma área para o parque de cerca de 16 km². Para esta configuração foram determinadas as seguintes características:

- Distância entre máquinas: 150m;
- Número de ramais: 3;
- Tamanho total do cabo submarino: 13 km;
- Nível de tensão da linha: 26kV;
- Características do cabo submarino: 26kV / 40MVA / trifásico com fibra óptica no núcleo.

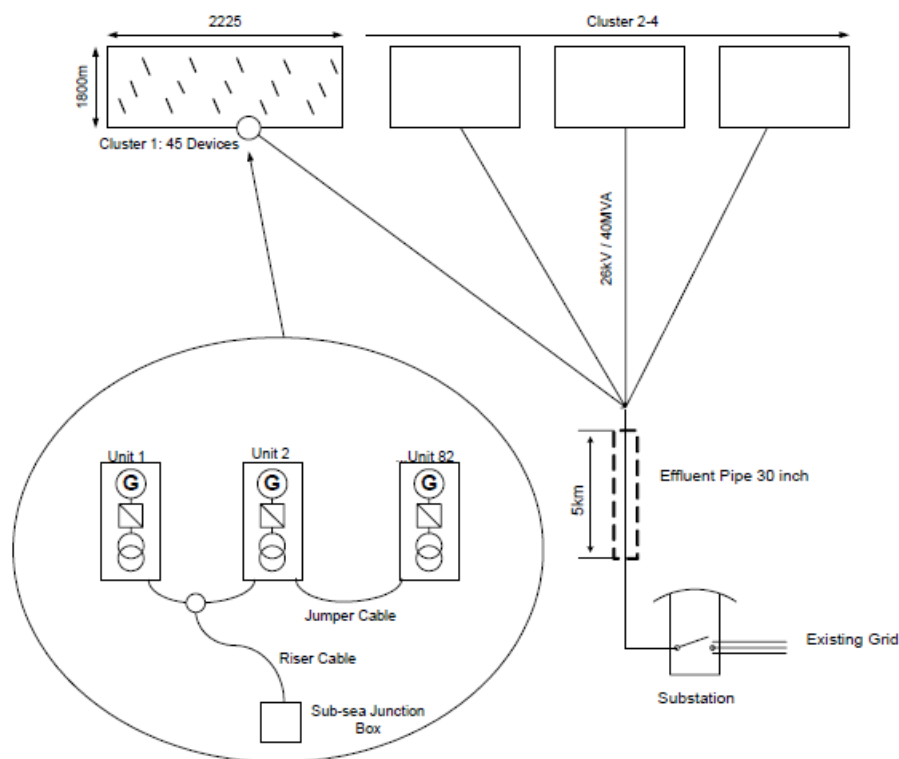


Figura 2.58 - Configuração geral do sistema e ligações eléctricas [21].

2.7.1.1 Portugal – Zona Piloto

Portugal tem-se afirmado como um dos países mais interessados no aproveitamento da energia das ondas para a produção de electricidade. Neste contexto e atendendo às boas características do recurso existentes no país, já mencionadas anteriormente, definiu-se como uma prioridade a existência de uma zona piloto, por forma a:

- Fomentar a instalação em Portugal de uma fonte renovável ainda em fase inicial de desenvolvimento, agilizando os procedimentos de licenciamento;
- Fomentar o desenvolvimento tecnológico e a instalação de equipamentos de aproveitamento de energia das ondas nos regimes de demonstração de conceito, pré-comercial e comercial;
- Atrair para o País empresas promotoras de tecnologia;
- Criar um *cluster* industrial nacional.

Os procedimentos mais relevantes com o intuito de alcançar o objectivo traçado, a criação de uma zona piloto, foram os seguintes:

- 2004 | Estudo pela DGEG - O estudo teve por objectivo reflectir sobre o potencial impacte que a energia das ondas poderia ter para Portugal. Identificação na costa oeste portuguesa

das regiões mais favoráveis para o desenvolvimento da energia das ondas Primeiro esboço de demarcação das zonas restritas e possíveis áreas de concessão para os parques de energia das ondas em profundidades da ordem dos 50 a 80 m;

- 2007 | Decreto de Lei n.º 57/2007 – Autorização do Governo para a provar o regime jurídico de acesso e exercício das actividades de produção de energia eléctrica a partir da energia das ondas;
- 2007 | «Grupo de Trabalho para a energia das ondas do mar» - Este grupo de trabalho teve como principal missão o desenvolvimento da proposta para a criação da zona piloto;
- 2008 | Estabelecimento do regime jurídico de utilização da zona piloto em Decreto de Lei – O Decreto de Lei n.º 5/2008 de 8 de Janeiro estabelece o regime jurídico de utilização dos bens do domínio público marítimo para a produção de energia eléctrica a partir da energia das ondas do mar na Zona Piloto. As características desta zona são as seguintes:
 - o Localização São Pedro de Moel;
 - o Área: 320 km²;
 - o Profundidade: entre 30 e 90 m;
 - o Distância à costa: 5 a 8 km;
 - o Potência:
 - 80 MW – Infra-estruturas garantidas pela EDP-Distribuição;
 - 250 MW – Infra-estruturas garantidas pela REN – Rede de Energéticas Nacionais.
- 2008 | Decreto de Lei n.º 238/2008 – aprovação das bases de concessão para a exploração da zona piloto e para a produção de energia eléctrica a partir da energia das ondas, atribuindo a respectiva concessão a uma sociedade a constituir pela REN.

A Zona Piloto a criar ao largo do Município da Marinha Grande (lugar de S. Pedro de Moel), Figura 2.59 e Figura 2.60, inclui-se dentro do mar territorial, sob jurisdição portuguesa, de profundidade superior a 30 metros. Será objecto de Concessão e a sua administração ficará a cargo de uma Entidade Gestora responsável pelo licenciamento de todos os projectos da zona piloto. Para além da área reservada aos conversores de energia das ondas, designados na terminologia anglo-saxónica por Wave Energy Converters (WEC), a Zona Piloto inclui também, um corredor destinado à passagem dos cabos eléctricos de ligação com a subestação em terra. Para receber a electricidade produzida na Zona Piloto, tanto a concessionária da rede pública de distribuição (EDP Distribuição) como a concessionária da rede pública de transporte (REN), terão de construir as infra-estruturas necessárias à recepção de um total de potência entre 80MW e 250MW. Os projectos que poderão usufruir da zona piloto enquadram-se em três categorias:

- Projectos de Demonstração – Para a demonstração da capacidade de um novo conceito de tecnologia gerar electricidade de modo economicamente viável (Protótipos)

- Projectos Pré-Comerciais – Destinado a tecnologias com capacidade técnica provada, apesar de o seu desenvolvimento ainda não permitir a sua auto-suficiência económica (Garantia de Boa Execução e Garantia de Bom Desempenho).
- Projectos Comerciais – Para as tecnologias que já atingiram maturidade suficiente para permitir a geração de energia para fins comerciais (Projectos Financiáveis)

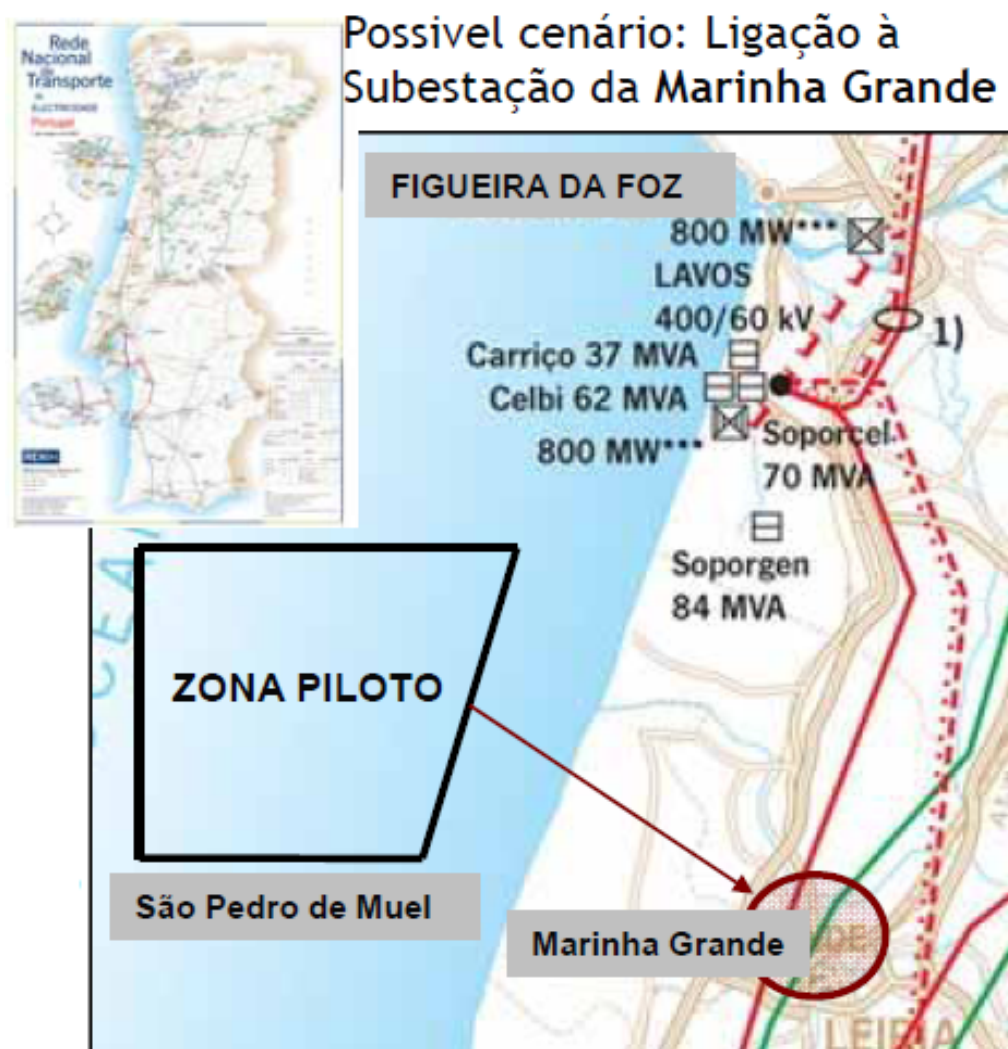


Figura 2.59 – Possível cenário de ligação da Zona Piloto à subestação da Marinha Grande.

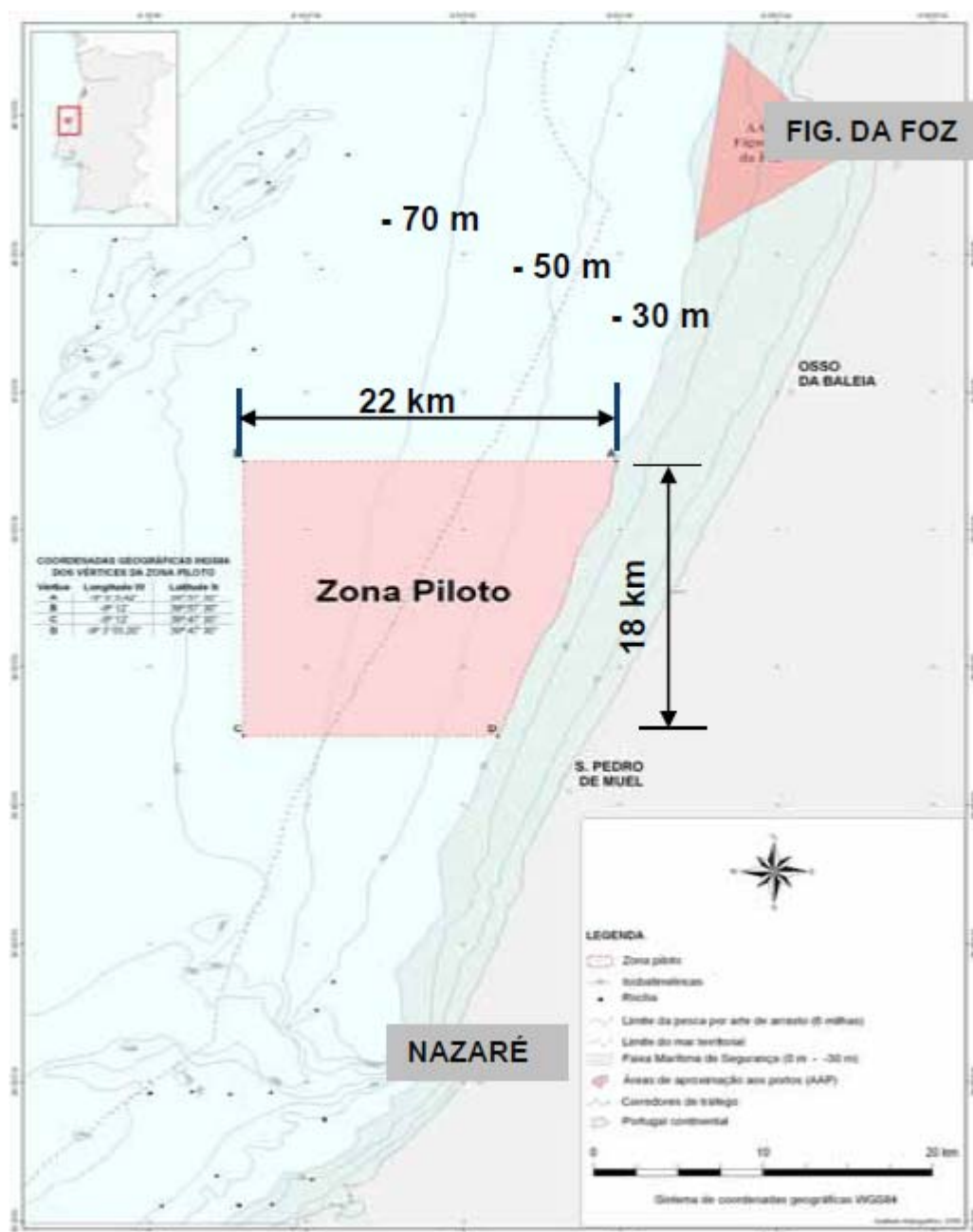


Figura 2.60 - Zona Piloto (Área Geográfica).

Capítulo 3 - Modelos Matemáticos

3.1 Introdução

Neste capítulo pretende-se descrever em detalhe os modelos matemáticos que permitem em ambiente Matlab Simulink simular em regime dinâmico a resposta de funcionamento dos flutuadores com corpos de simetria axial com um grau de liberdade (Oscilação Vertical) ligados à rede eléctrica sobre diferentes topologias (série e paralelo).

3.2 Conversor de Energia das Ondas

Os dispositivos de conversão de energia das ondas em energia eléctrica, como anteriormente visto, podem ser classificados de acordo com diferentes critérios, desde a sua localização, o estado de desenvolvimento do dispositivo e princípio de operação. Dependendo porém do tipo de funcionamento e forma, o movimento (Graus de liberdade) do corpo rígido dos dispositivos é geralmente descrito no plano de coordenadas (x,y,z) por movimentos de translação (Arfagem, Avanço e Deriva) e rotação (Guinada, Cabeceio e Balanço), como se descreve na Figura 3.1.

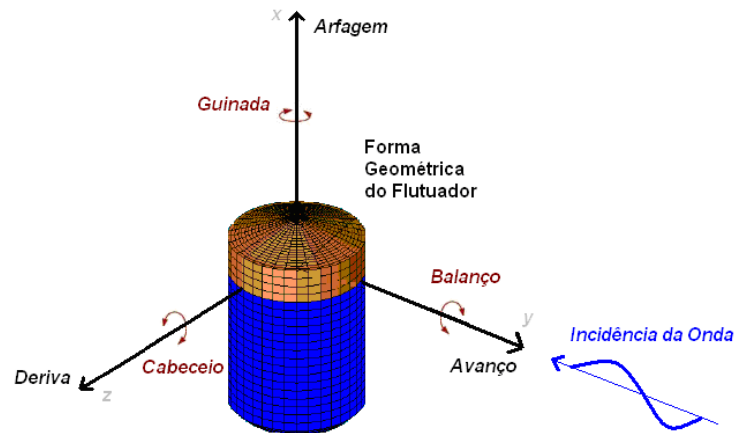


Figura 3.1 - Movimentos de translação e rotação de um dispositivo⁹.

Nesta dissertação optou-se por fazer o estudo de um corpo flutuante, com um grau de liberdade (arfagem - oscilação vertical representado no plano de coordenadas (x,y,z) , com coordenadas $(x(t),0,0)$ e de geometria simétrica em relação ao seu eixo vertical, destinado a funcionar em águas profundas, recorrendo a um sistema de extracção de energia hidráulico-eléctrico, designado na literatura anglo-saxónica por PTO (Power Take-Off), ilustrado na Figura 3.2.

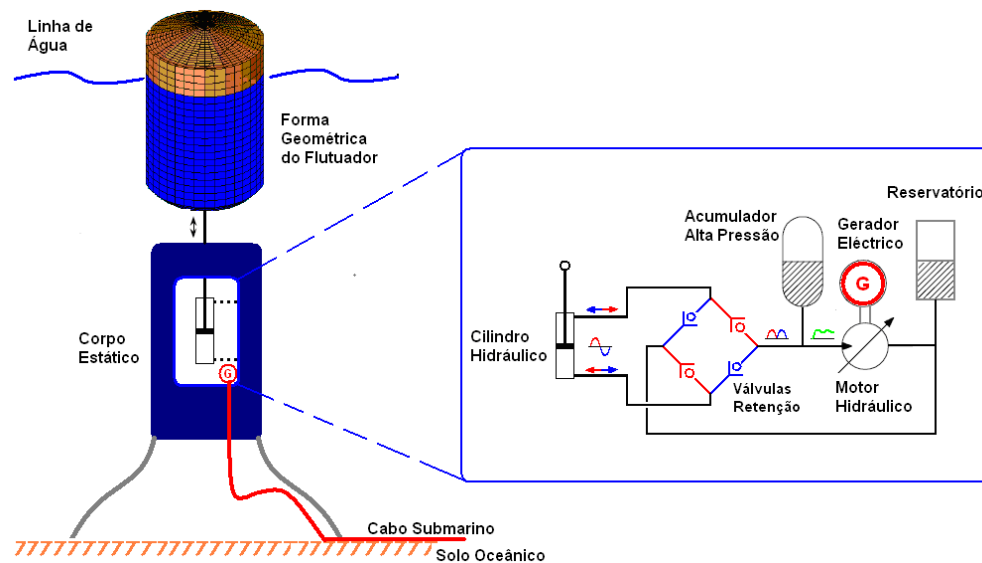


Figura 3.2 - Sistema de extracção de energia hidráulico-eléctrico, PTO.

⁹ A forma geométrica, apresentada pelo flutuador faz parte integrante do artigo da referência [72].

Para se ter uma percepção da forma como interagem, o conjunto de sistemas, que constituem o dispositivo de conversão de energia das ondas, em mar real, foi necessário recorrer à modelação matemática no domínio do tempo da dinâmica dos sistemas. A modelação no domínio do tempo é frequentemente utilizada por motivos de não linearidade da resposta do PTO [74], ao contrário do que sucede na modelação em frequência, em que a resposta dos sistemas apresenta um comportamento linear.

A análise dinâmica dos sistemas requer a utilização de equações diferenciais, resultante da aplicação das leis da física, em particular das leis de Newton para sistemas mecânicos. Sendo para tal necessário a utilização de ferramentas computacionais adequadas. A ferramenta computacional utilizada para simular o trabalho descrito na presente dissertação foi o Matlab e Matlab Simulink da Mathworks. Esta última ferramenta tem como vantagens a identificação imediata das respectivas entradas e saídas dos blocos dos modelos que compõem o sistema global e uma versatilidade de reconfiguração dos sistemas, ao nível da forma e da sua própria parametrização.

Os diferentes modelos são apresentados nesta dissertação de acordo com a seguinte ordem:

- Ondas de Superfície do Mar;
- Movimento Oscilatório do Corpo do Flutuador;
- Sistema Hidráulico;
- Máquina Assíncrona;
- Rede Eléctrica.

De uma forma simples pode-se explicar a ligação destes modelos físicos, recorrendo ao esquema da figura 3.3.

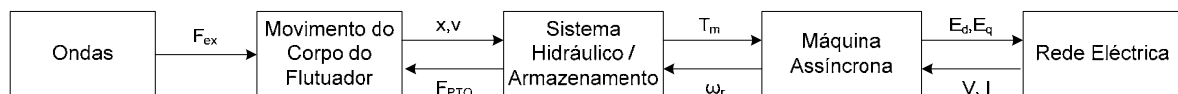


Figura 3.3 – Diagrama de blocos do modelo matemático estudado.

3.2.1 Ondas de Superfície do Mar

A medição física da elevação da superfície da onda (tipicamente em função da frequência de aquisição) é geralmente obtida por sistemas de aquisição de dados instalados no mar, bóias ondógrafos, fixa num determinado espaço de coordenadas (ponto geográfico). De um modo geral o sinal contínuo adquirido por esses sistemas no domínio do tempo, correspondente à elevação da

superfície da onda que pode ser representado por um espectro contínuo de frequências, cada uma das quais caracterizada pela densidade da amplitude medida $\alpha(\omega)$ e função da fase $\gamma(\omega)$ [6].

$$\eta(t) = \int_0^{\infty} a(\omega) \cdot \cos(\omega t - \gamma(\omega)) d\omega \quad (3.1)$$

Dado que o dispositivo considerado é de simetria axial não se considera a densidade espectral de energia $S(f, \theta)$ bidimensional, contida nas ondas de superfície em função da sua frequência (f) e direcção (θ). Considerando-se por conseguinte que os estado de mar são caracterizados por dois parâmetros H_s e T_e e, representados por ondas unidireccionais com densidade espectral de energia $S(\omega)$ em função da frequência angular, ($\omega=2\pi f$), definida por,

$$S(\omega) = 131.5 \cdot H_s^2 \cdot T_e^{-4} \cdot \omega^{-5} \cdot e^{\left(-1054 \cdot T_e^{-4} \cdot \omega^{-4}\right)} \quad (3.2)$$

conforme [75].

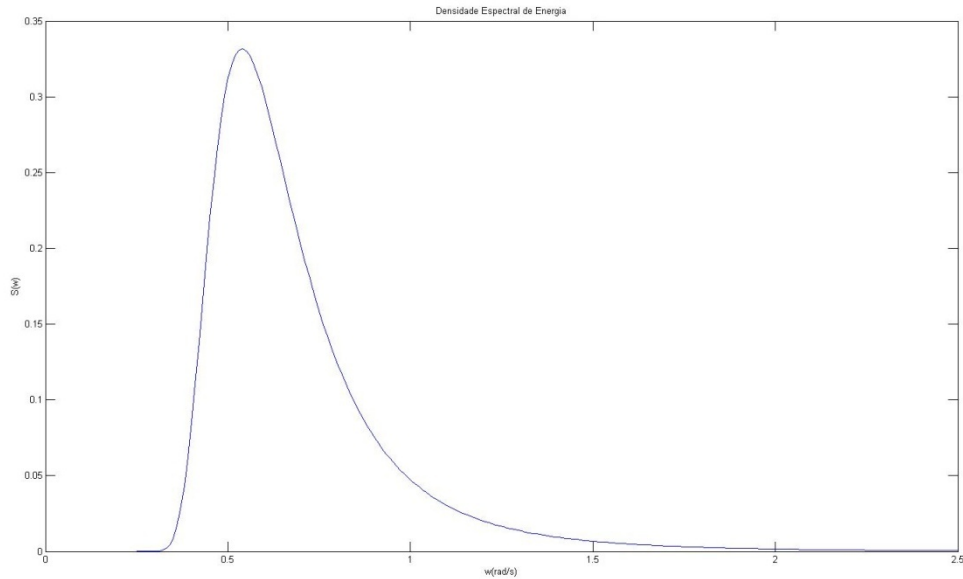


Figura 3.4 - Densidade espectral de energia para um estado de mar $H_s=T_e=1$.

Em qualquer instante, $\eta(t)$ representa o integral debaixo da curva do espectro de energia no domínio da frequência e por conseguinte pode ser representado aproximadamente como a soma

de um número finito de 225 frequências angulares separadas por um intervalo de $\Delta \omega$ de 0,01 rad/s.

$$\eta(t) = \sum_{w=0,25}^{225} (a_m \cdot \cos(wt + \gamma)) \quad (3.3)$$

Como a amplitude é dada pelo produto do valor médio quadrático da altura da onda (H_{rms}) pela raiz quadrada de 2 e por aproximação a altura significativa, H_s , representa quatro vezes o valor médio quadrático. Ao se considerar que H_s é proporcional à raiz quadrada da área do espectro e que por sua vez este é uma função par, a amplitude obtida de forma discreta a_m é o resultado da relação entre (3.4), (3.5), (3.6) e (3.7) de acordo com a secção 2.2.3 [10].

$$H_s = 4.H_{RMS} \quad (3.4)$$

$$H_{RMS} = \frac{a_m}{\sqrt{2}} \quad (3.5)$$

$$H_s = 4.\sqrt{2.m_0} \quad (3.6)$$

$$m_0 = \int_0^{+\infty} S(w).\partial w \quad (3.7)$$

Do qual resulta,

$$a_m = \sqrt{4.S(w).\Delta w} \quad (3.8)$$

Estabelece-se deste modo que a variação da superfície da onda (η) para cada estado de mar H_s , T_e em cada instante de tempo t é obtida através do somatório de um número finito de ondas harmónicas sinusoidais, cada uma das quais caracterizada pela amplitude relacionada por (3.8) com a densidade espectral de cada frequência e fase (γ) gerada aleatoriamente. Relacionando as equações (3.2), (3.3) e (3.8) obtêm-se a elevação da superfície da onda apresentada na figura 3.5.

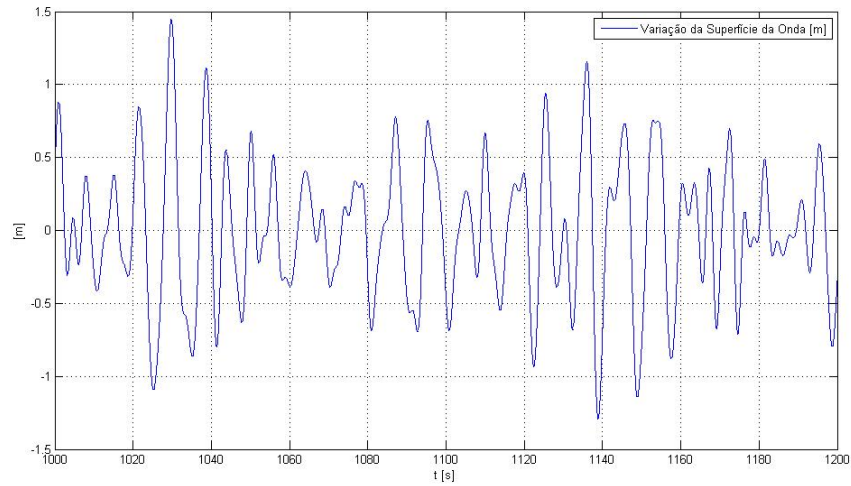


Figura 3.5 – Variação da superfície da onda do mar.

3.2.2 Movimento Oscilatório do corpo do flutuador

Para descrever os principais factores que estão associados ao movimento oscilatório do corpo em estudo é necessário recorrer à lei fundamental da dinâmica (segunda lei de Newton),

$$\sum(F_r(t)) = m \cdot \ddot{x}(t) \quad (3.9)$$

a resultante das forças ($F_r(t)$) que actuam num corpo é igual ao produto da massa do corpo (m) pela aceleração adquirida ($\ddot{x}(t)$). As forças resultantes, por sua vez, podem ser descritas em dois grupos, sendo o primeiro grupo constituído pelo somatório das forças exercidas sobre a superfície molhada do corpo¹⁰, que representam a componente hidrodinâmica e hidrostática total (F_{HT}) aplicada pelo fluido sobre o corpo do flutuador e o segundo grupo constituído pelas forças impostas, por oposição ao movimento natural de oscilação (F_{PTO}), pelo PTO (descrita na secção 3.3 – Modelo Sistema Hidráulico).

$$\sum(F_{HT}(t)) + \sum(F_{PTO}(t)) = m \cdot \ddot{x}(t) \quad (3.10)$$

¹⁰ Parte do corpo que se encontra a cor azul e por conseguinte por debaixo da linha azul que representa a linha de água, na Figura 3.2.

Na modelação de sistemas dinâmicos é frequente considerar algumas simplificações que visam reduzir o esforço computacional, desenvolvendo-se modelos numéricos rápidos e simples que permitam com alguma fiabilidade e de uma forma mais económica demonstrar os resultados obtidos em ensaios experimentais do sistema físico, por exemplo em tanque de ondas, a escalas reduzidas [76]. No modelo hidrodinâmico do corpo do flutuador desprezam-se as forças de atrito:

- Por efeitos de viscosidade do deslocamento do fluido sobre o corpo (efeitos não lineares);
- Por atrito mecânico imposto pelo PTO.

Consoante a comparação da análise de resultados registada dos ensaios experimentais versus modelos numéricos, pode porventura ser necessário recorrer à determinação da constante que representa a resistência de fricção (R_f) se a diferença entre os resultados for considerável [77]. A resistência à fricção é a designação dada ao parâmetro que relaciona a contribuição da viscosidade, fricção mecânica e perdas no PTO. A força de atrito (F_a) seria, numa primeira análise e para velocidades pequenas, então determinada por,

$$F_a(t) = -R_f \cdot \dot{x}(t) \quad (3.11)$$

onde $\dot{x}(t)$ representa a velocidade relativa entre o corpo do flutuador e o cilindro hidráulico. Não tendo sido alvo de estudo no âmbito desta dissertação considera-se a resistência à fricção como nula, desprezando-se os efeitos que lhe estão associados.

3.2.2.1 Força Hidrodinâmica

A componente hidrodinâmica e hidrostática do sistema é definida pela decomposição da interacção das forças resultantes entre a onda de mar e o dispositivo de aproveitamento da energia das ondas, de acordo com a seguinte equação,

$$F_{HT}(t) = F_{exc}(t) + F_{rad}(t) + F_{hs}(t) \quad (3.12)$$

onde $F_{exc}(t)$ é a Força de excitação ou de difracção, $F_{rad}(t)$ a Força de radiação, e $F_{hs}(t)$ a Força Hidrostática [77].

3.2.2.1.1 Força de Excitação ou Difracção

A força de excitação ou difracção representa a força hidrodinâmica que por acção das ondas incidentes permite movimentar o corpo do flutuador que se encontra em repouso, sendo obtida pela seguinte convolução¹¹ [77],

$$F_{exc}(t) = \eta(t) * f_{exc}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \eta(\tau) \cdot f_{exc}(t - \tau) d\tau \quad (3.13)$$

entre a interacção da função da variação da superfície da onda $\eta(t)$ no corpo do flutuador e a função $f_{exc}(t)$, que nos permite obter a trajectória para a força de excitação, pela sua convolução com a elevação da superfície livre na origem do referencial adoptado.

3.2.2.1.2 Força de Radiação

A força de radiação é a força hidrodinâmica devido ao movimento de oscilação do corpo do flutuador na ausência de ondas incidentes, decomposta pelo produto da massa adicional $M(\infty)$ com a aceleração do corpo do flutuador e pela convolução entre a velocidade do corpo do flutuador ($\dot{x}(t)$) para cada instante de intervalo de tempo, t , e a função da componente de resposta do corpo do flutuador [77].

$$F_r(t) = -M(\infty) \cdot \ddot{x}(t) - f_{rad}(t) * \dot{x}(t) \quad (3.14)$$

$$F_r(t) = -M(\infty) \cdot \ddot{x}(t) - \int_{-\infty}^t f_{rad}(t - \tau) \cdot \dot{x}(\tau) d\tau$$

A massa adicional é introduzida de forma a representar o efeito de inércia da massa de água que é deslocada (radiada) pelo movimento oscilatório do corpo do flutuador, em que $M(\infty)$ é o valor limite do coeficiente hidrodinâmico da massa adicional $M(\omega)$ para $\omega \rightarrow \infty$. O limite superior da integração é t porque a força de radiação, é causal.

¹¹ Entende-se como convolução pelo integral do produto de duas funções, apresentando uma das funções inversão do sentido original. O conceito de convolução está ligado ao de média móvel e é crucial no estudo de sistemas lineares invariantes no tempo.

3.2.2.1.3 Força Hidrostática

A força hidrostática é resultante da força exercida pelo fluido (água do mar) em repouso sobre o corpo do flutuador imerso (Impulsão), sendo proporcional à massa volúmica do fluido (ρ), à aceleração da gravidade (g) e ao volume de fluido deslocado [77],

$$F_{hs}(t) = -\rho \cdot g \cdot V = -\rho \cdot g \cdot A_c \cdot x(t) \quad (3.15)$$

sendo o volume de fluido deslocado o produto da área do plano de água do corpo do flutuador (A_c) pelo deslocamento do corpo ($x(t)$) desde a posição de repouso (equilíbrio). Ao produto da massa volúmica do fluido, da aceleração da gravidade e da área do plano de água define-se por coeficiente hidrodinâmico de restituição da rigidez hidrostática.

3.2.2.2 Transformada de Laplace

A equação diferencial do sistema dinâmico linear¹² do movimento do dispositivo no domínio do tempo, por aplicação da definição das forças (3.13), (3.14), (3.15) que compõem a força hidrodinâmica total, (3.12) obtêm-se,

$$\begin{aligned} F_{exc}(t) + F_{rad}(t) + F_{hs}(t) + \sum(F_{PTO}(t)) &= m \cdot \ddot{x}(t) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \left(\int_{-\infty}^{\infty} \eta(\tau) \cdot f_{exc}(t-\tau) d\tau \right) - \left(M(\infty) \cdot \ddot{x}(t) + \int_{-\infty}^t f_{rad}(t-\tau) \cdot \dot{x}(\tau) d\tau \right) - \\ - (\rho \cdot g \cdot A_c \cdot x(t)) + \sum(F_{PTO}(t)) &= m \cdot \ddot{x}(t) \end{aligned} \quad (3.16)$$

Os métodos clássicos para a solução completa de equações diferenciais requerem o cálculo de constantes de integração a partir das condições iniciais, com a aplicação da transformada de Laplace as condições iniciais estão incluídas automaticamente na transformada de Laplace da equação diferencial [78]. Ao considerar que as condições iniciais no modelo hidrodinâmico são nulas, a transformada de Laplace da equação diferencial será dada pela substituição das variáveis,

¹² Sistemas lineares: Um sistema é dito linear se o princípio da superposição se aplicar. Entende-se por sistema linear quando a resposta a diversas entradas pode ser calculada tratando uma entrada de cada vez e somando os resultados [54]. Exemplo: Seja $x(t)$ e $y(t)$ entradas de um sistema G e a sua saída $x'(t)$ e $y'(t)$ ao aplicar-se a combinação linear $a.x(t)+b.y(t)$ na entrada do sistema, a saída será $a.x'(t)+b.y'(t)$.

$$L\{x(t)\} = X(s) \quad (3.17)$$

$$L\left\{\dot{x}(t)\right\} = L\left\{\frac{dx}{dt}\right\} = s \cdot X(s) \quad (3.18)$$

$$L\left\{\ddot{x}(t)\right\} = L\left\{\frac{d^2x}{dt^2}\right\} = s^2 \cdot X(s) \quad (3.19)$$

as funções $f_{exc}(t)$ e $f_{rad}(t)$, funções no domínio de tempo, dependentes dos coeficientes hidrodinâmicos, (força de excitação $F_e(\omega)$ e amortecimento de radiação¹³ $B(\omega)$), obtidos da modelação em frequência, com comportamento linear, por aplicação de uma onda sinusoidal de um metro de amplitude, podem ser expressas através de uma função de transferência de Laplace $G(s)$ [73], Figura 3.6.

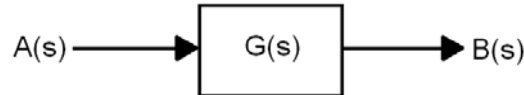


Figura 3.6 – Diagrama de transferência de A(s) para B(s), através da função de transferência de Laplace G(s).

Esta função de transferência pode ser definida como a relação entre a transformada de Laplace da saída (B(s) - função de resposta) e a transformada de Laplace da entrada (A(s) - função de excitação), admitindo todas as condições iniciais nulas. Obtêm-se assim a substituição das funções do tempo $f_{exc}(t)$ e $f_{rad}(t)$ por (3.20), (3.21) e da função transferência, (3.22).

$$\frac{B_{exc}(s)}{A_{exc}(s)} \quad (3.20)$$

$$\frac{B_{rad}(s)}{A_{rad}(s)} \quad (3.21)$$

¹³ Coeficiente de amortecimento de radiação: Associado à radiação de ondas produzidas pelo movimento oscilante do corpo.

$$G(s) = \frac{L\{saída\}}{L\{entrada\}} \Big|_{ci=0} = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{b_0 \cdot s^m + b_1 \cdot s^{m-1} + \dots + b_{m-1} \cdot s + b_m}{a_0 \cdot s^n + a_1 \cdot s^{n-1} + \dots + a_{n-1} \cdot s + a_n} \quad (3.22)$$

Na equação (3.22) o maior valor da potência de s , do polinómio, no denominador, representa a ordem do sistema. A utilização de funções de transferência é limitada a sistemas de equações diferenciais lineares invariantes no tempo, ou seja, cujos coeficientes ($b_0, b_1, \dots, b_n$ e $a_0, a_1, \dots, a_n$) sejam constantes e não em função do tempo.

Os integrais de convolução da força de excitação e da força de radiação são deste modo substituídos pelo produto da transformada de Laplace das funções de variação da superfície da onda do mar, $L\{\eta(t)\} = H(s)$ e velocidade do corpo do flutuador,

$$L\{\dot{x}(t)\} = s \cdot X(s) \quad (3.23)$$

pelos respectivos polinómios, de acordo com [73].

$$L\{F_{exc}(t)\} = L\{\eta(t) * f_{exc}(t)\} = H(s) \cdot \frac{B_{exc}(s)}{A_{exc}(s)} \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned} L\{F_r(t)\} &= L\left\{-M(\infty) \cdot \ddot{x}(t)\right\} - L\left\{f_{rad}(t) * \dot{x}(t)\right\} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow L\{F_r(t)\} = -M(\infty) \cdot (s^2 \cdot X(s)) - \frac{B_{rad}(s)}{A_{rad}(s)} \cdot (s \cdot X(s)) \end{aligned} \quad (3.25)$$

Como a função do tempo da $f_{exc}(t)$ não respeita o princípio de causalidade¹⁴ [58], isto é, leva a que seja necessário conhecer a série temporal completa da onda de superfície do mar, a simular, antes de se poder determinar a força de excitação e por conseguinte em separado das outras forças actuantes no dispositivo. Por motivos de instabilidade no sistema, decompõe-se a função de transferência na soma de duas componentes,

$$\frac{B_{exc}(s)}{A_{exc}(s)} = \frac{B_{exc}^{est}(s)}{A_{exc}^{est}(s)} + \frac{B_{exc}^{inst}(s)}{A_{exc}^{inst}(s)} \quad (3.26)$$

¹⁴ Princípio de causalidade: A saída de um sistema (no instante $t=0$) depende da entrada anterior (a entrada em um instante $t<0$), mas não depende da entrada futura (as entradas nos instantes $t>0$).

o que resulta que a força de excitação tenha que ser decomposta no somatório de duas forças, sendo a primeira das forças de excitação $F_{exc}^{est}(s)$ a componente estável do sistema e determinada por,

$$F_{exc}|_{est}(s) = H(s) \cdot \frac{B_{exc}^{est}(s)}{A_{exc}^{est}(s)} \quad (3.27)$$

e a segunda força

$$F_{exc}|_{inv}(s) = H_{inv}(s) \cdot \frac{B_{exc}^{inst}(s)}{A_{exc}^{inst}(s)} \quad (3.28)$$

a componente instável, como sendo a inversa da força de excitação [73].

$$F_{exc}(s) = F_{exc}^{est}(s) + F_{exc}^{inst}(s) \quad (3.29)$$

$$F_{exc}(s) = H(s) \cdot \frac{B_{exc}^{est}(s)}{A_{exc}^{est}(s)} + \left(H_{inv}(s) \cdot \frac{B_{exc}^{inst}(s)}{A_{exc}^{inst}(s)} \right)_{inv} \quad (3.30)$$

Conhecidas as diferentes forças actantes no conversor de energia das ondas, por aplicação da transformada de Laplace, equações (3.25), (3.30), reescreve-se a equação do movimento no domínio do tempo (3.16),

$$\begin{aligned} & \left(H(s) \cdot \frac{B_{exc}^{est}(s)}{A_{exc}^{est}(s)} + H_{inv}(s) \cdot \frac{B_{exc}^{inst}(s)}{A_{exc}^{inst}(s)} \right) - \\ & - \left(M(\infty) \cdot s^2 \cdot X(s) + \frac{B_{rad}(s)}{A_{rad}(s)} \cdot s \cdot X(s) \right) - (\rho \cdot g \cdot A_c \cdot X(s)) + \\ & + \sum(F_{PTO}(s)) = m \cdot s^2 \cdot X(s) \end{aligned} \quad (3.31)$$

do conhecimento dos coeficientes hidrodinâmicos da massa adicional $M(\omega)$, amortecimento de radiação $B(\omega)$ e força de excitação $F_e(\omega)$ em frequência, fornecidos por ferramentas computacionais como ANSYS, AQWA ou Wamit, é possível determinar os coeficientes das funções de transferência¹⁵, por aplicação da função comercial INVFREQS.M existente na ferramenta computacional seleccionada (MATLAB), como representado na Figura 3.7.

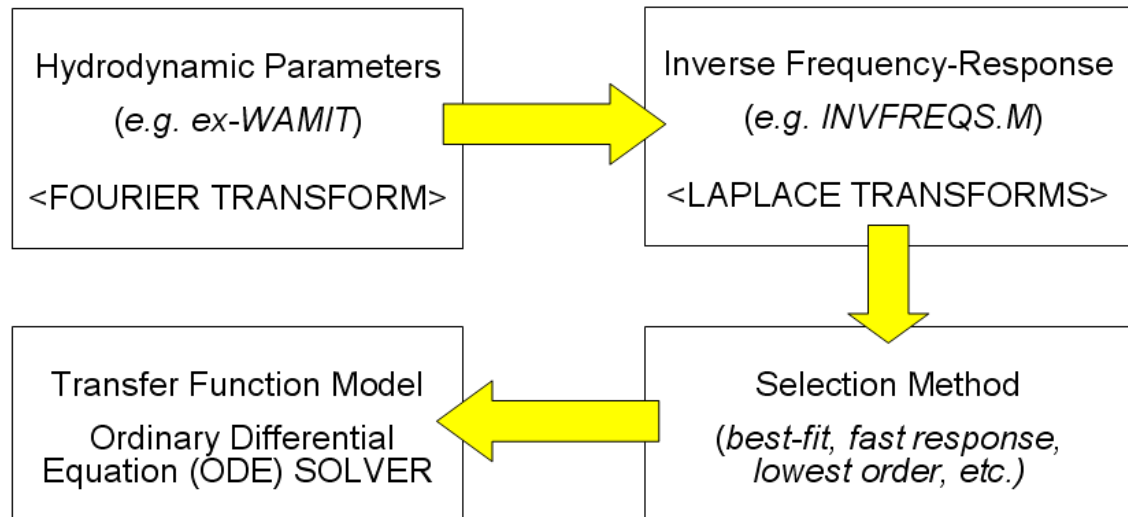


Figura 3.7 – Diagrama do procedimento para encontrar a função de transferência do modelo, recorrendo à função INVFREQS.M [79].

3.2.3 Sistema Hidráulico

O modelo do sistema hidráulico apresentado na Figura 3.8, tem como principal função transformar a energia contida nas ondas do mar em energia mecânica.

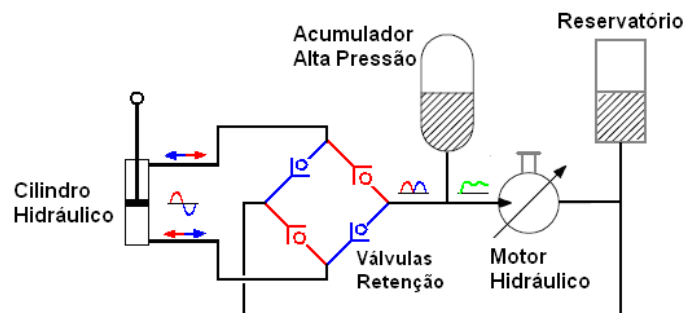


Figura 3.8 – Modelo do sistema hidráulico.

¹⁵ Os coeficientes das funções de transferência utilizados, são apresentados no Anexo B.

Esta transformação é conseguida recorrendo a um actuador hidráulico (cilindro hidráulico de duplo efeito de haste simples com dois sentidos de trabalho), com áreas de trabalho diferentes devido à existência da haste. Este actuador tem como função injectar caudal sobre pressão por um conjunto de válvulas de retenção, que do ponto de vista da modelação do sistema hidráulico permitem transformar a injeção de um caudal alternado proveniente do cilindro hidráulico num fluxo de caudal contínuo para o acumulador de alta pressão. Por sua vez, o acumulador armazena o fluido deslocado em excesso a alta pressão por compressão de um gás (Energia Hidráulica). O fluido é posteriormente libertado para o motor hidráulico (Energia Mecânica) accionando o gerador eléctrico (Energia Eléctrica). O fluido depositado pelo motor no reservatório será devolvido ao cilindro hidráulico, por aspiração do óleo à pressão atmosférica devido à criação de vácuo parcial. Fechando o fluxo do fluido no circuito hidráulico apresentado.

3.2.3.1 Analogia Eléctrica

Por meio da aplicação das válvulas de retenção é possível rectificar um sinal alternado num sinal contínuo, à semelhança da aplicação dos rectificadores em ponte de onda completa utilizados em circuitos eléctricos para conversão da corrente alterna (CA) para corrente contínua (CC).

A analogia eléctrica deste circuito hidráulico pode ser descrita como se o cilindro hidráulico se tratasse de uma fonte de tensão alternada (CA) que ao variar alternadamente as polaridades positiva e negativa, origina uma corrente eléctrica (Analogia Hidráulica = Fluxo Hidráulico “Caudal”), proporcional à magnitude da diferença de potencial (Analogia Hidráulica = Diferença de Pressão), de sentidos alternados (bidireccionais). Os quatro díodos (Analogia Hidráulica = Válvulas de Retenção) permitem a passagem da corrente eléctrica, quando aos terminais de cada díodo, o ânodo (A) estiver com um potencial positivo em relação ao cátodo (K), encontrando-se assim directamente polarizado.



Figura 3.9 – Símbolo eléctrico do díodo.

Por sua vez, quando o ânodo estiver com potencial negativo em relação ao cátodo, diz-se que o díodo está inversamente polarizado, não permitindo a passagem da corrente eléctrica.

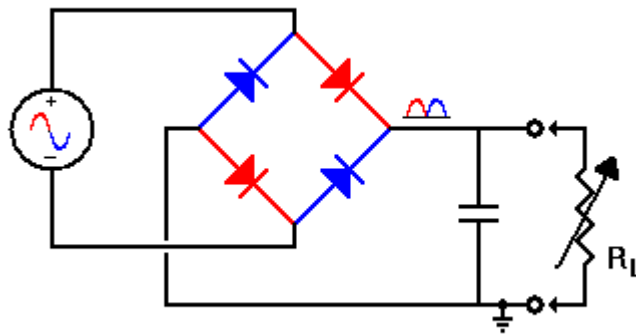


Figura 3.10- Esquema de montagem de um circuito rectificador de onda completa com ponte de díodos e condensador.

Ao se considerar a tensão de entrada, como exemplo, num ciclo do período de uma onda sinusoidal (), o Rectificador de Onda Completa permite a passagem da CA em dois dos quatro díodos, em cada metade do período de onda, ou por outro modo em cada meio ciclo (alternância positiva e alternância negativa), permitindo que a diferença de potencial na resistência de carga variável (Analogia Hidráulica = Motor Hidráulico de cilindrada variável) seja sempre positiva( - Onda Rectificada da tensão) e a corrente tenha sempre o mesmo sentido. A ligação no circuito eléctrico de um condensador (Analogia Hidráulica = Acumulador Alta Pressão), em paralelo com a resistência de carga variável, tem como função suavizar a variação do sinal de entrada. No exemplo considerado, o condensador carrega até ao valor de pico ($V_{máx}$) da Onda rectificada. No instante de tempo seguinte ($t > t_1$), como a tensão do condensador é maior que a tensão de entrada inicia o processo de descarga através da resistência de carga variável (R_L), até ao momento em que volta a carregar porque a tensão rectificada excedeu a tensão do condensador (Analogia Hidráulica = Pressão de pré-carga do Acumulador), Figura 3.11.

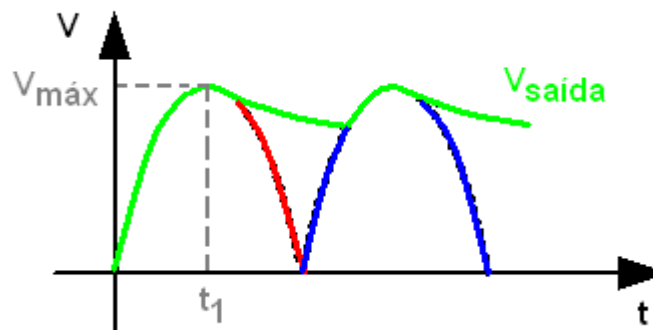


Figura 3.11- Diferença de Potencial obtida aos terminais da resistência R_L da montagem da Figura 3.10.

Deste modo a tensão de saída é dependente da capacidade de carga (Q) eléctrica armazenada (Analogia Hidráulica = Volume “Quantidade de Fluido Armazenado a Alta pressão”) e da resistência de carga variável. A descrição matemática do comportamento dinâmico dos componentes que compõem o sistema hidráulico é descrita nas próximas subsecções, não sem antes se assumir que:

- A perda de pressão nas canalizações é desprezada;
- Os caudais de fugas dos equipamentos hidráulicos são desprezados;
- O funcionamento do sistema hidráulico através da analogia eléctrica que se acabou de descrever.

3.2.3.2 Cilindro Hidráulico

O cilindro hidráulico de duplo efeito, como anteriormente referido, é composto por áreas diferentes (secções transversais do êmbolo diferentes) devido à existência da haste (Área Anular), como se descreve na Figura 3.12.

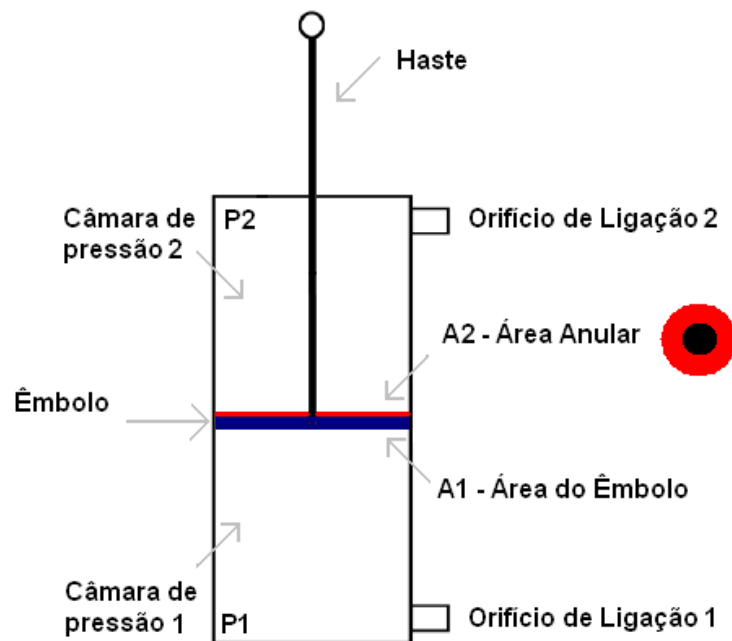


Figura 3.12 – Esquema de um cilindro hidráulico (corte vertical).

Deste modo, qualquer que seja a posição do êmbolo durante o movimento linear do cilindro, os volumes serão sempre diferentes em cada uma das câmaras de pressão 1 e 2. Os volumes para cada câmara do cilindro ($V_{C1}(t)$ e $V_{C2}(t)$), são determinados pelas equações diferenciais do produto

da velocidade do corpo do flutuador e a secção transversal do êmbolo (S_{ci}) visto do lado da câmara de pressão respectivo.

$$\dot{V}_{C1}(t) = \dot{x}(t) \cdot S_{C1} \quad (3.32)$$

$$\dot{V}_{C2}(t) = \dot{x}(t) \cdot S_{C2} \quad (3.33)$$

O aumento ou diminuição do volume implica um aumento ou redução do caudal de entrada (fluido deslocado do reservatório para o cilindro) ou de saída (fluido deslocado do cilindro para o acumulador de alta pressão). O caudal é descrito pelo princípio da continuidade¹⁶,

$$Q = S_{ci} \cdot \dot{x}(t) \quad (3.34)$$

onde Q corresponde ao volume do fluido deslocado, “Caudal” e $\dot{x}(t)$ à velocidade do fluido, sendo esta igual à velocidade do corpo do flutuador.

A câmara de pressão 1 encontra-se em compressão quando se regista uma redução do seu volume, o mesmo será dizer que o corpo do flutuador se desloca em movimento vertical descendente, enquanto a câmara de pressão 2 está a “aspirar” o fluido do reservatório, aumentando o seu volume, o mesmo sucedendo quando o movimento do cilindro é ascendente.

A equação diferencial que descreve a variação da pressão no interior do cilindro hidráulico é dada por [80] e designada pela equação da continuidade do movimento,

$$\dot{P}(t) = \frac{dp}{dt} = \frac{Q}{V \cdot \beta} \quad (3.35)$$

onde P é a pressão, Q o caudal de compressibilidade do fluido, V o volume e β o coeficiente de compressibilidade do fluido. Da equação da continuidade podem ser descritas as equações diferenciais para cada câmara do cilindro:

- Câmara 1:

$$\dot{P}_1(t) = \frac{\varepsilon \left(q_{tl}(t) + q_{al}(t) - S_{cl} \cdot \dot{x}(t) \right)}{V_{cl}} \quad (3.36)$$

- Câmara 2:

¹⁶ O princípio da continuidade - num determinado volume o caudal de um fluido ideal é nulo desde que esse volume não contenha fontes ou vazadouros.

$$\dot{P}_2(t) = \frac{\varepsilon \left(q_{i2}(t) + q_{a2}(t) + S_{c2} \cdot \dot{x}(t) \right)}{V_{c2}} \quad (3.37)$$

onde:

- P_i é a pressão interna nas câmaras do cilindro, ε o módulo de compressibilidade “Bulk Modulus” (como sendo o inverso do coeficiente de compressibilidade β),
- q_{ti} o caudal que provém do reservatório para o cilindro,
- q_{ai} o caudal deslocado do cilindro para o acumulador,
- S_{ci} a secção transversal do lado de cada câmara
- V_{ci} o volume geométrico das câmaras do cilindro hidráulico.

O módulo de compressibilidade “Bulk Modulus” é utilizado de forma a evitar instabilidade numérica do modelo matemático [76]. Por cada câmara de pressão são adicionados aos caudais de entrada (q_{ti}) e saída (q_{ai}), nos orifícios de ligação, o caudal resultante do movimento do êmbolo no interior da câmara do cilindro hidráulico ($S_{ci} \cdot \dot{x}(t)$).

3.2.3.3 Válvulas Retenção

Os caudais de entrada e saída no cilindro hidráulico não são mais que funções da velocidade linear relativa entre o corpo do flutuador e o cilindro hidráulico. As válvulas de retenção permitem o controlo da passagem do caudal para o acumulador em função das pressões do cilindro e do acumulador, como se evidencia na seguinte formulação [76]:

- Caudal do cilindro hidráulico para o acumulador de alta pressão:

$$q_{a1}(t) = \begin{cases} S_{c1} \cdot \dot{x}(t) & \text{Quando } \dot{x}(t) < 0 \text{ e } P_1 > P_{acc} \\ 0 & \end{cases} \quad (3.38)$$

$$q_{a2}(t) = \begin{cases} -S_{c2} \cdot \dot{x}(t) & \text{Quando } \dot{x}(t) > 0 \text{ e } P_2 > P_{acc} \\ 0 & \end{cases} \quad (3.39)$$

- Caudal do reservatório para o cilindro hidráulico:

$$q_{i1}(t) = \begin{cases} S_{c1} \cdot \dot{x}(t) & \text{Quando } \dot{x}(t) > 0 \text{ e } P_1 < P_t \\ 0 & \end{cases} \quad (3.40)$$

$$q_{i2}(t) = \begin{cases} -S_{c2} \cdot \dot{x}(t) & \text{Quando } \dot{x}(t) < 0 \text{ e } P_2 < P_t \\ 0 & \end{cases} \quad (3.41)$$

Para que exista fluido em circulação na direcção do acumulador de alta pressão, significa que independente da direcção em que se desloque o cilindro hidráulico a pressão no acumulador (P_{acc}) tem que ser sempre inferior à pressão no interior da câmara do cilindro hidráulico que se encontra em compressão, ou seja, assim que uma das câmaras estiver pressurizada o fluido é directamente direccionado para o acumulador de alta pressão. O mesmo se verifica no caudal do reservatório para o cilindro hidráulico, em que o valor da pressão do reservatório (P_r) tem que ser sempre inferior à pressão da câmara de aspiração. O sentido dos caudais, nos orifícios de ligação do cilindro hidráulico, são ilustrados na Figura 3.13 em função da velocidade de movimento do cilindro hidráulico em ordem ao tempo para uma onda sinusoidal.

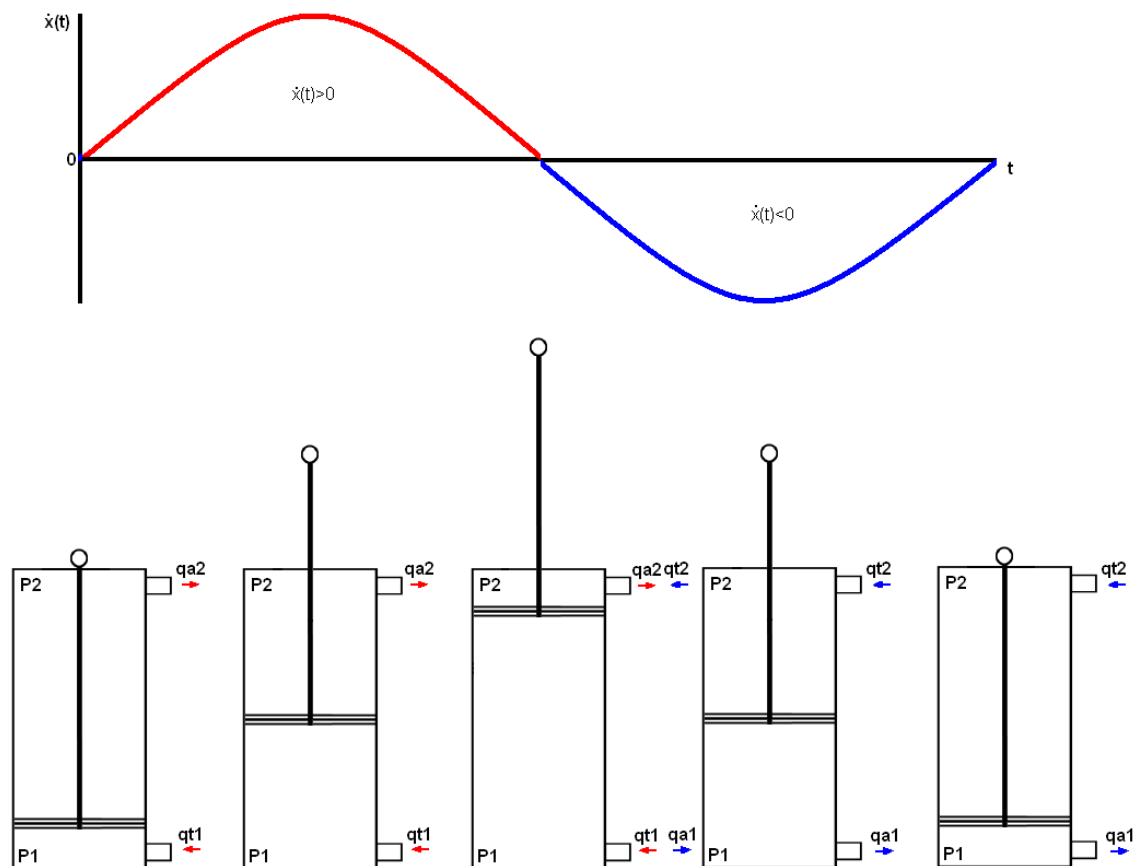


Figura 3.13 – Sequência do movimento do cilindro hidráulico para uma onda sinusoidal.

3.2.3.4 Sistema Paragem

Por motivos de limitação construtiva, do ponto de vista prático, existe a necessidade de criar uma desaceleração do movimento quando o deslocamento do cilindro é próximo ou superior ao limite do curso do cilindro (deslocamento máximo de uma das extremidades do cilindro à extremidade oposta ($x_{máx}$)) [77]. Esta desaceleração do ponto de vista teórico é conseguida à custa de um sistema mola-amortecedor, supostamente instalado nas extremidades do cilindro hidráulico, dissipando a energia cinética, o que na prática representa um sistema de segurança para reduzir a possibilidade de danos mecânicos no cilindro hidráulico. A mola representa o efeito de armazenamento da energia e o amortecimento a energia dissipada.

A força resultante do sistema mola-amortecedor é decomposta em duas forças:

- Força da Mola (F_S):

$$F_S(t) = \begin{cases} -K^- \cdot (x(t) - x_{ln}) & \text{Quando } x(t) < x_{ln} \\ 0 & \text{Quando } x_{ln} < x(t) < x_{lp} \\ -K^+ \cdot (x(t) - x_{lp}) & \text{Quando } x(t) > x_{lp} \end{cases} \quad (3.42)$$

- Força do amortecimento (F_D)

$$F_D(t) = \begin{cases} B^- \cdot \left(\dot{x}(t)\right)^2 & \text{Quando } x(t) < x_{ln} \text{ e } \dot{x}(t) < 0 \\ 0 & \text{Quando } x_{ln} < x(t) < x_{lp} \\ -B^+ \cdot \left(\dot{x}(t)\right)^2 & \text{Quando } x(t) > x_{lp} \text{ e } \dot{x}(t) > 0 \end{cases} \quad (3.43)$$

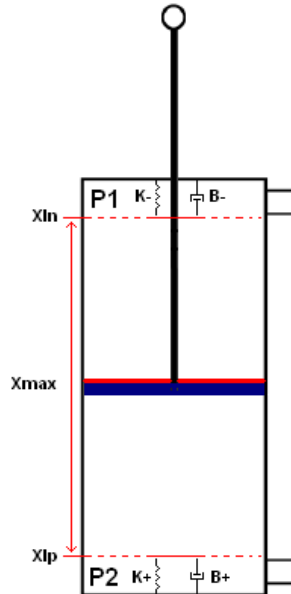


Figura 3.14 – Limites do curso do cilindro hidráulico representado por um sistema mola-amortecedor.

Onde K e B são as constantes de rigidez da mola e amortecimento, respectivamente, aplicada a cada extremidade do cilindro hidráulico e x_{ln} e x_{lp} são os limites quando o sentido do curso do cilindro é negativo e positivo, como se ilustra na Figura 3.14 [77]. A aplicação destas forças tende a reduzir o movimento do corpo do flutuador até que o curso do êmbolo do cilindro hidráulico se imobilize (pare) numa das extremidades, para situações de estados de mar com amplitudes superiores ao limite do curso do cilindro.

3.2.3.4.1 Força do sistema de extracção (PTO)

Apresentadas as forças impostas pelo sistema de paragem, resta conhecer a força de trabalho imposta pelo cilindro hidráulico para que se complemente o conjunto das forças do sistema de extracção de energia PTO. A força desenvolvida pelo cilindro ($F_{hc}(t)$) é directamente obtida da diferença entre o produto da pressão pela secção transversal em cada câmara de pressão, de acordo com a equação,

$$F_{hc}(t) = - \text{sign}\left(\dot{x}(t)\right) \times \frac{(P_1(t) \cdot S_{C1} - P_2(t) \cdot S_{C2})}{1000} \quad [kN] \quad (3.44)$$

em oposição à velocidade de deslocação do corpo do flutuador, utilizando a função signum^{17} .

$$\text{sign}\left(\dot{x}(t)\right) = \begin{cases} -1 & \text{Se } \dot{x}(t) < 0 \\ 0 & \text{Se } \dot{x}(t) = 0 \\ 1 & \text{Se } \dot{x}(t) > 0 \end{cases} \quad (3.45)$$

O resultado das forças que se opõem ao movimento do corpo impostas pelo sistema de extracção de energia (PTO), são obtidas pelo somatório das forças do cilindro hidráulico (F_{hc}), da componente de mola (FS) e do amortecimento (FD).

$$F_{pto}(t) = F_{hc}(t) + F_S(t) + F_D(t) \quad (3.46)$$

O módulo da potência instantânea do cilindro hidráulico pode ser determinada pelo produto da Força desenvolvida pelo sistema de extracção de energia e o módulo da velocidade do corpo.

¹⁷ Função signum – Trata-se de uma função ímpar definida por ser simétrica em relação à origem das coordenadas ($f(-x) = -f(x)$).

$$P_{inst.}(t) = \left| F_{pto} \cdot \dot{x}(t) \right| \quad (3.47)$$

3.2.3.5 Acumulador Alta Pressão

O Acumulador de Alta Pressão é a unidade de armazenamento de energia, energia hidráulica, deste dispositivo de conversão de energia das ondas em energia eléctrica. Existem diversos tipos de acumuladores hidráulicos no mercado, cuja função na generalidade é adicionar ou armazenar, caudal em excesso por intermédio da expansão ou compressão de um gás no seu interior. Poder-se-á caracterizar o princípio de funcionamento de um acumulador em três etapas. Em primeiro a definição da pressão de pré-carga ($P_{0gás}$), estabelecida por preenchimento do volume do acumulador (V_{acc}), com um volume de gás inicial ($V_{0gás}$), Nitrogénio. A segunda consiste em vencer a pressão de pré-carga, de modo a que exista entrada de caudal no acumulador e se estabeleça o mínimo da pressão de trabalho (P_{1min}) e por conseguinte o máximo volume ($V_{1máx}$) de gás. Assim que a Pressão mínima é alcançada, uma pequena quantidade de óleo, aproximadamente 10% do volume nominal [81], deve permanecer entre a bexiga e a válvula de retenção, para que a válvula não se feche na descarga do acumulador. Por último, a diferença entre o volume de gás à pressão mínima (P_{1min}) e o volume de gás à pressão Máxima ($P_{1máx}$) corresponde ao volume de óleo útil de trabalho do acumulador ($V_{óleo}$), Figura 3.15.

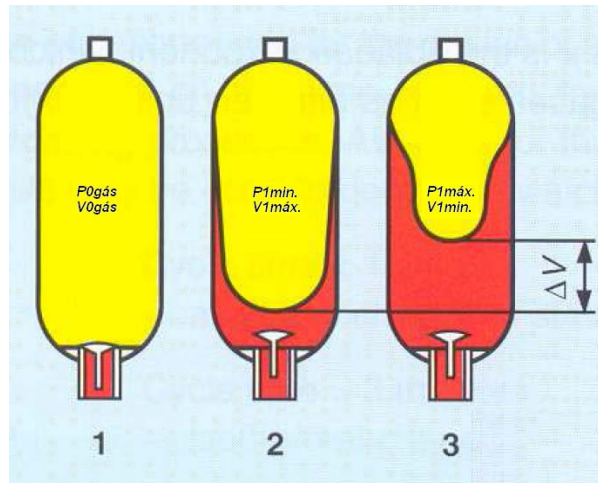


Figura 3.15 – Sequência de carregamento do acumulador.

O acumulador tem aqui uma função semelhante à do condensador referido na secção 3.2.3.1. Considerando o processo termodinâmico que rege a compressão e expansão do gás no acumulador isentrópico¹⁸, aplicado à equação dos gases perfeitos tem-se:

$$P \cdot V^\gamma = \text{const.}, \quad (3.48)$$

Sendo o produto da pressão (P) e do volume (V) de uma massa gasosa inversamente proporcional e γ a razão entre os calores específicos a pressão constante e volume constante, é possível estabelecer a relação da pressão e do volume no acumulador. O volume total do acumulador (V_{acc}), é um dado constante, podendo-se escrever que a soma das equações diferenciais do volume de gás e do volume do fluido óleo hidráulico é igual a zero.

$$\dot{V}_{acc} = \frac{dV_{acc}}{dt} = \frac{dV_{gás}}{dt} + \frac{dV_{óleo}}{dt} = 0 \quad (3.49)$$

Como a derivada do volume é uma relação directa do caudal de entrada no acumulador, e por conseguinte do resultado da soma dos caudais do cilindro hidráulico e do motor hidráulico, determina-se que o volume de óleo e gás, é obtido, das seguintes equações [80],

$$\dot{V}_{gás}(t) = q_{acc}(t) = q_{a1}(t) + q_{a2}(t) + q_m(t) \quad \text{Quando } V_{1min.} \leq V_{gás} \leq V_{0gás}. \quad (3.50)$$

$$\dot{V}_{óleo}(t) = -q_{acc}(t) = -(q_{a1}(t) + q_{a2}(t) + q_m(t)) \quad \text{Quando } 0 \leq V_{óleo} \leq (V_{0gás} - V_{1min.}) \quad (3.51)$$

no qual:

- $V_{óleo}$ é o volume de óleo no acumulador;
- $V_{gás}$ o volume de gás;
- q_{acc} o caudal do acumulador.

O caudal do acumulador é o resultado do somatório dos caudais provenientes das câmaras do cilindro hidráulico q_{a1} e q_{a2} e do caudal do motor q_m . Da derivada da equação dos gases para uma transformação adiabática ($\gamma=1.4$) tem-se [80]:

¹⁸ Processo isentrópico – Processo no qual a entropia do sistema se mantém constante. Qualquer processo adiabático (ausência de transmissão de energia térmica com o ambiente exterior, por se encontrar termicamente isolado ou por ocorrer rapidamente, apesar de existir variação térmica no interior) reversível pode ser designado como processo isentrópico.

$$\frac{d(P_{gás} \cdot V_{gás}^{\gamma})}{dt} = \frac{dP_{gás}}{dt} \cdot (V_{gás})^{\gamma} + \gamma \cdot P_{gás} \cdot (V_{gás})^{\gamma-1} \cdot \frac{dV_{gás}}{dt} = 0 \quad (3.52)$$

Obtêm-se seguidamente a equação diferencial da pressão no acumulador ($p_{gás}=p_{acc}$),

$$\frac{dP_{gás}}{dt} = \frac{dP_{acc}}{dt} = - \frac{\gamma \cdot P_{acc} \cdot \frac{dV_{gás}}{dt}}{V_{gás}} \quad (3.53)$$

tendo em consideração que em qualquer instante a pressão do gás é igual à pressão do fluido no acumulador, considerando que a compressibilidade do óleo é desprezável em comparação com a do gás [80]. Para a modelação do reservatório considera-se que o valor da pressão interior é estável e constante, encontrando-se à pressão atmosférica ($P_i=1$ [Pa]).

3.2.3.6 Motor Hidráulico

O motor hidráulico têm como função transformar a energia hidráulica gerada pelo movimento linear dos cilindros hidráulicos sobre um fluido em energia mecânica por movimento rotativo. Estes motores são máquinas do tipo hidrostático (máquinas volumétricas) e destacam-se pela vantagem de funcionar a altas pressões, igual ou superior a 200 bar, serem de pequenas dimensões, elevada eficiência volumétrica e pequenas variações de rendimento com a variação de pressão. Existem essencialmente dois parâmetros para a caracterização de um motor hidráulico, o binário motor (T_m) e a velocidade de rotação (n_r).

A variação da velocidade de rotação é considerada uma variável de estado, enquanto a cilindrada (D) e a eficiência volumétrica são parâmetros constantes da modelação do motor hidráulico, para determinar o caudal volúmico que passa no motor (q_m),

$$q_m = \frac{D \cdot n_r}{10^6 * 60 * \eta_v} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (3.54)$$

A cilindrada dos motores hidráulicos (volume varrido pelo deslocamento rotativo do motor por volta) pode ser fixa ou variável, consoante a necessidade de se pretender controlar o binário no motor hidráulico. Nos motores de cilindrada variável determina-se a variável cilindrada como uma relação geométrica do ângulo de deslocamento,

$$D = D_{35} \cdot \frac{\text{seno}(\alpha)}{\text{seno}(35^\circ)} \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{rot.}} \right] \quad (3.55)$$

em que D é a cilindrada (deslocamento do motor) para um determinado ângulo (α) com uma limitação mínima de 6.5° e máxima (D_{35°) de 35° [82]. No que respeita ao seu aspecto construtivo os motores hidráulicos podem ser de engrenagens, palhetas ou de êmbolos (radiais e axiais), apresentando uma vasta gama de utilizações para diferentes velocidades. A figura 3.16 apresenta o esquema de funcionamento interno de um motor de êmbolos de cilindrada variável.

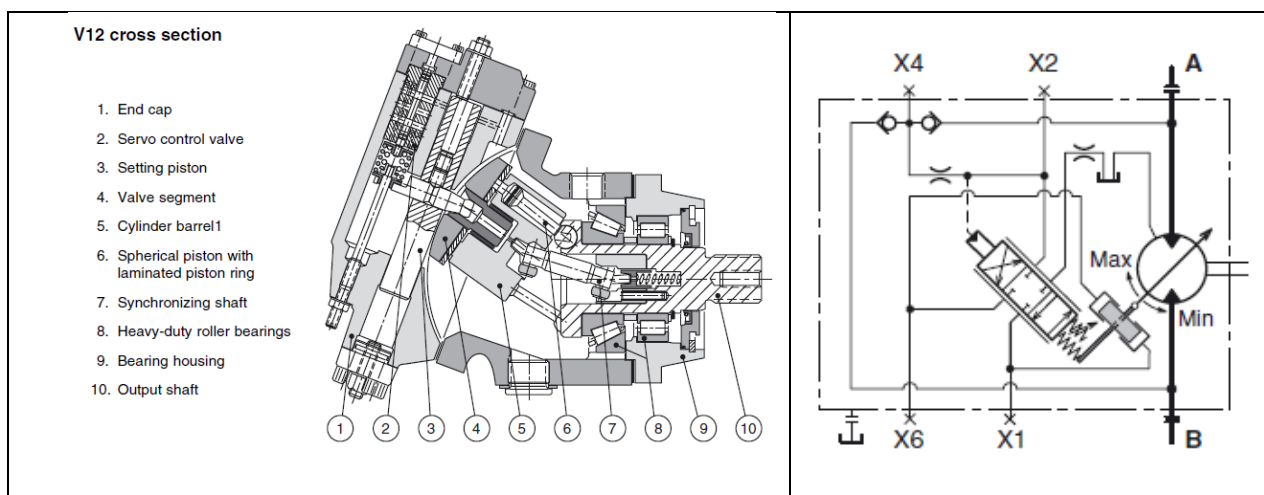


Figura 3.16 – Corte transversal de um motor hidráulico Parker V12 [82].

A variação da cilindrada é realizada por movimentação do êmbolo (“3. *Setting Piston*”) da posição mínima (Min. 6.5°) à posição máxima (Max. 35°) de forma controlada por intermédio de uma válvula direccional (“2. *Servo Control Valve*”). A alteração da cilindrada de um motor hidráulico, reflecte-se não só na velocidade de rotação, como no binário motor. O binário motor é obtido do produto da variação de pressão com a cilindrada do motor [82]

$$T_m = \frac{D \cdot \Delta P \cdot \eta_m}{10^5 \cdot 63} \quad [Nm] \quad (3.56)$$

onde ΔP é a variação de pressão entre a entrada e a saída do motor, ou seja a diferença de pressão entre o acumulador de alta pressão (P_{acc}) e a pressão no reservatório (P_t) se o acumulador estiver em funcionamento ou a diferença de pressão entre as câmaras do cilindro, e η_m a eficiência mecânica. Estabelecendo a variação da pressão como variável a monitorizar é possível definir vários regimes de funcionamento para o binário mecânico por variação da cilindrada do motor. A

potência debitada pelo motor é a resultante do produto do caudal que circula no motor (q_m) pela variação de pressão do sistema [82] .

$$P_m = \frac{q_m \cdot \Delta P \cdot \eta_t}{10^3} \quad [kW] \quad (3.57)$$

Em que η_t é a eficiência global do motor hidráulico obtido pelo produto da eficiência volumétrica e mecânica ($\eta_t = \eta_v \cdot \eta_m$) [82].

3.2.4 Máquina Assíncrona

A transformação de energia mecânica em energia eléctrica é maioritariamente efectuada recorrendo a geradores síncronos ou máquinas assíncronas de indução. As máquinas síncronas caracterizam-se por em regime estacionário, funcionarem com velocidade e frequência constantes, em sincronismo, enquanto que as máquinas assíncronas a sua velocidade de rotação em vazio é próxima da de sincronismo¹⁹. Ambas as máquinas eléctricas podem funcionar como motor ou gerador. Em modo motor recebem energia da rede eléctrica e fornecem energia mecânica, em modo gerador recebem energia mecânica de uma máquina de accionamento, como por exemplo o motor hidráulico ou turbina *wells*²⁰ e transformam-na em energia eléctrica que é entregue à rede eléctrica. Devido à sua simplicidade, robustez, fiabilidade e baixo custo é possível utilizar as máquinas assíncronas como geradores. Nesta dissertação considerou-se a máquina assíncrona como o gerador eléctrico a utilizar pelo dispositivo de conversão de energia das ondas..

Diversos estudos têm vindo a ser realizados com o propósito de simplificar os modelos matemáticos que descrevem o funcionamento da máquina de indução. O interesse nos estudos de integração de sistemas de conversão com base em fontes de energia renovável, reside na avaliação do comportamento da rede e não no estudo dos fenómenos transitórios que podem ter lugar nas máquinas.

O modo de operação da máquina assíncrona (ou de indução) nesta dissertação é definido como estando em modo gerador, o que significa que o sentido das correntes é positivo no sentido do gerador para a rede eléctrica, assim como o da potência activa e reactiva. As equações que descrevem o comportamento dinâmico de uma máquina assíncrona resultam da associação das equações por fase do circuito do rotor e do estator, no entanto como contêm as indutâncias do

¹⁹ Velocidade de sincronismo – Velocidade do campo magnético girante no entreferro.

²⁰ Turbina Wells – Utilizada em dispositivos costeiros de aproveitamento de energia das ondas para converter energia pneumática em energia mecânica de rotação.

sistema que variam consoante o desfasamento das fases (posição do rotor relativamente ao estator) e por conseguinte no tempo adicionam considerável complexidade na obtenção dos resultados [83], deste modo é conveniente a simplificação da resolução do problema, resolvendo-o por intermédio da aplicação da transformada das equações de Park relativamente a um eixo de referência arbitrário $d-q$ (d – eixo directo e q – eixo em quadratura) rodando a uma velocidade angular (w) de igual valor à velocidade angular de sincronismo ($w_s = 2 \cdot \pi \cdot f_s$) [84].

Na modelação dinâmica da máquina assíncrona, foram adoptadas neste trabalho algumas simplificações com o propósito de reduzir a complexidade da modelação, sem que com isso comprometa a qualidade dos resultados. Foram assim consideradas:

- A taxa de variação do fluxo magnético $\left(\frac{d\lambda}{dt}\right)$ no estator é desprezada;
- O rotor apresenta uma estrutura simétrica;
- A força elástica e a força resultante de torção no eixo da máquina são desprezadas;
- A saturação magnética é desprezada;
- A distribuição de fluxos é considerada como sinusoidal;
- As perdas por atrito e ventilação são desprezadas;
- Os enrolamentos rotóricos da máquina de indução são simples.

De referir que as equações, a seguir descritas, são utilizáveis para descrever o comportamento de máquinas assíncronas com rotor bobinado (*Double Fed Induction Machine*) ou em curto-circuito (*Squirrel Cage Induction Machine*) [84]. Apesar do trabalho descrito nesta dissertação se referir à máquina assíncrona de rotor em curto-circuito optou-se por apresentar as equações gerais da máquina assíncrona, representado a tensão do rotor igual a zero por o rotor se encontrar em curto-circuito.

3.2.4.1.1 Tensões e Correntes

A nomenclatura adoptada para designar o referencial $d-q$ provém da modelação das máquinas eléctricas síncronas, existindo porem uma vasta literatura onde a mesma é utilizada tanto para máquinas síncronas como assíncronas. A transformação linear das equações das tensões no estator e do rotor da máquina assíncrona sobre um eixo referencial $d-q$ obtêm-se das seguintes equações, [84].

- Tensões no estator

$$\begin{cases} v_{ds} = -R_s \cdot i_{ds} - w_s \cdot \lambda_{qs} + \frac{d}{dt}(\lambda_{ds}) \\ v_{qs} = -R_s \cdot i_{qs} - w_s \cdot \lambda_{ds} + \frac{d}{dt}(\lambda_{qs}) \end{cases} \quad (3.58)$$

▪ Tensões do rotor

$$\begin{cases} v_{dr} = -R_r \cdot i_{dr} - s \cdot w_s \cdot \lambda_{qr} + \frac{d}{dt}(\lambda_{ds}) = 0 \\ v_{qr} = -R_r \cdot i_{qr} + s \cdot w_s \cdot \lambda_{dr} + \frac{d}{dt}(\lambda_{qr}) = 0 \end{cases} \quad (3.59)$$

onde os índices d e q representam as variáveis afectas aos eixos directo (d) e em quadratura (q), estando “ q ” adiantado em 90° em relação a “ d ”, s e r os índices das variáveis do estator e do rotor, R_s a resistência do estator, R_r a resistência do rotor, v a tensão, i a corrente, w_s a velocidade angular do estator, w_r a velocidade angular do rotor (ou velocidade do gerador), s o deslizamento ou escorregamento e λ a dispersão do fluxo magnético. A dispersão dos fluxos magnéticos é definida como:

▪ Dispersão do fluxo magnético no estator

$$\begin{cases} \lambda_{ds} = -L_{ss} \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dr} \\ \lambda_{qs} = -L_{ss} \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (3.60)$$

▪ Dispersão do fluxo magnético no rotor

$$\begin{cases} \lambda_{dr} = L_{rr} \cdot i_{dr} + L_m \cdot i_{ds} \\ \lambda_{qr} = -L_{rr} \cdot i_{qr} + L_m \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (3.61)$$

onde L_{ss} representa a auto-indutância dos enrolamentos do estator, L_{rr} a auto-indutância dos enrolamentos do rotor e L_m a indutância mútua de magnetização entre os enrolamentos do estator e o rotor,

$$L_{ss} = L_s + L_m \quad [H] \quad (3.62)$$

$$L_{rr} = L_r + L_m \quad [H] \quad (3.63)$$

sendo L_s a indutância do estator e L_r a indutância do rotor. É usual transformar os valores das grandezas em S.I. dos Sistemas Eléctricos de Energia (SEE) em valores por unidade, tendo-se

adoptado a nomenclatura de considerar um traço por cima das diferentes variáveis para indicar que o valor da grandeza se encontra em p.u..

Os valores de base especificados são:

- Tensão de pico por fase no estator $v_{s_{base}}$ [V];
- Corrente de pico por fase no estator²¹ $i_{s_{base}}$ [A];
- Frequência eléctrica f_{base} [Hz],

enquanto que os valores de base determinados são:

- Frequência eléctrica angular de base $w_{base} = 2 \cdot \pi \cdot f_{base} \left[\frac{rad.}{s} \right]$;
- Velocidade de rotação do rotor de base²² $w_{mbase} = w_{base} \cdot \left(\frac{2}{p} \right) \left[\frac{rad.mec.}{s} \right]$
- Impedância de base $Z_{s_{base}} = \frac{v_{s_{base}}}{i_{s_{base}}} [\Omega]$
- Indutância de base $L_{s_{base}} = \frac{v_{s_{base}}}{(i_{s_{base}} \cdot w_{base})} [H]$
- Dispersão do Fluxo magnético de base $\lambda_{s_{base}} = L_{s_{base}} \cdot i_{s_{base}} = \frac{v_{s_{base}}}{w_{base}} [Wb \cdot rot]$
- Potência Aparente trifásica de base

$$S_{base} = 3 \cdot V_{RMS_{base}} \cdot I_{RMS_{base}} = 3 \cdot \frac{v_{s_{base}}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{i_{s_{base}}}{\sqrt{2}} = \frac{3}{2} \cdot v_{s_{base}} \cdot i_{s_{base}} [VA]$$

- Binário de base $T_{base} = \frac{S_{base}}{w_{mbase}} = \frac{\frac{3}{2} \cdot v_{s_{base}} \cdot i_{s_{base}}}{w_{base} \cdot \left(\frac{2}{p} \right)} [N.m]$

De forma a generalizar as equações do rotor em relação às equações do estator é comum a substituição da velocidade angular do rotor (w_r) pela sua relação com a velocidade de deslizamento ou escorregamento (s), $\bar{s} = \frac{(w_s - w_r)}{w_s} [p.u.]$, sendo de referir que w_s e w_r se

²¹ O valor da corrente de base pode ser determinado em função da definição da potência aparente da

máquina, ficando $i_{s_{base}} = \frac{S_{base}}{\left(\frac{3}{2} \cdot v_{s_{base}} \right)} [A]$.

²² p – representa o número de pólos da máquina assíncrona.

encontra em radianos por segundo [rad/s]. O modelo matemático, em p.u. que descreve o funcionamento do gerador de indução é descrito a seguir:

- Tensão no estator [p.u.]

$$\begin{cases} \bar{v}_{ds} = -\bar{R}_s \cdot \bar{i}_{ds} - \bar{w}_s \cdot \bar{\lambda}_{qs} + \frac{d}{dt}(\bar{\lambda}_{ds}) \\ \bar{v}_{qs} = -\bar{R}_s \cdot \bar{i}_{qs} + \bar{w}_s \cdot \bar{\lambda}_{ds} + \frac{d}{dt}(\bar{\lambda}_{qs}) \end{cases} \quad (3.64)$$

- Tensão do rotor [p.u.]

$$\begin{cases} \bar{v}_{dr} = -\bar{R}_r \cdot \bar{i}_{dr} - \bar{s} \cdot \bar{w}_s \cdot \bar{\lambda}_{qr} + \frac{d}{dt}(\bar{\lambda}_{ds}) = 0 \\ \bar{v}_{qr} = -\bar{R}_r \cdot \bar{i}_{qr} + \bar{s} \cdot \bar{w}_s \cdot \bar{\lambda}_{dr} + \frac{d}{dt}(\bar{\lambda}_{qr}) = 0 \end{cases} \quad (3.65)$$

- Dispersão do fluxo magnético no estator [p.u.]:

$$\begin{cases} \bar{\lambda}_{ds} = -\bar{L}_{ss} \cdot \bar{i}_{ds} + \bar{L}_m \cdot \bar{i}_{dr} \\ \bar{\lambda}_{qs} = -\bar{L}_{ss} \cdot \bar{i}_{qs} + \bar{L}_m \cdot \bar{i}_{qr} \end{cases} \quad (3.66)$$

- Dispersão do fluxo magnético do rotor [p.u.]:

$$\begin{cases} \bar{\lambda}_{ds} = -\bar{L}_{ss} \cdot \bar{i}_{ds} + \bar{L}_m \cdot \bar{i}_{dr} \\ \bar{\lambda}_{qs} = -\bar{L}_{ss} \cdot \bar{i}_{qs} + \bar{L}_m \cdot \bar{i}_{qr} \end{cases} \quad (3.67)$$

- Sendo L_{ss} a Auto-indutância dos enrolamentos do estator [p.u.]

$$\frac{L_{ss}}{L_{base}} = \frac{L_s}{L_{base}} + \frac{L_m}{L_{base}} \Rightarrow \bar{L}_{ss} = \bar{L}_s + \bar{L}_m \quad (3.68)$$

- Lrr a Auto-indutância dos enrolamentos no rotor [p.u.]²³

$$\frac{L_{rr}}{L_{base}} = \frac{L_r}{L_{base}} + \frac{L_m}{L_{base}} \Rightarrow \bar{L}_{rr} = \bar{L}_r + \bar{L}_m \quad (3.69)$$

Uma das técnicas de modelação das máquinas eléctricas utilizada em estudos de análise dinâmica consiste na redução das equações, desprezando as taxas de variação do fluxo magnético no estator,

$$\frac{d\lambda_{ds}}{dt} = 0 \quad (3.70)$$

$$\frac{d\lambda_{qs}}{dt} = 0 \quad (3.71)$$

representado a relação entre a corrente do estator e a tensão por intermédio de uma força-electromotriz (f.e.m) transitória por de trás de uma reactância transitória [83]. Outro aspecto característico nos SEE e nas máquinas eléctricas é a representação das equações da máquina em função da reactância (X) em detrimento da Indutância (L), como se apresenta²⁴ a seguir:

$$\begin{cases} \bar{v}_{ds} = -\bar{R}_s \cdot \bar{i}_{ds} + \bar{X}' \cdot \bar{i}_{qs} + \bar{e}_d \\ \bar{v}_{qs} = -\bar{R}_s \cdot \bar{i}_{qs} - \bar{X}' \cdot \bar{i}_{ds} + \bar{e}_q \end{cases} \quad (3.72)$$

onde $\bar{e}_d$ e $\bar{e}_q$ correspondem às grandezas da f.e.m transitória [p.u.] decompostas sobre os eixos d e q e definidas como,

$$\bar{e}_d = -\frac{\bar{w}_s \cdot \bar{L}_m}{\bar{L}_{rr}} \cdot \bar{\lambda}_{qr} \quad (3.73)$$

²³ Não aplicável em máquinas assíncronas de rotor em curto-circuito porque devido à construção do rotor da máquina não existem enrolamentos.

²⁴ As equações da máquina descritas a partir deste ponto são referidas apenas para a máquina assíncrona de rotor em curto-circuito, eliminado as tensões e correntes no rotor.

$$\bar{e}_q = -\frac{\bar{w}_s \cdot \bar{L}_m}{\bar{L}_{rr}} \cdot \bar{\lambda}_{dr} \quad (3.74)$$

e $\bar{X}'$ a reactância transitória definida como

$$\bar{X}' = \bar{w}_s \cdot \left(\bar{L}_{ss} - \frac{\bar{L}_m^2}{\bar{L}_{rr}} \right) = \bar{X}_s + \left(\frac{\bar{X}_r \cdot \bar{X}_m}{\bar{X}_r + \bar{X}_m} \right) \quad (3.75)$$

onde $\bar{X}_s$ e $\bar{X}_r$ representam a reactância dos enrolamentos do estator e do rotor e $\bar{X}_m$ a reactância de magnetização [p.u.]. As equações diferenciais que relacionam o comportamento das tensões e correntes da máquina de indução podem deste modo ser descritas como

$$\begin{cases} \frac{d\bar{e}_d}{dt} = -\frac{1}{\bar{T}_0} \left[\bar{e}_d - (\bar{X} - \bar{X}') \cdot \bar{i}_{qs} \right] + \bar{s} \cdot \bar{w}_s \cdot \bar{e}_q \\ \frac{d\bar{e}_q}{dt} = -\frac{1}{\bar{T}_0} \left[\bar{e}_q - (\bar{X} - \bar{X}') \cdot \bar{i}_{ds} \right] + \bar{s} \cdot \bar{w}_s \cdot \bar{e}_d \end{cases} \quad (3.76)$$

onde $\bar{X}$ representa o equivalente da reactância em circuito aberto [p.u.] e $\bar{T}_0$ uma constante de tempo transitória em circuito aberto expressa em [rad] definidas como,

$$\bar{X} = \bar{w}_s \cdot \bar{L}_{ss} = \bar{X}_s + \bar{X}_m \quad (3.77)$$

$$\bar{T}_0 = \frac{\bar{L}_{rr}}{\bar{R}_r} = \frac{\bar{L}_r + \bar{L}_m}{\bar{R}_r} \quad (3.78)$$

3.2.4.1.2 Dinâmica Rotacional

Porém para se compreender o fenómeno associado à interacção dinâmica rotacional da máquina eléctrica assíncrona com o motor hidráulico é necessário considerar adicionalmente a equação do movimento,

$$J \cdot \frac{dw_r}{dt} = T_a = T_m - T_e \quad (3.79)$$

onde J representa o somatório dos momentos de inércia do motor hidráulico e da máquina assíncrona [kg.m²], w_r a velocidade de rotação do rotor [mec. rad/s], T_a o binário acelerador [N.m] determinado pela diferença entre o binário mecânico do motor hidráulico T_m [N.m] e o binário electromagnético T_e [N.m] actuantes no rotor da máquina eléctrica. Definiu-se nesta dissertação que quando T_e apresenta valores positivos a máquina assíncrona encontra-se a funcionar como gerador fornecendo energia eléctrica à rede, quando o seu valor é negativo se encontra a funcionar como motor e por conseguinte a absorver energia eléctrica. De referir que o momento de inércia apresentado pelos motores hidráulicos é muito inferior ao momento de inércia apresentado por uma máquina assíncrona, considerando que as potências nominais são iguais. A título de exemplo um motor hidráulico de pistões axiais de potência nominal igual a 170kW apresenta um momento de inércia de cerca de 0,015 kg.m² [82], enquanto que uma máquina assíncrona para a mesma potência, se situa na ordem dos 1,8 kg.m². Conforme se descreve nas equações anteriores a equação do movimento pode também ser escrita em valores por unidade, em termos da constante de inércia²⁵ (H), de acordo com

$$H = \frac{1}{2} \cdot \frac{J \cdot w_{m_{base}}^2}{S_{base}} \quad [p.u.] \quad (3.80)$$

onde a variável $w_{m_{base}}$ representa a velocidade de base do rotor, que por sua vez é igual à velocidade nominal da máquina [mec. rad/s]. Substituindo na equação do movimento e rearranjando os seus termos, tem-se,

$$\frac{d\bar{w}_r}{dt} = \frac{1}{2 \cdot H} \cdot (\bar{T}_m - \bar{T}_e) \quad (3.81)$$

Em alguns casos, devido a problemas de estabilidade é útil considerar um factor de amortecimento D ficando a equação final do movimento em valores por unidade descrita por [83]:

$$\frac{d\bar{w}_r}{dt} = \frac{1}{2 \cdot H} \cdot (\bar{T}_m - \bar{T}_e - (D \cdot \bar{w}_r)) \quad (3.82)$$

O binário electromagnético para estas equações é determinado pelo somatório do produto da f.e.m pela corrente nos eixos directo e em quadratura referido ao estator,

²⁵ Constante de Inércia – Quociente da energia armazenada à velocidade nominal [MW.s] pelo valor da potência nominal [MVA].

$$\overline{T}_e = \overline{e}_d \cdot \overline{i}_{ds} - \overline{e}_q \cdot \overline{i}_{qs} \quad (3.83)$$

enquanto que a potência activa e reactiva são representadas como se segue,

$$\begin{cases} \overline{P}_S = \overline{v}_{ds} \cdot \overline{i}_{ds} - \overline{v}_{qs} \cdot \overline{i}_{qs} \\ \overline{Q}_S = \overline{v}_{qs} \cdot \overline{i}_{ds} - \overline{v}_{ds} \cdot \overline{i}_{qs} \end{cases} \quad (3.84)$$

3.3 Rede Eléctrica

As redes de energia eléctrica são projectadas e operadas de forma a garantir uma elevado padrão de qualidade de serviço, desde a ligação do produtor até ao consumidor por meio de redes de transporte e distribuição. Em parte, a qualidade de serviço referida, deve-se às grandes centrais de produção de energia eléctrica, como as hidroeléctricas, termoeléctricas e nucleares. Estas dispõem de meios de controlo da tensão por variação da potência reactiva e da frequência através de meios de controlo da potência activa, dentro de uma banda tolerável. Com a forte integração da produção de energia através de fontes de energia renovável, ao nível das redes de distribuição, surgiram algumas dificuldades na exploração das redes. Alguns destes problemas resultam de:

- Sistemas de produção de energia eléctrica instalados não possuem capacidade de controlo da potência reactiva, não contribuindo para o controlo da tensão;
- Produção de potência activa com elevada variabilidade devido às características do recurso renovável, o que pode implicar variações de tensão ou em casos de rede isolada variações de frequência;
- No caso de falhas da rede, pode ser necessário que alguns destes sistemas tenham que se desligar, o que pode implicar uma significativa perda de produção e por conseguinte uma perda de equilíbrio entre a produção e o consumo;
- Pode ocorrer uma alteração do sentido do trânsito de potência nas redes de distribuição, dificultando o controlo da tensão em sistemas com auto-regulação automática em carga do tipo “compound”.

Ao se considerar que a integração deste tipo de aproveitamento de energia, no futuro, pode ocorrer em zonas com limitações ao nível da rede eléctrica, abre um novo caminho na investigação de soluções para permitir a integração destas fontes e dos correspondentes sistemas de conversão de energia.

As redes eléctricas são o resultado da interligação de um conjunto de componentes que constituem o sistema eléctrico de energia. Dos diversos componentes, apenas são considerados, para a modelação da rede, os ramos (linhas aéreas, cabos submarinos, transformadores) e as cargas eléctricas, desprezando-se a aparelhagem de corte e protecção. A modelação dos componentes é efectuada através de circuitos equivalentes de parâmetros constantes, em termos de indutâncias, capacidades e resistências como a seguir se descreve.

3.3.1.1.1 Transformadores

Neste trabalho, adoptou-se uma modelização simplificada para os transformadores. Assim, estes são modelados como impedâncias equivalentes, incluindo apenas a reactância de fugas, fornecida como uma percentagem em relação entre a potência aparente nominal e a tensão nominal.

3.3.1.1.2 Condutores Eléctricos

O transporte de energia eléctrica é realizado por condutores de alumínio ou de cobre instalados ao ar (suspensos) ou enterrados. Aos condutores instalados ao ar designa-se de linhas eléctricas e aos enterrados por cabos subterrâneos ou submarinos dependendo se o troço do cabo se encontra em mar ou em terra. Os condutores submarinos trifásicos ou monopulares são geralmente isolados recorrendo a material adequado e envolvidos por uma bainha metálica (chumbo ou alumínio), ligada à terra, com funções de protecções contra a humidade e choques mecânicos. Para níveis de tensão superior a 10kV usam-se cabos monopulares. Devido à proximidade dos cabos subterrâneos, entre eles em relação à bainha, estes apresentam uma capacitância ou capacidade electrostática superior às linhas aéreas, na ordem de 0,15 μ F e 0,6 μ F/km para cabos monopulares de média tensão [85].

As linhas aéreas, como os cabos submarinos são modelados em regime estacionário em função do esquema equivalente em π .

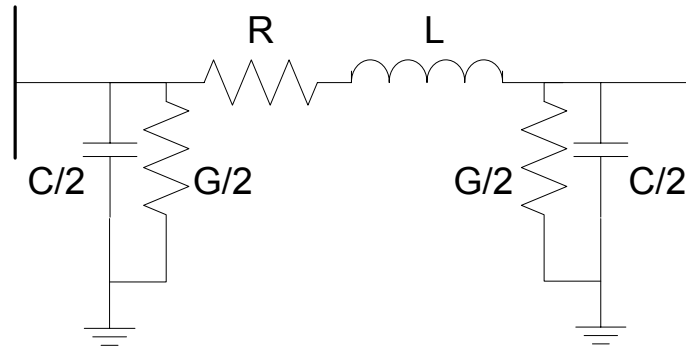


Figura 3.17 – Esquema equivalente de uma linha monofásica com parâmetros distribuídos em π .

Os parâmetros que caracterizam as linhas e os cabos são: a resistência (R [Ω/km]), a indutância (L [H/km]), a capacitância (C [F/km]) e a condutância ou perditância (G [S/km]). Para a condutância transversal ou perditância (G), não existe uma fórmula utilizável na prática. Esta condutância é devida à corrente de fuga entre os condutores e a terra, a qual flui essencialmente nas linhas aéreas pela superfície das cadeias de isoladores. Depende fortemente das condições atmosféricas, em particular da humidade, da poluição e da sujidade em geral, sendo geralmente desprezada em condições normais de operação, devido ao reduzido valor e por não existir um processo robusto de caracterização física do fenómeno [85]. A aplicação do esquema equivalente π nominal, depende do comprimento das linhas, isto é, para linhas curtas ($l < 80\text{km}$) pode-se desprezar a admitância transversal, podendo a linha ser modelada unicamente pela sua impedância longitudinal, o mesmo não poderá ser aplicado para linhas médias ($80\text{km} < l < 240\text{km}$) e longas ($l > 240\text{km}$).

3.3.1.1.3 Cargas Eléctricas

As cargas eléctricas existentes num sistema eléctrico de energia caracterizam-se por absorver energia eléctrica da rede, existindo diferentes tipos, desde os motores eléctricos, a iluminação, sistemas de aquecimento e refrigeração, aparelhos electrónicos, etc. A carga considerada na rede eléctrica pode ser modelada em estudos de comportamento dinâmico por admitância constante $Y = G + j \cdot B$ ligada a um nó (barramento) com tensão V , calculando-se a potência absorvida de acordo com as grandezas fasoriais que se seguem,

$$S_C = P_C + j \cdot Q_C = \underline{V} \cdot \underline{I}_C^* = \underline{V}^2 \cdot \underline{Y}_C^* \quad (3.85)$$

onde a potência activa (P_C) e potência reactiva (Q_C) da carga são especificadas para o valor nominal da tensão ($V=1$ p.u.) sendo a admitância equivalente obtida em p.u. por,

$$\bar{Y}_C = \frac{\bar{S}_C^*}{V^2} = \bar{P}_C - j \cdot \bar{Q}_C \quad (3.86)$$

no qual resulta, que o valor da admitância é igual ao conjugado da potência absorvida da carga eléctrica.

3.4 Parques de Ondas

Para a realização do estudo do parque de ondas foram considerados três conversores de energia das ondas para produzir electricidade ligados sobre diferentes topologias desfasados no tempo face à onda incidente. Não se consideraram os efeitos de radiação entre os conversores, assumindo-se que se encontram a uma distância superior ao comprimento de onda para o qual se obtém o limite de extracção de energia das ondas. Considerou-se ainda que a rede eléctrica “*offshore*” formada por cabos submarinos que estabelecem as ligações dos conversores à rede eléctrica por intermédio de uma linha aérea “*onshore*” se encontram à mesma secção, estando por conseguinte sobredimensionada de forma a assegurar a configuração da rede qualquer que fosse a topologia adoptada.

3.4.1.1 Topologia das Redes Eléctricas

O estudo de operação dos parques dos sistemas de conversão de energia das ondas em energia eléctrica, recaiu sobre três tipos de topologia:

- Ligação do conversor de energia das ondas a uma rede com uma potência de curto-circuito muito superior à nominal (rede quase infinita);

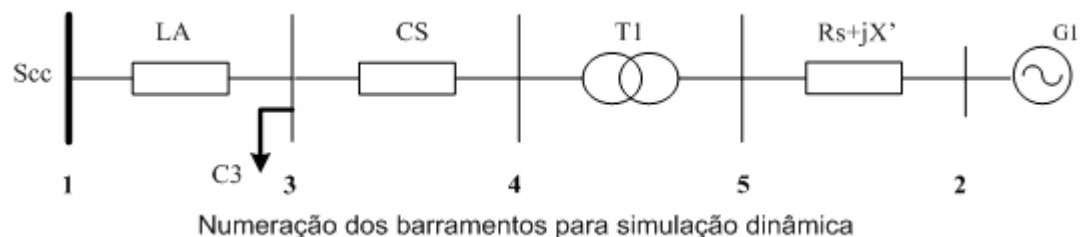


Figura 3.18 – Esquema da rede eléctrica para um conversor.

- Ligação em série de três conversores de energia das ondas a uma rede com uma potência de curto-circuito muito superior à nominal (rede quase infinita);

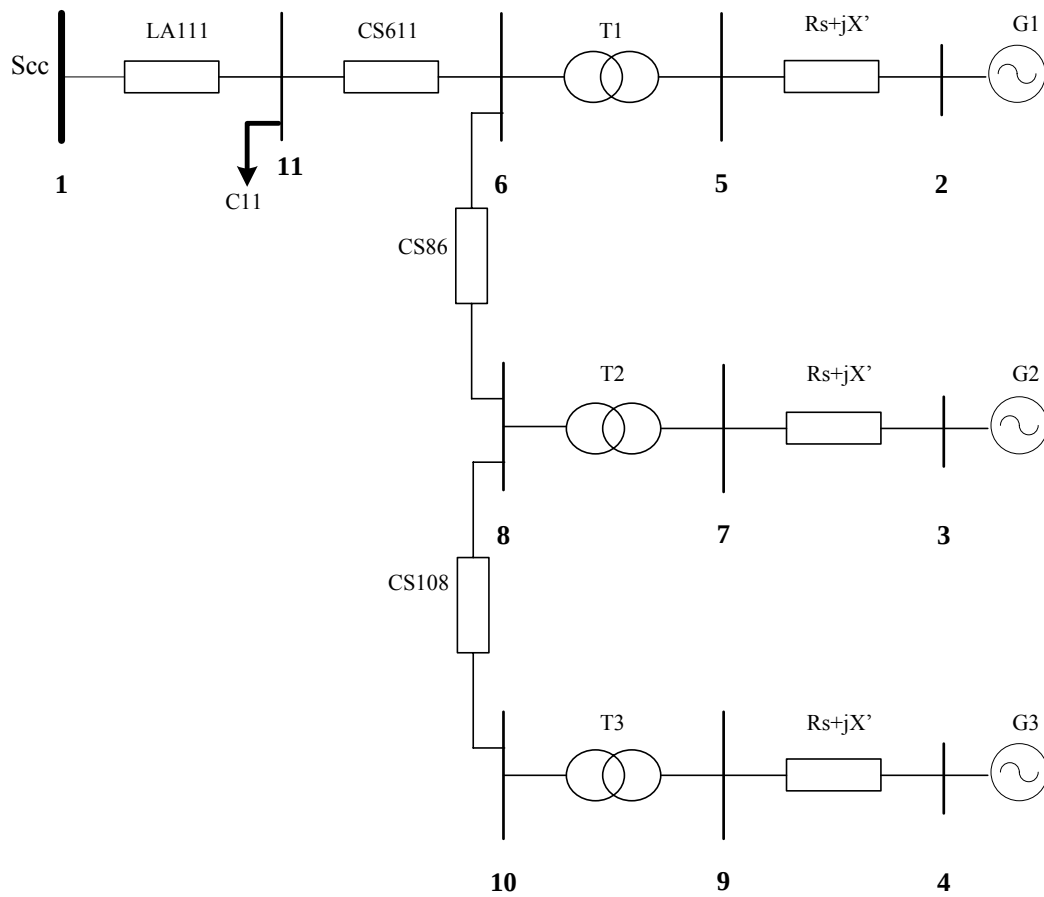


Figura 3.19 – Esquema da rede eléctrica para três conversores ligados em série.

- Ligação em paralelo de três conversores de energia das ondas a uma rede com uma potência de curto-circuito muito superior à nominal (rede quase infinita);

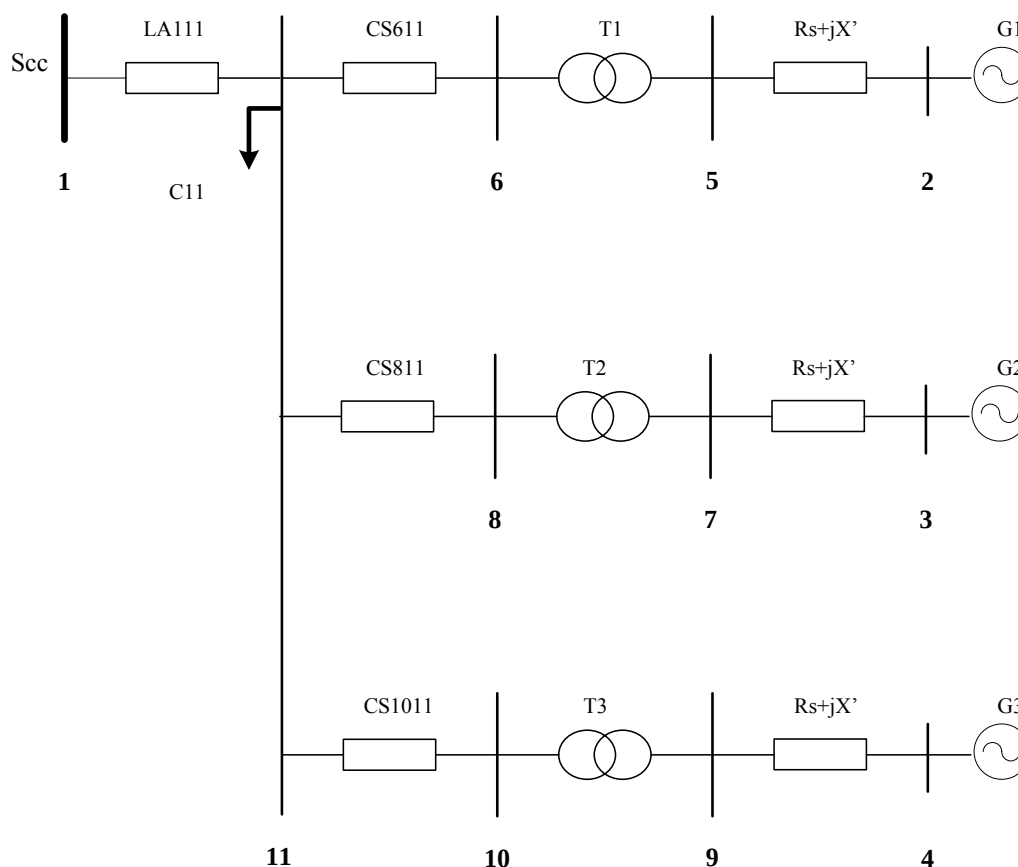


Figura 3.20 – Esquema da rede eléctrica para três conversores ligados em paralelo.

Os parâmetros das redes apresentadas são:

- G – Gerador Assíncrono;
- LA – Linha Aérea;
- CS – Cabo Submarino;
- T – Transformador;
- R_s – Resistência do Estator;
- X' – Reactância sub-transitória;
- S_{cc} – Potência de curto-circuito.

A potência de curto-circuito representa o equivalente da rede eléctrica vista para jusante do ponto de recepção da energia eléctrica produzida pelo conversor, ou do conjunto de conversores. Sendo a capacidade do SEE controlar a tensão eléctrica num ponto (barramento) da rede eléctrica.

Esta é por sua vez definida do ponto de vista matemático e em p.u. como o inverso da impedância equivalente da rede eléctrica que se encontra a jusante do ponto de recepção.

$$S_{CC} = \frac{1}{Z_{eq.}} [p.u.] \quad (3.87)$$

3.4.1.2 Redução de Kron

A representação da rede eléctrica em estudos de análise de redes passa pela formulação matricial que representa a lei dos nós de Kirchoff recorrendo-se a uma matriz das admitâncias nodais (Y_N). A formulação matricial adoptada relaciona as tensões nodais (V_N) e as correntes injectadas (I_N) em todos os nós ou barramentos.

$$I_N = Y_N \cdot V_N \quad (3.88)$$

Tal como em estudos de trânsito de potências a rede é modelada por equações algébricas, no entanto a matriz das admitâncias nodais deve ser alterada de forma a que sejam consideradas as reactâncias transitórias dos geradores por via da criação de nós ou barramentos fictícios entre os geradores e os barramentos da rede eléctrica. A adição de barramentos aos já existentes, aumenta a complexidade e dimensão do sistema, tornando-se importante na análise do SEE a redução da dimensão do problema para diminuir o esforço computacional. Utilizando a redução de Kron é possível reduzir a dimensão da matriz de forma a estabelecer as relações apenas com os nós onde ocorrem injeção de corrente diferente de zero. Sejam as equações nodais do sistema completo com N barramentos e M geradores representadas por grandezas fasoriais²⁶ em valores por unidade obtidas por

$$\begin{bmatrix} \underline{\bar{I}} \\ [0] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\bar{Y}}_{MM} \\ \underline{\bar{Y}}_{NM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\bar{V}}_{MN} \\ \underline{\bar{V}}_{NN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{\bar{E}} \\ \underline{\bar{V}} \end{bmatrix} \quad (3.89)$$

onde $[I]$ é o vector das correntes injectadas nos barramentos de geração, $[E]$ o vector das forças electromotrizs no barramento de potência infinita e nos barramentos internos (fictícios) dos geradores, $[V]$ os vectores das tensões nos barramentos que constituem a rede e $[Y]$ a matriz de

²⁶ As grandezas fasoriais nesta dissertação são representadas por um traço por debaixo da grandeza respectiva.

admitâncias nodais completa. De referir que as correntes injectadas nos barramentos de carga são consideradas nulas por se considerar que as cargas são modeladas por admitâncias constantes, que assim podem ser incluídas na matriz admitância nodal através da adição da admitância da carga ao elemento da matriz admitância de ordem correspondente ao nó onde a carga se liga. Desenvolvendo as equações nodais obtêm-se

$$\begin{bmatrix} \bar{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{MM} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{E} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{Y}_{MN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V} \end{bmatrix} \quad (3.90)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{NM} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{E} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{Y}_{NN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V} \end{bmatrix} \quad (3.91)$$

Substituindo na equação (3.90) por em ordem ao vector tensão

$$\begin{bmatrix} \bar{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{MM} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{E} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{Y}_{MN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{Y}_{NM} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{E} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{Y}_{NN} \end{bmatrix}^{-1} \quad (3.92)$$

Rearranjando a equação,

$$\begin{bmatrix} \bar{I} \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} \bar{Y}_{MM} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{Y}_{MN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{Y}_{NM} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{Y}_{NN} \end{bmatrix}^{-1} \right) \cdot \begin{bmatrix} \bar{E} \end{bmatrix} \quad (3.93)$$

Obtêm-se a matriz reduzida,

$$\begin{bmatrix} \bar{Y}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{MM} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{Y}_{MN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{Y}_{NM} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{Y}_{NN} \end{bmatrix}^{-1} \quad (3.94)$$

Demonstra-se, deste modo, que a matriz pode ser reduzida recorrendo à utilização de operações numéricas, para eliminar todos os barramentos da rede à excepção dos nós internos dos geradores. Sempre que é realizada uma modificação da topologia da rede, por exemplo devido à ocorrência de um curto-circuito ou à operação de disjuntores, a matriz $[Y_R]$ tem de ser alterada.

A integração da máquina eléctrica assíncrona com a rede eléctrica, como se apresenta no esquema da Figura 3.21 é o resultado da aplicação do vector das forças electromotrizas resultante das equações diferenciais (3.76) na equação nodal matricial (3.93)

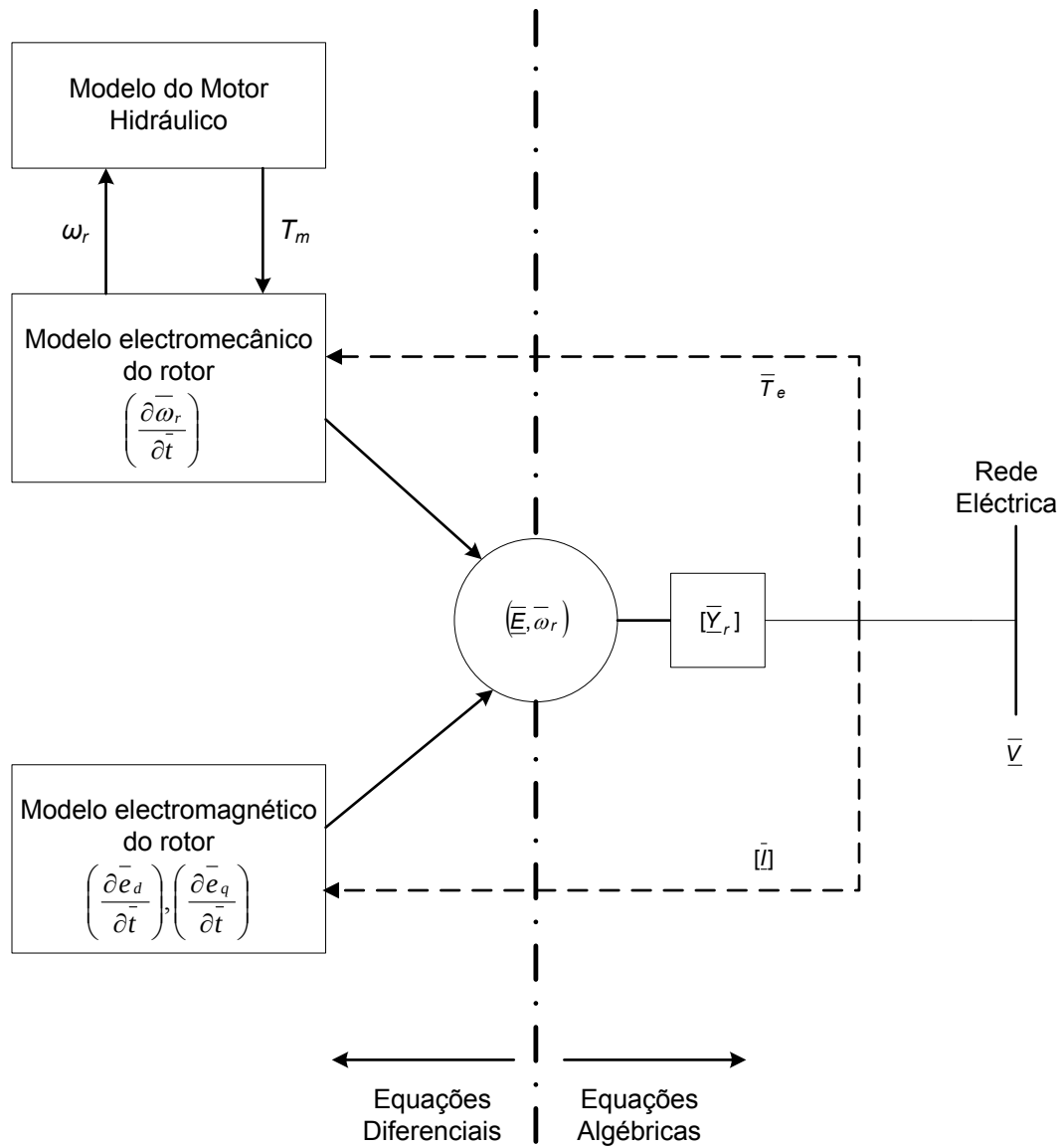


Figura 3.21 - Modelo funcional do gerador assíncrono em regime transitório.

Capítulo 4 - Plataforma de Simulação

4.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se a plataforma de simulação utilizada para transpor os modelos matemáticos do dispositivo de conversão de energia das ondas em energia eléctrica, para o ambiente de simulação Matlab Simulink.

4.2 Modelos Matemáticos em Matlab Simulink

O Matlab Simulink, produzido pela Mathworks. Inc., é um programa destinado à simulação de sistemas dinâmicos no qual a sua interface com o utilizador é totalmente gráfica, a partir da interconexão de blocos. Cada bloco é representado por um conjunto de variáveis de entrada e saída que se relacionam com as funções e comandos que permitem reproduzir a formulação matemática descrita no “Capítulo 3 – Modelos Matemáticos”. A interligação entre blocos é conseguida por ligação da variável de saída de um dos blocos com a variável de entrada correspondente de outro bloco. A ferramenta computacional Matlab Simulink da Mathworks tem deste modo a vantagem de permitir de forma simples efectuar alterações como se apresenta de seguida.

4.2.1 Conversor de Energia das Ondas

A plataforma de simulação implementada na Figura 4.1, em ambiente Matlab Simulink do conversor de energia das ondas é apresentada segundo o diagrama de blocos anteriormente apresentado na secção 3.2. No qual se observa os blocos da Onda, Flutuador, Sistema Hidráulico, Máquina Assíncrona e Rede Eléctrica respectivamente ordenados da esquerda para a direita.

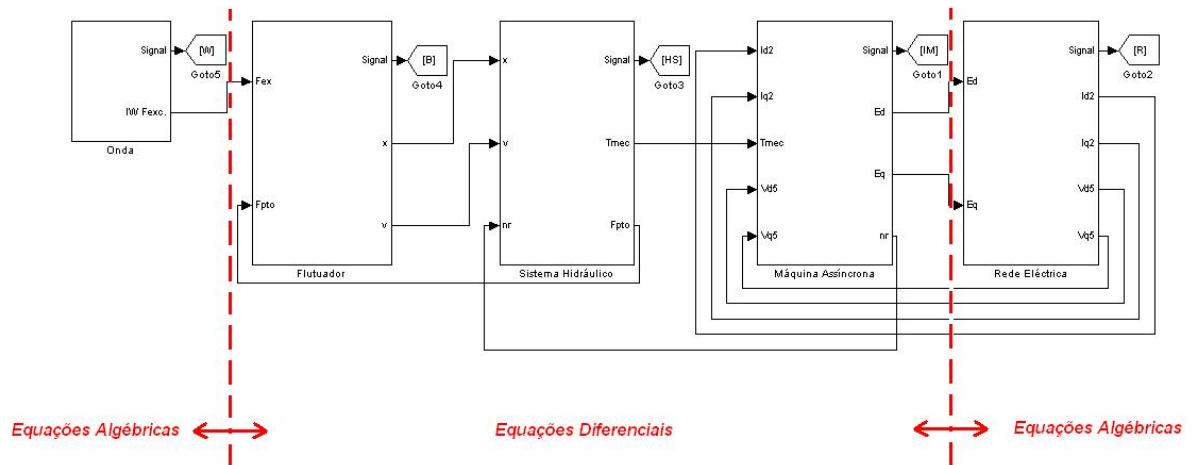


Figura 4.1 – Diagrama de blocos da plataforma de simulação implementada.

4.2.1.1 Bloco Modelo da Onda

O bloco modelo da onda permite caracterizar e simular diferentes estados de mar. Para tal necessita que a variável de saída (força de excitação ou difracção) seja determinada em separado segundo equações algébricas, descritas na secção 3.2.1, em função da utilização do espectro de ondas seleccionado.

Por especificação dos seguintes parâmetros:

- H_s - Altura significativa [m];
- T_e - Período de energia [s];
- t - Tempo de simulação [s];
- Intervalo de frequências $[w_{min}:w_{max}]$ [rad/s];
- Número de intervalos entre frequências;
- Coeficientes Hidrodinâmicos da função de transferência da Força de Excitação, como se apresenta Figura 4.2.

O correspondente bloco em Matlab Simulink apresenta uma caixa de diálogo, descrita na figura 4.2.

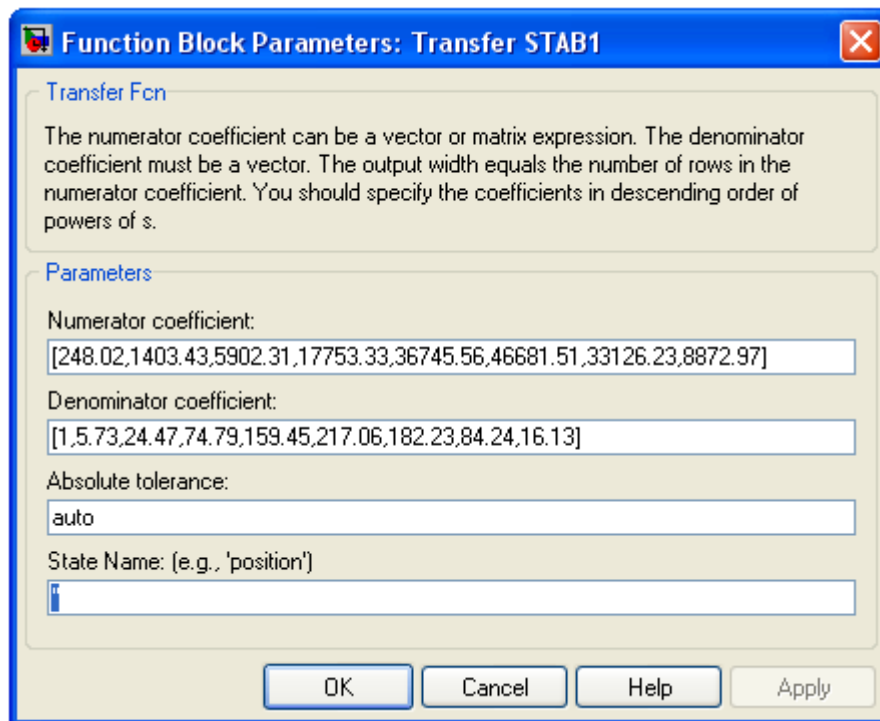


Figura 4.2 – Parâmetros da função bloco modelo da onda.

Modelo Matemático implementado em Matlab Simulink está descrito na figura 4.3:

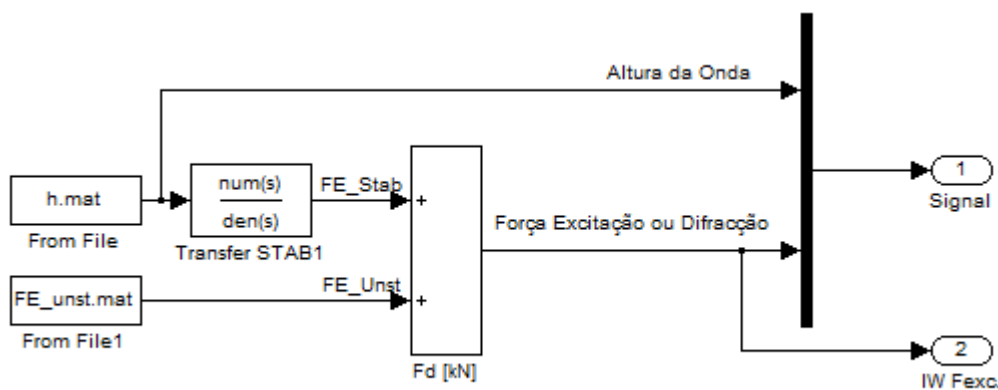


Figura 4.3 - Esquema do modelo matemático implementado para o bloco modelo da onda.

4.2.1.2 Bloco Modelo do Flutuador

O bloco modelo do flutuador reúne todas as forças consideradas, nos diferentes sub-blocos, que descrevem a dinâmica do flutuador (Secção 3.2.2) segundo as leis de Newton.

As variáveis de entrada são:

- F_{exc} - Força de Excitação ou difracção [kN];
- F_{rad} - Força do sistema de extracção (PTO) [kN].

Do resultado da integração do somatório das forças (3.10) são obtidas as variáveis de saída:

- v – Velocidade de deslocamento do corpo do flutuador [m/s];
- x – Deslocamento do corpo do flutuador por integração da velocidade [m].

Para que se obtenha a resposta do flutuador é preciso caracterizá-lo, sendo para tal necessário conhecer a Massa do flutuador e os Coeficientes Hidrodinâmicos (Massa Adicional, Amortecimento de radiação ou Hidrodinâmico e Restituição da Rigidez Hidrostática). A massa adicional e o amortecimento de radiação, como descrito (secção 3.2.2.2) são fornecidos por ferramentas computacionais e entram no Matlab Simulink sob a forma de parâmetros constantes por intermédio de funções de transferência (3.25) e (3.30), enquanto que a restituição da rigidez hidrostática é o resultado do produto da área do plano de água, da massa volúmica e da aceleração da gravidade (3.15).

Os parâmetros constantes que caracterizam este modelo são:

- m - Massa do corpo do flutuador [ton];
- M - Massa adicional [ton];
- ρ_o - Massa volúmica [kg/m³];
- g - Aceleração da gravidade [m/s²];
- rb - Raio da bóia [m];
- Coeficientes da função de transferência.

As caixas de diálogo destes modelos estão descritas nas Figura 4.4 e Figura 4.5.

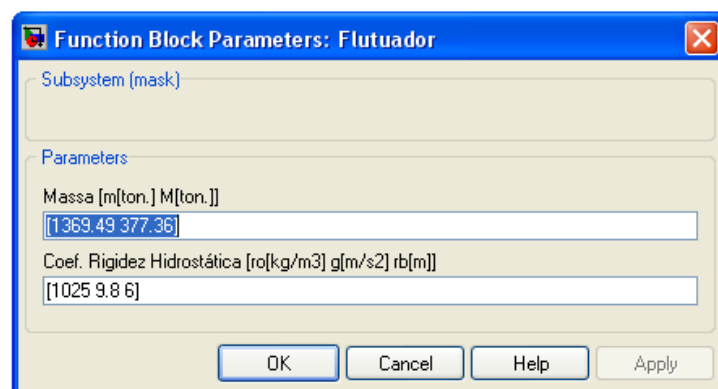


Figura 4.4 – Parâmetros do bloco modelo do flutuador.

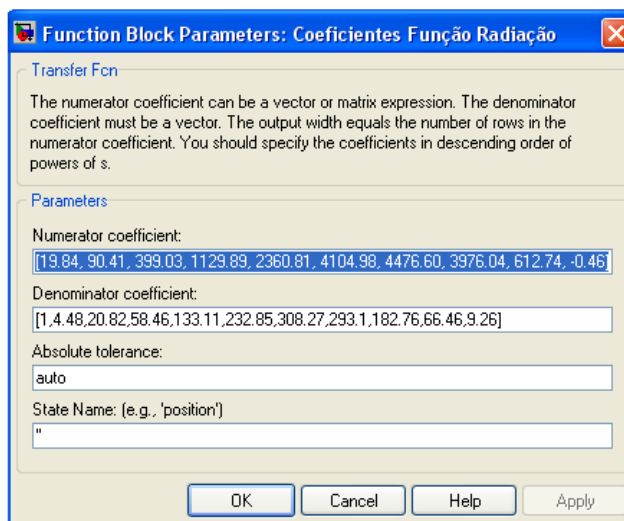


Figura 4.5 – Coeficientes da função de transferência da radiação.

Modelo Matemático implementado em Matlab Simulink está descrito na figura 4.6:

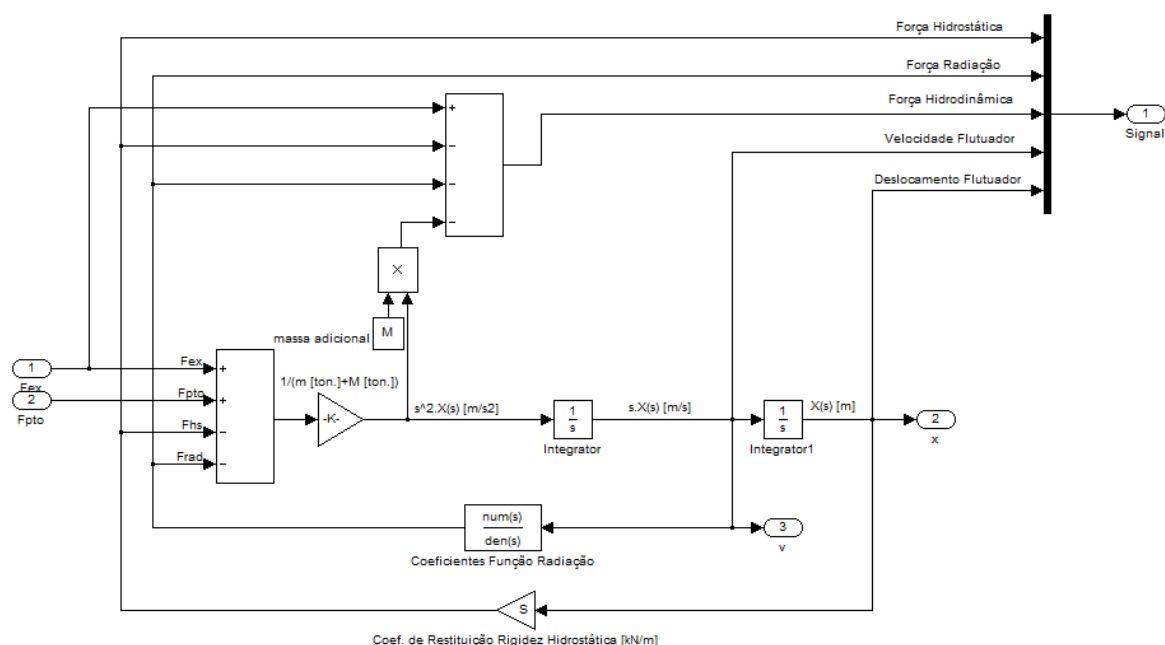


Figura 4.6 – Esquema do modelo matemático implementado para o flutuador.

4.2.1.3 Bloco Modelo do Sistema Hidráulico

O bloco modelo do sistema Hidráulico agrega todos os sub-blocos dos equipamentos hidráulicos anteriormente descritos (Cilindro, Válvulas, Sistema de Paragem, Acumulador e Motor).

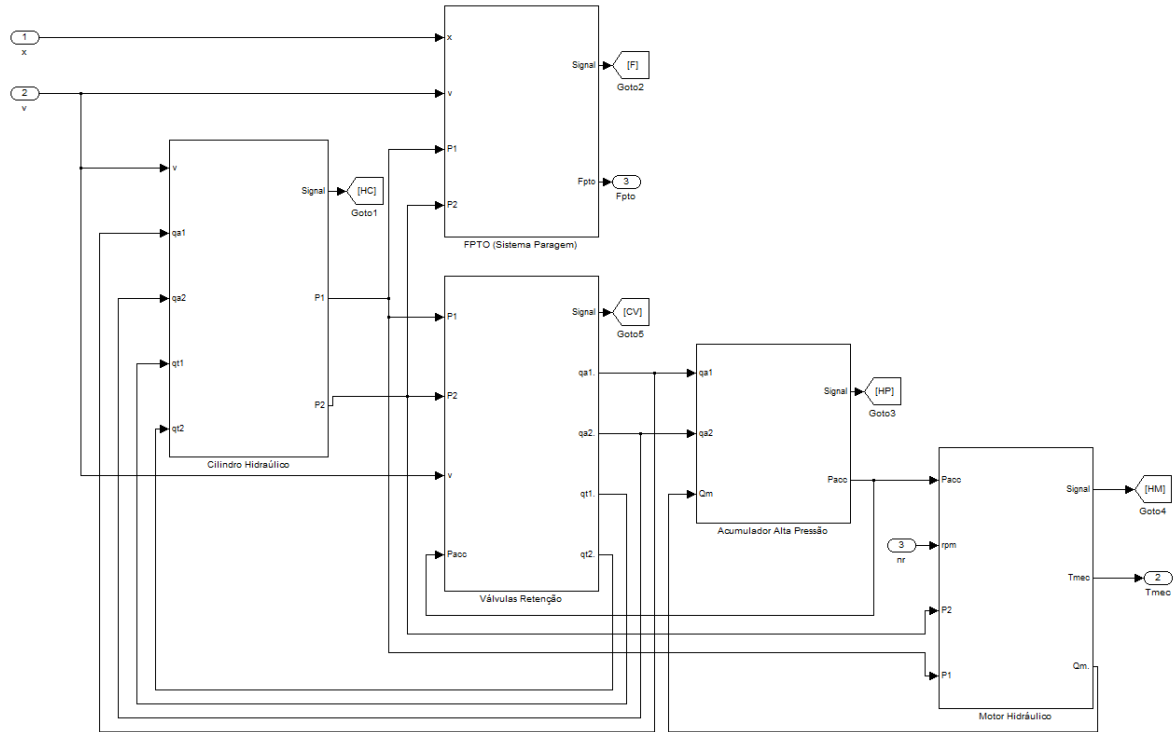


Figura 4.7 – Esquema do modelo matemático implementado para o bloco do sistema hidráulico.

As variáveis de entrada são:

- x – Deslocamento do corpo do flutuador por integração da velocidade [m];
- v – Velocidade de deslocamento do corpo do flutuador [m/s];
- n_r – Velocidade de rotação no veio do grupo motor-gerador eléctrico [rpm].

Em particular a velocidade (v) ganha particular relevância na identificação do comportamento do sistema hidráulico, por se tratar de uma variável implícita na determinação das pressões e caudais que regem o comportamento dos diversos equipamentos hidráulicos.

As variáveis de saída são:

- F_{pto} – Deslocamento do corpo do flutuador por integração da velocidade [kN];
- T_{mec} – Binário mecânico fornecido pelo motor hidráulico ao gerador eléctrico [N.m].

Este último tem a vantagem de se poder alterar a cilindrada do motor afectando a resposta do gerador eléctrico em função da dinâmica rotacional e, desta forma estabelecer uma forma de controlo da potência activa gerada e por conseguinte da frequência.

Os parâmetros constantes que é necessário especificar são apresentados na Figura 4.8 e descritos individualmente pelos seguintes blocos.

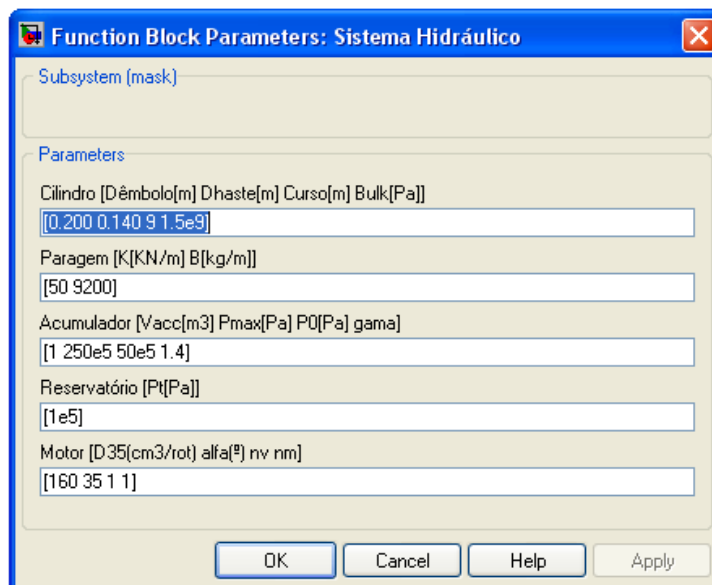


Figura 4.8 – Coeficientes do bloco do Sistema Hidráulico.

4.2.1.3.1 Bloco do Cilindro Hidráulico

Através do bloco do cilindro hidráulico é possível determinar as pressões (3.35) e (3.36) e volumes (3.32) e (3.33) nas câmaras dos cilindros, por integração das equações diferenciais, em função dos caudais de entrada e saída, respectivamente do reservatório para o cilindro e do cilindro para o acumulador. Neste bloco também é determinada a potência mecânica instantânea gerada pelo cilindro (3.47).

As variáveis de entrada são:

- v – Velocidade de deslocamento do corpo do flutuador [m/s];
- q_{a1} - Caudal deslocado da câmara 1 do cilindro para o acumulador [m³/s];
- q_{a2} - Caudal deslocado da câmara 2 do cilindro para o acumulador [m³/s];
- q_{t1} - Caudal que provém do reservatório para a câmara 1 do cilindro [m³/s];
- q_{t2} - Caudal que provém do reservatório para a câmara 2 do cilindro [m³/s].

As variáveis de saída são:

- P_1 – Pressão interna na câmara do cilindro 1 [Pa];
- P_2 – Pressão interna na câmara do cilindro 2 [Pa].

Os parâmetros constantes que caracterizam este modelo são:

- $D_{\text{êmbolo}}$ - Diâmetro do êmbolo [m];
- D_{haste} - Diâmetro da haste [m];
- Curso - Curso do cilindro [m];
- Bulk - Módulo de compressibilidade “Bulk Modulus” [Pa].

Do conhecimento do diâmetro do êmbolo e haste são determinados as secções transversais da câmara 1, equação (4.1) e da câmara 2, equação (4.2).

$$S_{c1} = \pi \times \left(\frac{D_{\text{êmbolo}}}{2} \right)^2 \quad (4.1)$$

$$S_{c2} = S_{c1} - \left(\pi \times \left(\frac{D_{\text{haste}}}{2} \right)^2 \right) \quad (4.2)$$

O Modelo Matemático implementado em Matlab Simulink está descrito na figura 4.9:

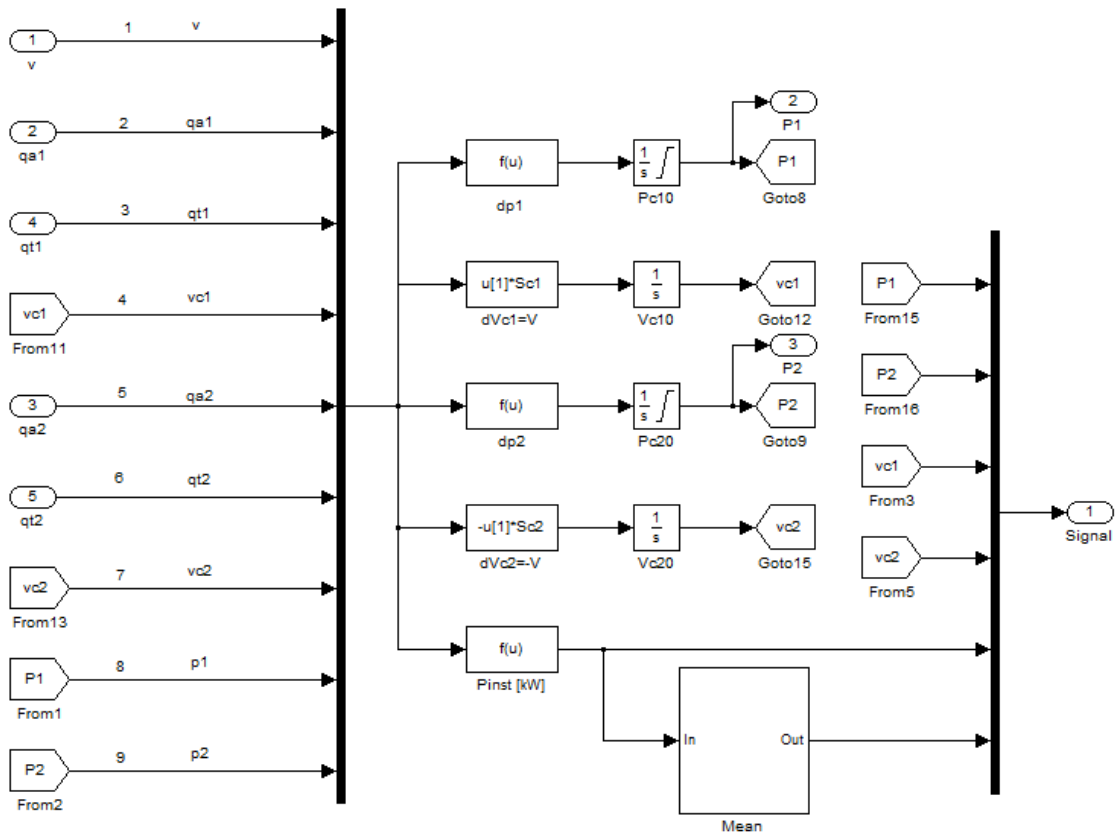


Figura 4.9 – Modelo matemático implementado em Matlab Simulink.

4.2.1.3.2 Bloco Modelo das Válvulas de Retenção

O bloco modelo das válvulas de retenção detém as condições lógicas das equações (3.38) à (3.41) associadas aos caudais de entrada e saída em função da pressão do acumulador. A pressão do reservatório considera-se como parâmetro constante.

As variáveis de entrada são:

- v – Velocidade de deslocamento do corpo do flutuador [m/s];
- P_{acc} – Pressão do acumulador [Pa];
- P_1 – Pressão interna na câmara do cilindro 1 [Pa];
- P_2 – Pressão interna na câmara do cilindro 2 [Pa].

As variáveis de saída são:

- q_{a1} - Caudal deslocado da câmara 1 do cilindro para o acumulador [m³/s];
- q_{a2} - Caudal deslocado da câmara 2 do cilindro para o acumulador [m³/s];
- q_{t1} - Caudal que provém do reservatório para a câmara 1 do cilindro [m³/s];
- q_{t2} - Caudal que provém do reservatório para a câmara 2 do cilindro [m³/s].

Os parâmetros constantes a especificar são:

- P_t – Pressão no Reservatório [Pa]
- S_{c1} – Secção transversal do êmbolo visto do lado da câmara 1 [m²];
- S_{c2} – Secção transversal do êmbolo visto do lado da câmara 2 [m²].

O Modelo Matemático implementado em Matlab Simulink está descrito na figura 4.10.

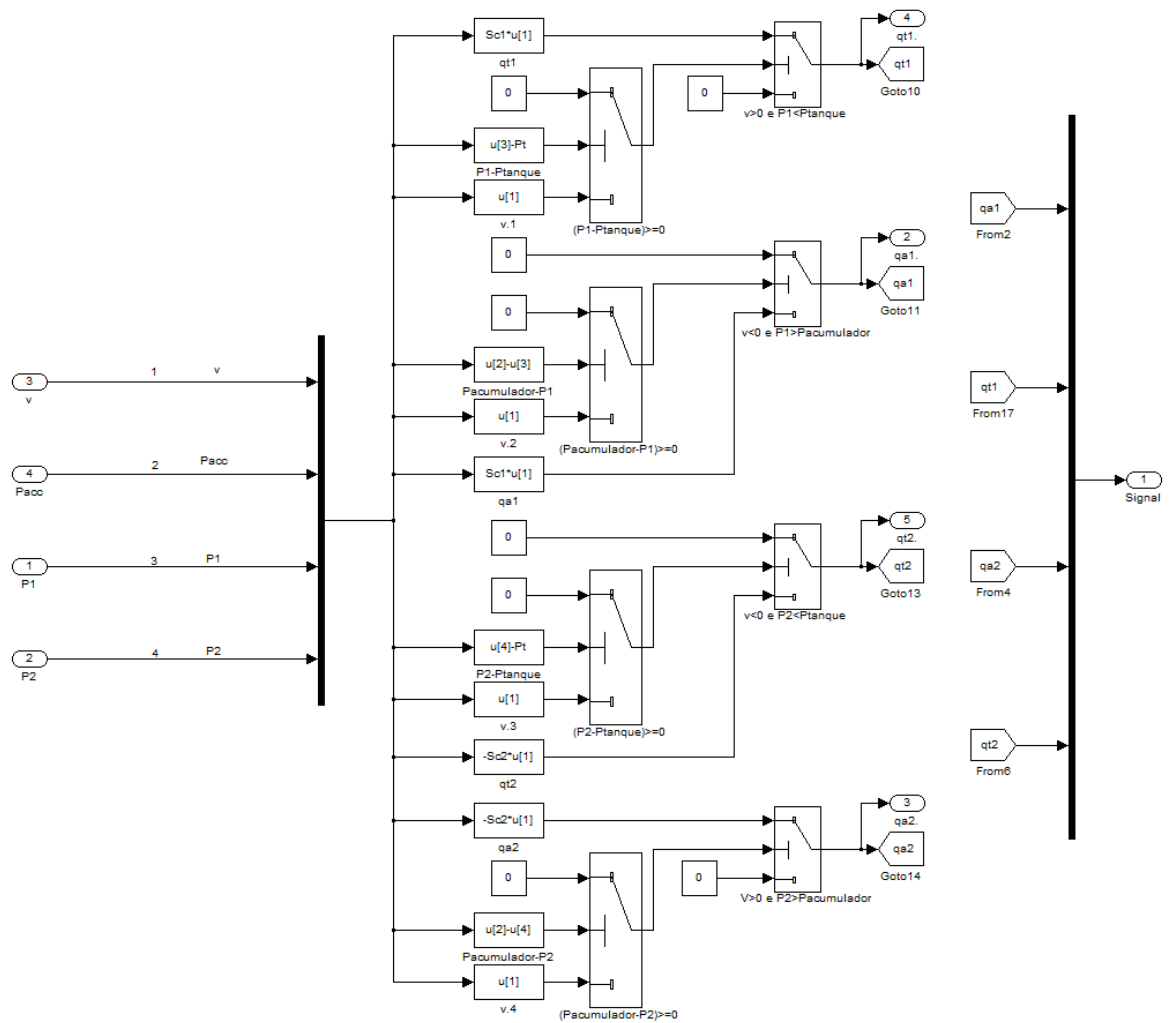


Figura 4.10 – Modelo matemático implementado para o bloco modelo de válvulas de retenção.

4.2.1.3.3 Bloco Modelo Sistema Paragem

Da mesma forma que o apresentado no bloco das válvulas de retenção o bloco modelo do sistema de paragem apresenta condições lógicas em função das equações (3.42) e (3.43). A velocidade é utilizada não só para determinar a força do PTO (3.44), como para aumentar o seu valor, para condições em que o deslocamento do cilindro (x) é superior aos limites do curso estabelecidos (x_{in} e x_{ip}). Tal é conseguido por adição da força da mola (F_s) e da força de amortecimento (F_D). Nestas condições pretende-se que a força do PTO seja superior à força hidrodinâmica total. O que se depreende que por oposição se a Força do PTO igualar ou for superior à Força Hidrodinâmica Total a velocidade relativa entre o corpo do flutuador e o cilindro hidráulico terá de ser nula.

As variáveis de entrada são:

- x – Deslocamento do corpo do flutuador por integração da velocidade [m];
- v – Velocidade de deslocamento do corpo do flutuador [m/s];
- P_1 – Pressão interna na câmara do cilindro 1 [Pa];
- P_2 – Pressão interna na câmara do cilindro 2 [Pa].

As variáveis de saída são:

- F_{PTO} – Deslocamento do corpo do flutuador por integração da velocidade [kN].

Os parâmetros constantes a especificar são:

- Curso – Deslocamento máximo admissível pelo cilindro Pressão no Reservatório [Pa];
- S_{c1} – Secção transversal do êmbolo visto do lado da câmara 1 [m²];
- S_{c2} – Secção transversal do êmbolo visto do lado da câmara 2 [m²];
- K - Rigidez da mola [kN/m];
- B - Amortecimento [kg/m].

Os limites do curso do cilindro no sentido negativo (x_{in}) e positivo (x_{ip}) são especificados como sendo metade do curso. O Modelo Matemático implementado em Matlab Simulink está descrito na figura 4.11.

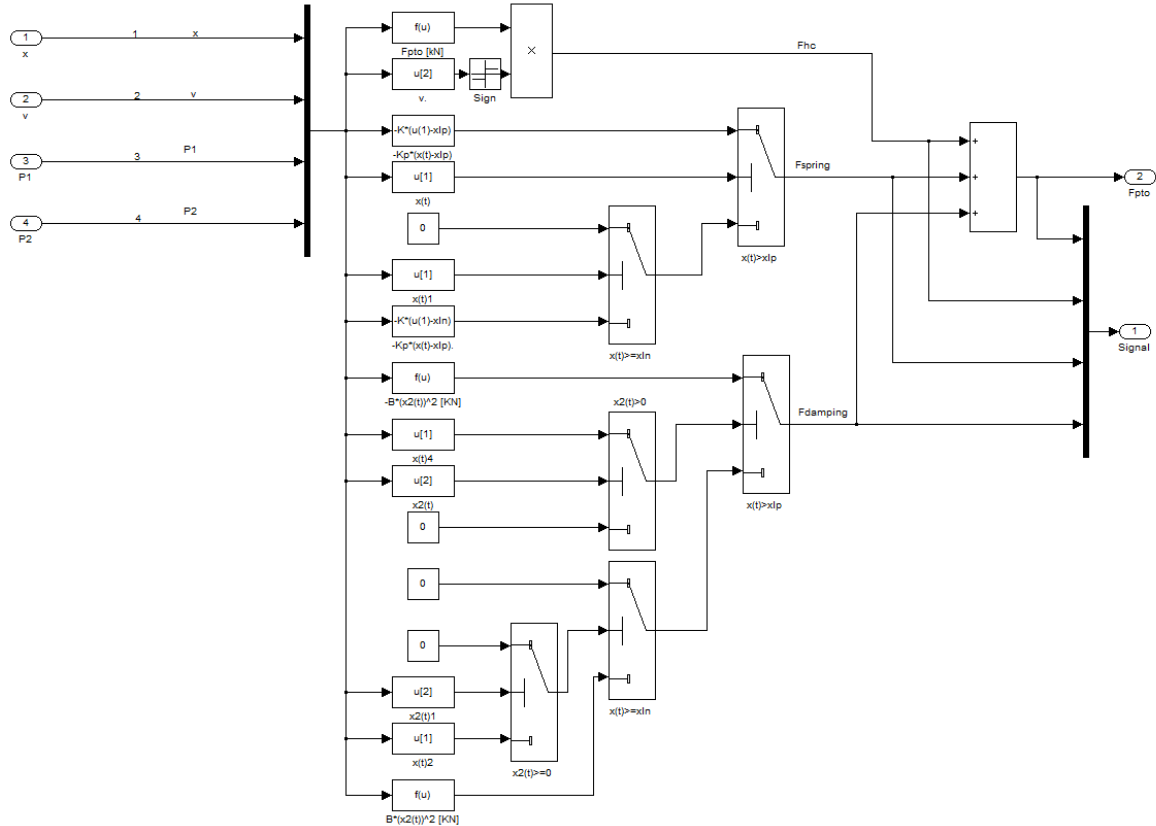


Figura 4.11 – Modelo matemático implementado para o bloco do modelo de paragem.

4.2.1.3.4 Bloco Modelo do Acumulador

Do bloco modelo do Acumulador determina-se o volume de gás, o volume de óleo e a pressão do acumulador por integração das equações diferenciais (3.50), (3.51) e (3.53). São definidos limites de integração. O mesmo será dizer que se estabelece uma gama de trabalho de funcionamento. Define-se que o acumulador trabalha entre a pressão de pré-carga ou carregamento e a pressão máxima, assim como o volume de gás e óleo para as respectivas condições de pressão. A variação do volume do acumulador é obtido da relação entre o caudal de entrada e o caudal consumido pelo motor (3.50). Por sua vez a pressão é função do volume do acumulador. As variáveis de entrada são:

- q_{a1} - Caudal deslocado da câmara 1 do cilindro para o acumulador [m^3/s];
- q_{a2} - Caudal deslocado da câmara 2 do cilindro para o acumulador [m^3/s];
- q_m - Caudal do motor [m^3/s].

As variáveis de saída são:

- P_{acc} – Pressão acumulador [Pa].

Os parâmetros constantes a especificar são:

- V_{acc} - Volume Total do Acumulador [m^3];

- $P_{máx}$ - Pressão Máxima no interior do acumulador [Pa];
- P_0 - Pressão de pré-carga ou carregamento do acumulador [Pa];
- γ - Razão do calor específico.

O Modelo Matemático implementado em Matlab Simulink está descrito na figura 4.12.

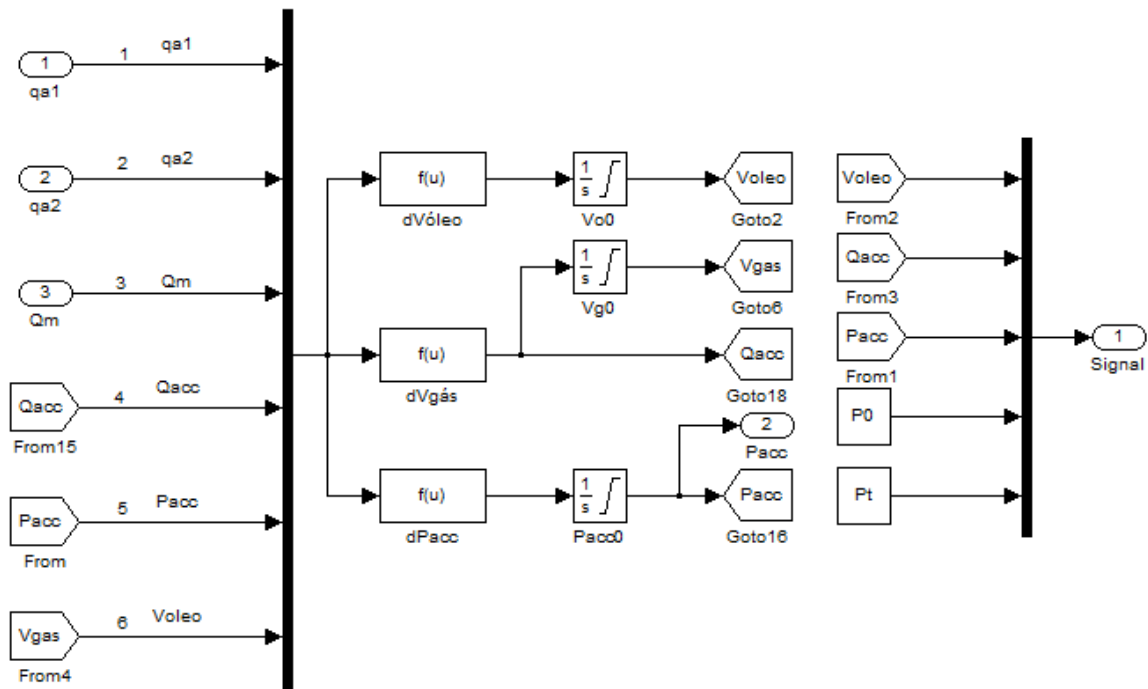


Figura 4.12 – Modelo matemático implementado para o bloco do modelo do acumulador.

4.2.1.3.5 Bloco Modelo Motor Hidráulico

No bloco modelo do motor hidráulico são estabelecidas condições lógicas para determinação do binário e da potência em função da pressão do acumulador tendo como referência a pressão de pré-carga ou carregamento. O caudal do motor é determinado pela velocidade de rotação imposta pelo gerador eléctrico (3.54). Enquanto o binário mecânico é função da diferença de pressão (3.56). Tanto o binário do motor como o consumo de caudal do motor pode ser controlado pela variação da cilindrada do motor (3.55) considerada como parâmetro constante.

As variáveis de entrada são:

- P_{acc} – Pressão acumulador [Pa];
- n_r – Velocidade de rotação no veio do grupo motor-gerador eléctrico [r.p.m.];
- P_1 – Pressão interna na câmara do cilindro 1 [Pa];
- P_2 – Pressão interna na câmara do cilindro 2 [Pa].

As variáveis de saída são:

- q_m - Caudal do motor [m^3/s];
- T_{mec} - Binário mecânico fornecido pelo motor hidráulico ao gerador eléctrico [N.m].

Os parâmetros constantes a especificar são:

- D_{35} - Cilindrada máxima do motor a 35° [cm^3/rot];
- α - Ângulo de variação da cilindrada [°];
- n_v - Eficiência Volumétrica;
- n_m - Eficiência Mecânica;
- P_0 - Pressão de pré-carga ou carregamento do acumulador [Pa].

O Modelo Matemático implementado em Matlab Simulink está descrito na figura 4.13.

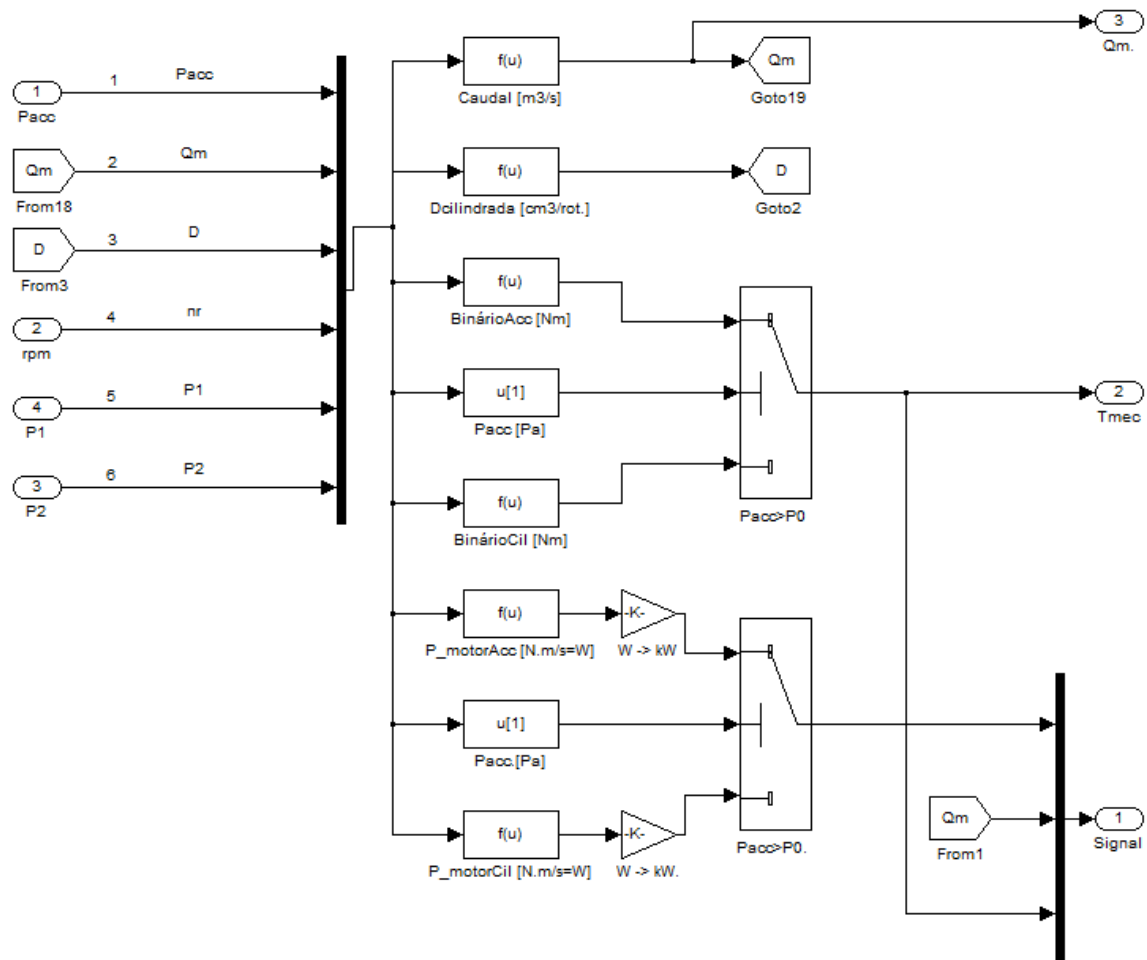


Figura 4.13 – Modelo matemático implementado para o bloco do modelo do motor hidráulico.

4.2.1.4 Bloco modelo da Máquina Assíncrona

No bloco modelo da máquina assíncrona estabelece-se a dinâmica rotacional entre o binário mecânico fornecido pelo motor hidráulico e o binário electromagnético estabelecido pelo trânsito de potências da rede eléctrica em função das forças electromotrizes e correntes no barramento fictício (3.83).

Da dinâmica rotacional (3.82) obtêm-se a velocidade de rotação (variável de saída). Das tensões determina-se as potências activa e reactiva produzidas e ou consumidas pelo conversor de energia das ondas para produzir electricidade.

As variáveis de entrada são:

- T_{mec} – Binário mecânico fornecido pelo motor hidráulico ao gerador eléctrico [N.m];
- V_d, V_q - Tensões decompostas sobre um eixo d-q no barramento de ligação número 5, entre o transformador e a máquina assíncrona [p.u.];
- I_d, I_q - Correntes decompostas sobre um eixo d-q no barramento de geração número 2 (barramento fictício).

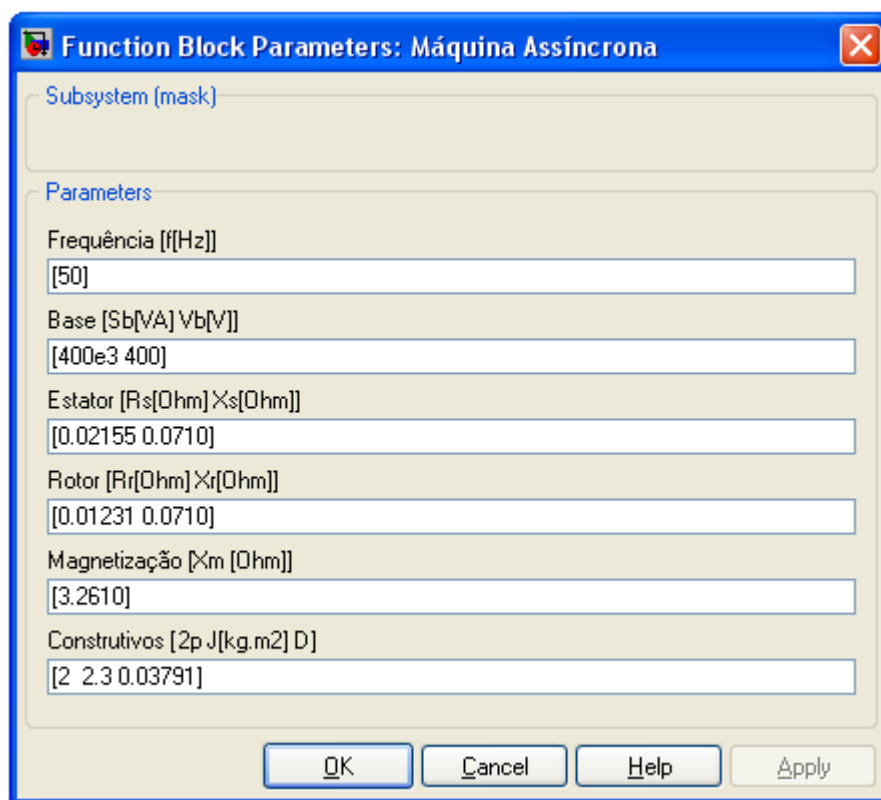
As variáveis de saída são:

- E_d, E_q - Força electromotriz da máquina assíncrona decompostas sobre um eixo d-q;
- n_r – Velocidade de rotação no veio do grupo motor-gerador eléctrico [r.p.m.].

Os parâmetros constantes a especificar são:

- f - Frequência eléctrica [Hz];
- Valores de Base:
 - o S_b - Potência Base [VA];
 - o V_b - Tensão de Base [V].
- Estator:
 - o R_s - Resistência por fase do Estator [Ω];
 - o X_s - Reactância de fugas por fase do Estator [Ω].
- Rotor:
 - o R_r - Resistência por fase do rotor, referida ao estator [Ω];
 - o X_r - Reactância de fugas por fase do rotor, referida ao estator [Ω].
- Magnetização:
 - o X_m - Reactância de Magnetização [Ω].
- Propriedades Construtivas:
 - o $2p$ - Número de Pólos;
 - o J - Momento de Inércia [kg.m^2];
 - o D - Factor de amortecimento.

A caixa de diálogo deste bloco é apresentada na figura 4.14.



Function Block Parameters: Máquina Assíncrona

Subsystem (mask)

Parameters

Frequência [f[Hz]]
[50]

Base [Sb[VA] Vb[V]]
[400e3 400]

Estator [Rs[Ohm] Xs[Ohm]]
[0.02155 0.0710]

Rotor [Rr[Ohm] Xr[Ohm]]
[0.01231 0.0710]

Magnetização [Xm [Ohm]]
[3.2610]

Construtivos [2p J[kg.m2] D]
[2 2.3 0.03791]

OK Cancel Help Apply

Figura 4.14 – Parâmetros do bloco do modelo para a Máquina Síncrona.

O Modelo Matemático implementado em Matlab Simulink está descrito na figura 4.15.

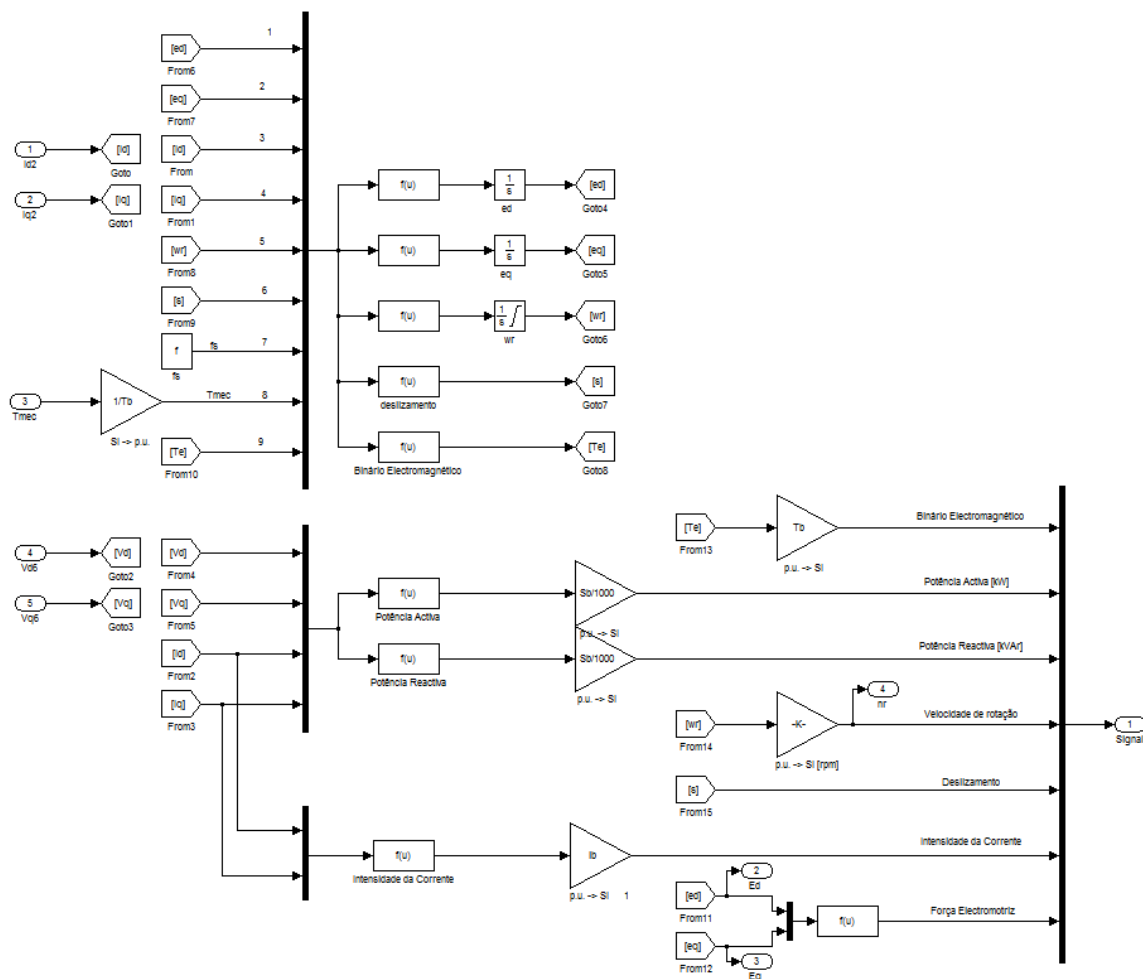


Figura 4.15 – Modelo matemático implementado para o bloco do modelo da Máquina Assíncrona.

4.2.1.5 Bloco Modelo da Rede Eléctrica

De modo a exemplificar o modelo adoptado para a Rede Eléctrica, considerou-se neste caso um único conversor de energia das ondas. O conversor de energia das ondas, contempla o gerador eléctrico e o transformador elevador de tensão. A produção ocorre à tensão de 0,4kV e elevada para o nível de tensão a que se encontra o ponto de recepção 15kV. O transporte da energia eléctrica produzida é realizada por cabo submarino até terra (8km) e por linha aérea até ao ponto de recepção (20km). Admite-se a existência de uma carga eléctrica a montante do ponto de recepção. O ponto de recepção é por sua vez caracterizado por uma potência de curto-circuito. Consoante a topologia da rede estudada, determina-se a matriz das admitâncias nodais, aplicando

a redução de Kron, descrita no Capítulo 3, na secção 3.4.3.2. Do produto matricial da força electromotriz, da máquina assíncrona e da f.e.m. equivalente do barramento de potência quase infinita (ponto de recepção), pela matriz das admitâncias nodais da rede eléctrica reduzida determina-se as correntes injectadas nos barramentos de geração 1 e 2. As tensões em todos os barramentos da rede eléctrica são obtidas pelo produto da inversa da matriz da admitância completa pelo vector das correntes injectadas, calculado anteriormente.

As variáveis de entrada são:

- E_d, E_q - Força electromotriz da máquina assíncrona decompostas sobre um eixo d - q ;

As variáveis de saída são:

- I_d, I_q - Correntes decompostas sobre um eixo d - q no barramento de geração número 2 (barramento fictício).
- V_d, V_q - Tensões decompostas sobre um eixo d - q no barramento de ligação número 5, entre o transformador e a máquina assíncrona [p.u.];

Na Figura 4.16 representa-se a rede eléctrica descrita com os parâmetros constantes especificados e representados em p.u..

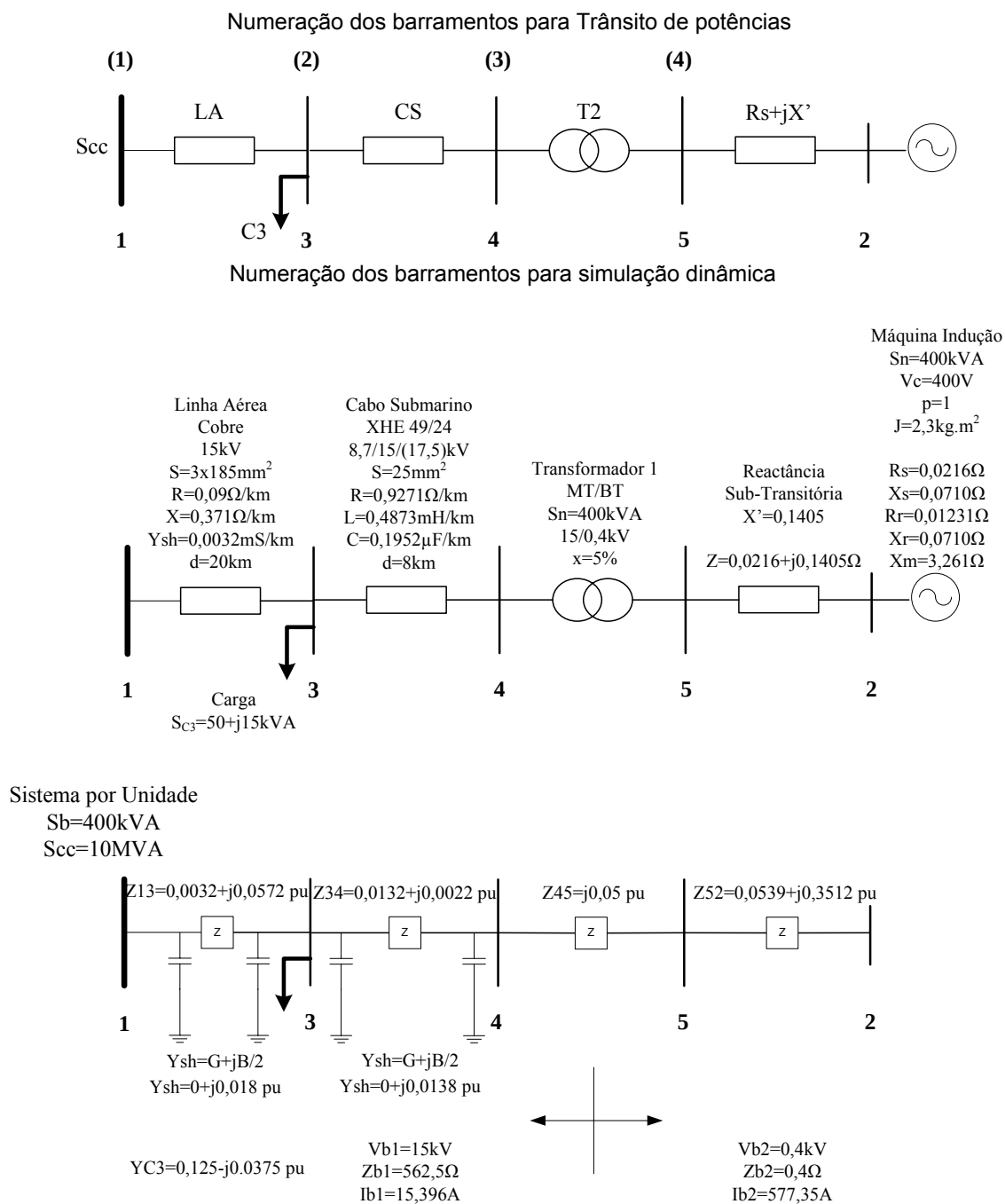


Figura 4.16 - Exemplo da rede eléctrica estudada para uma máquina eléctrica com potência de curto-circuito no ponto de recepção de 10MVA representada em S.I. e em valores p.u..

O Modelo Matemático implementado em Matlab Simulink é descrito na figura 4.17.

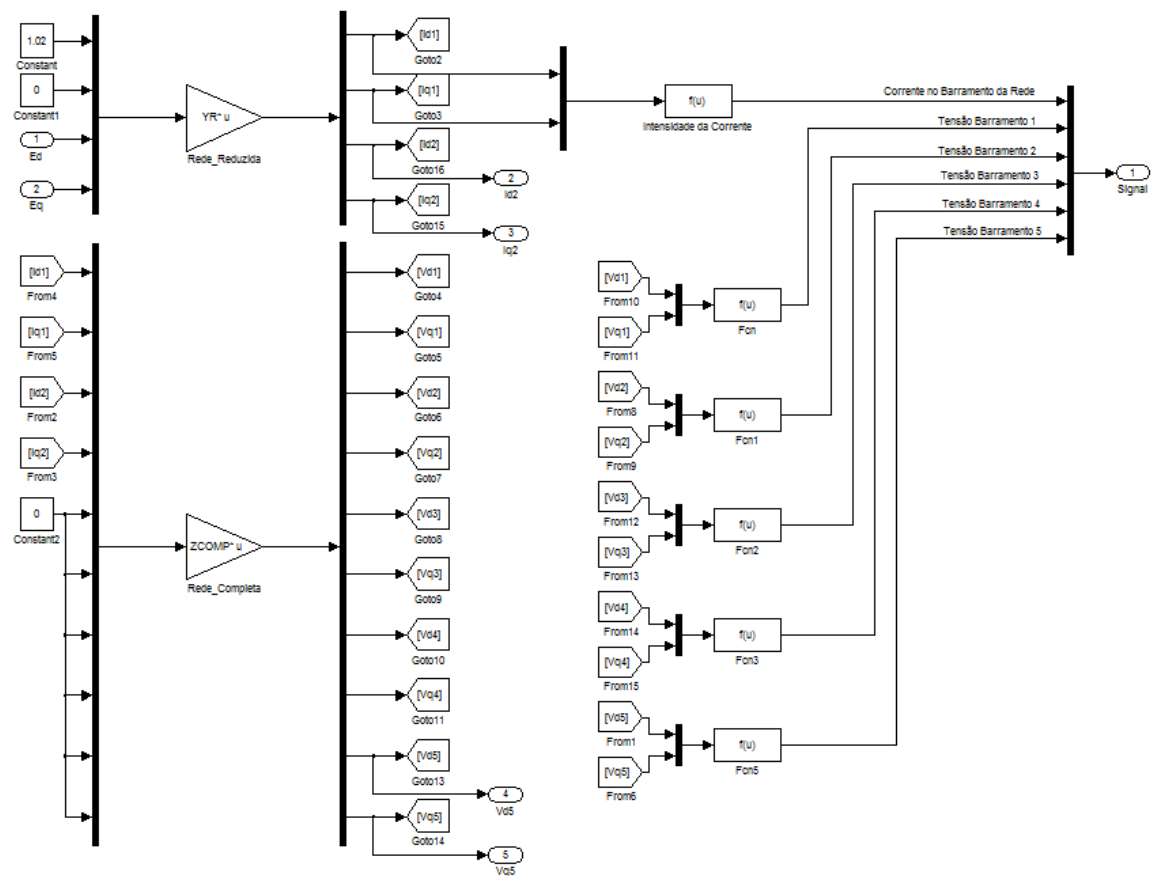


Figura 4.17 – Modelo matemático implementado em Simulink da Rede Eléctrica.

4.2.2 Parque de Ondas

Para o estudo do parque de ondas considerou-se que os conversores de energia das ondas a utilizar para perfazer um conjunto de três máquinas instaladas sobre diferentes topologias, apresentavam as mesmas características técnicas entre eles, descritas anteriormente por parâmetros constantes. Em tudo semelhante ao que se conhece dos parques eólicos cujo os aerogeradores que os constituem têm ambos as mesmas dimensões, potência instalada, etc. Deste modo, para representação do parque de ondas em ambiente Matlab Simulink, considerou-se os mesmos blocos dos modelos anteriormente descritos por conversor de energia das ondas, excepção feita ao bloco do modelo da Onda e da Rede eléctrica como a seguir se descreve.

O Modelo Matemático do parque de ondas implementado em Matlab Simulink está descrito na figura 4.18:

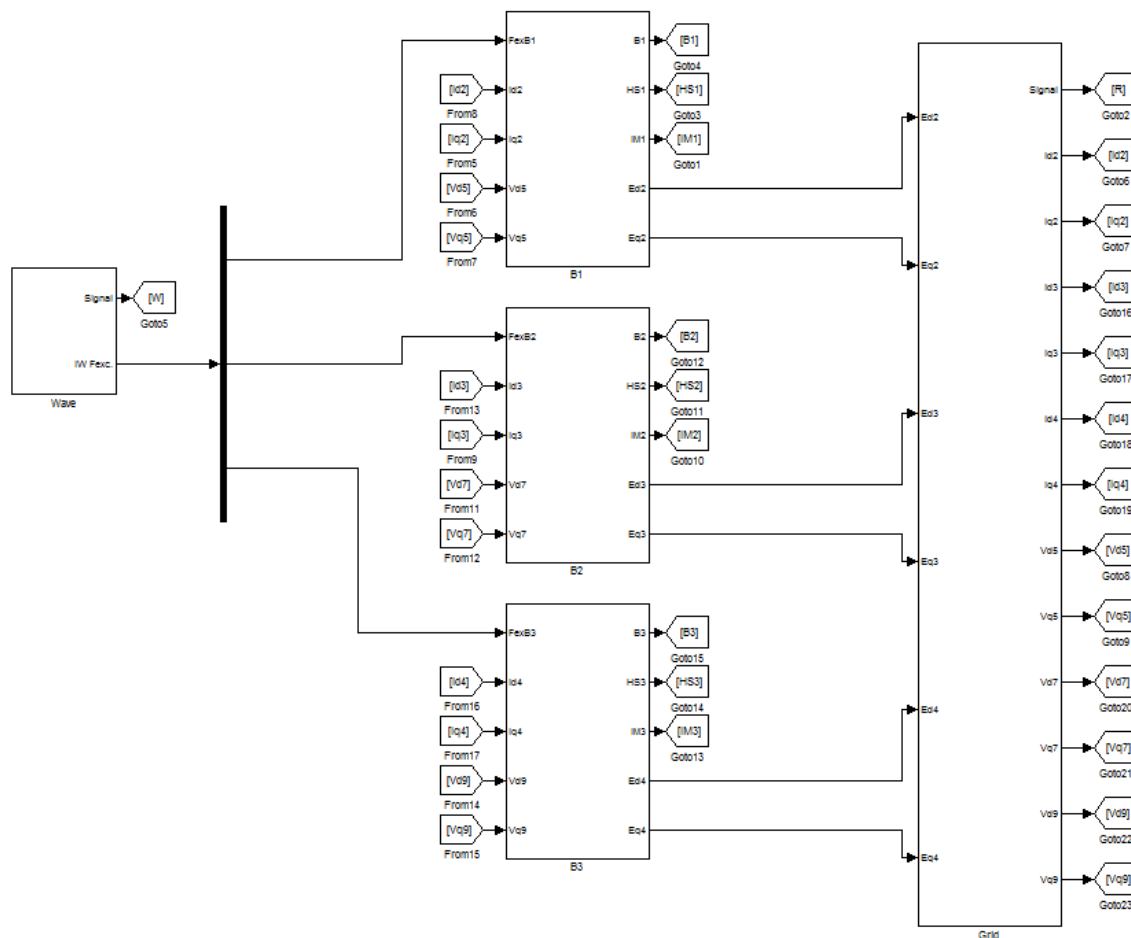


Figura 4.18 – Modelo matemático implementado em Simulink do parque de ondas.

4.2.2.1 Bloco Modelo da Onda

De forma a que a interação da ondas de superfície do mar com o conversor de energia das ondas ocorra de forma diferente no mesmo intervalo de tempo de simulação, considerou-se um atraso temporal da força de excitação, como se ilustra na Figura 4.19. O atraso temporal especificado de 9 segundos têm como propósito e recorrendo à teoria linear das ondas de superfície (2.1) criar um comprimento de onda suficientemente grande de forma a que os efeitos de radiação do movimento de um dos conversores não se reflecta no movimento dos outros conversores, tendo presente a dimensão do conversor de energia das ondas.

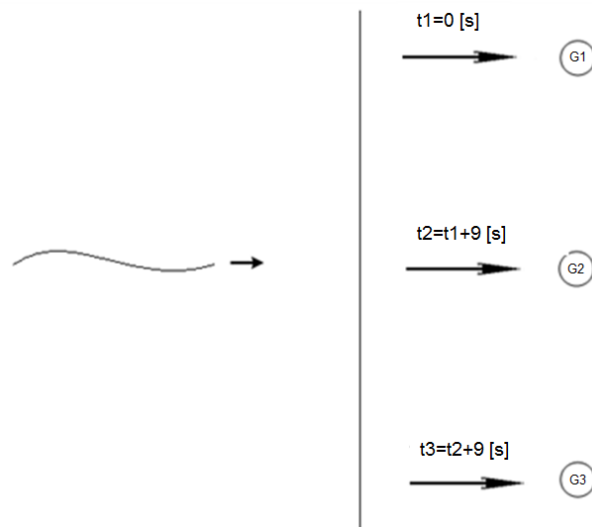


Figura 4.19 – Ilustração do atraso temporal imposto.

As variáveis de saída são:

- F_{exc} - Forças de excitação ou difração [kN];

Por especificação dos seguintes parâmetros:

- H_s - Altura significativa [m];
- T_e - Período de energia [s];
- t - Tempo de simulação [s];
- Intervalo de frequências [$w_{min}:w_{max}$] [rad/s];
- Número de intervalos entre frequências;
- Coeficientes Hidrodinâmicos da função de transferência da Força de Excitação, como se apresenta Figura 4.2.

O correspondente bloco em Matlab Simulink apresenta uma caixa de diálogo, descrita na figura 4.20.

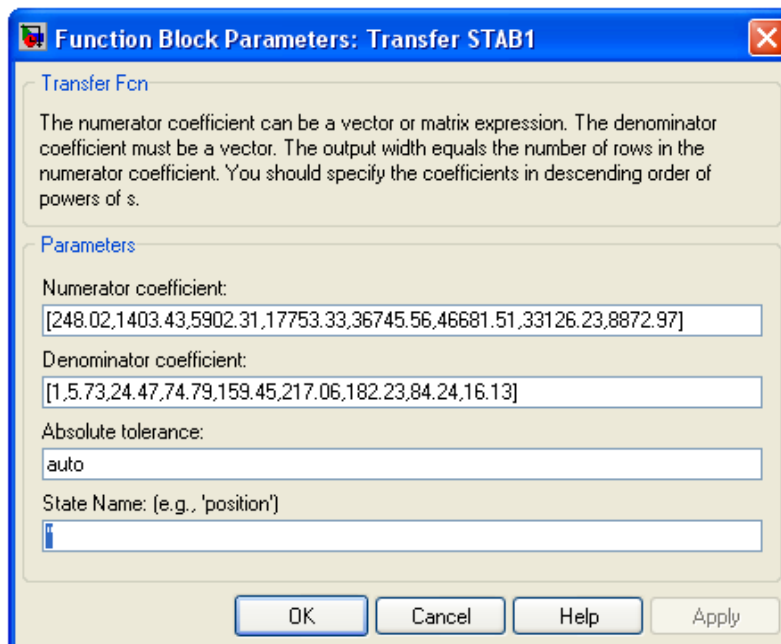


Figura 4.20 – Parâmetros da função bloco modelo da onda.

O Modelo Matemático implementado em Matlab Simulink está descrito na figura 4.21:

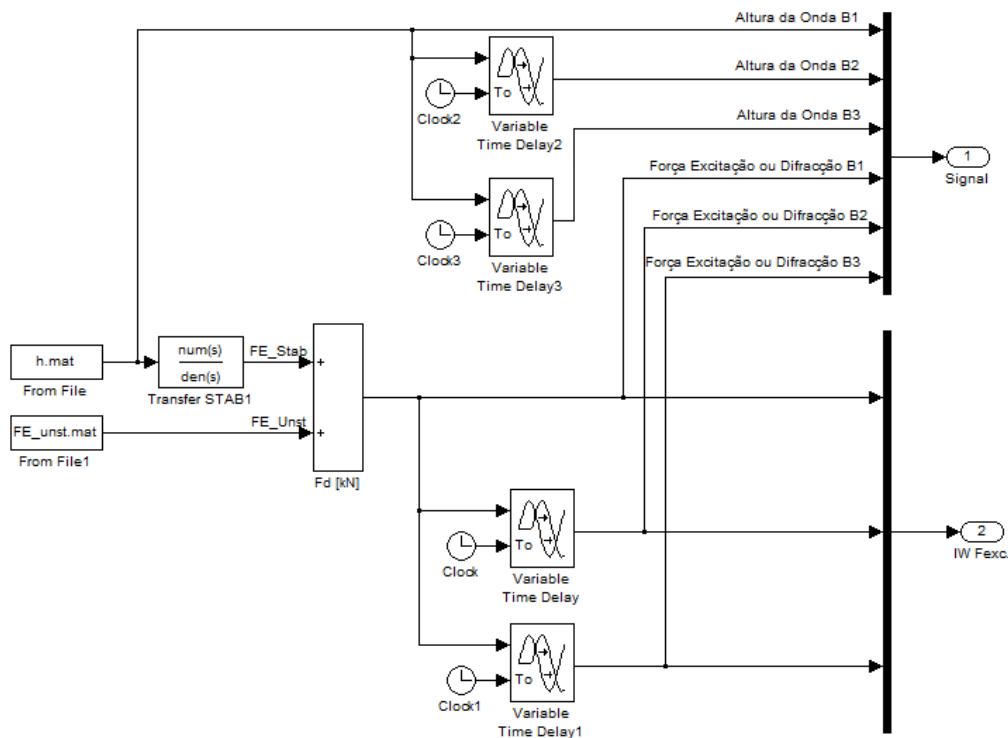


Figura 4.21 – Modelo matemático implementado em Simulink da onda com o atraso aplicado à Força de excitação ou difracção.

4.2.2.2 Bloco Modelo da Rede Eléctrica

O bloco modelo da rede eléctrica do parque de Ondas é apresentado segundo duas topologias diferentes.

A primeira topologia refere-se a um parque de ondas no qual os conversores de energia das ondas estão interligados em série por cabos eléctricos submarinos com comprimentos de 250 metros e ligados a terra por um cabo eléctrico submarino com 8 km de comprimento. A ligação ao ponto de recepção é feita por linha aérea de 20 km. O nível da tensão de produção é de 0,4KV sendo elevada por intermédio de transformadores para 15 kV para assegurar o transporte de energia eléctrica ao ponto de recepção. O ponto de recepção é por sua vez caracterizado por uma potência de curto-circuito.

A segunda topologia difere da primeira pelo método de ligação dos conversores ao ponto de recepção da rede eléctrica localizada em terra. Caracterizando-se por conversores de energia das ondas dispostos em paralelo com comprimentos de cabos eléctricos submarinos de 8 km ligados directamente a terra. A ligação ao ponto de recepção da rede eléctrica, caracterizado por uma potência de curto-circuito é conseguida por intermédio de uma linha aérea de 20 km de comprimento.

Do produto matricial das forças electromotrizes, das máquinas assíncronas e da f.e.m. equivalente do barramento de potência quase infinita (ponto de recepção), pela matriz das admitâncias nodais da rede eléctrica reduzida nas diferentes topologias determina-se as correntes injectadas nos barramentos de geração 1, 2, 3 e 4. As tensões em todos os barramentos da rede eléctrica são obtidas pelo produto da inversa da matriz da admitância completa pelo vector das correntes injectadas, calculado anteriormente.

As variáveis de entrada são:

- E_d, E_q - Forças electromotrizes das máquinas assíncronas de cada conversor de energia das ondas decompostas sobre um eixo $d-q$;

As variáveis de saída são:

- I_d, I_q - Correntes decompostas sobre um eixo $d-q$ nos barramentos de geração números 2, 3 e 4 (barramentos fictícios).
- V_d, V_q - Tensões decompostas sobre um eixo $d-q$ nos barramentos de ligação número 5, 7 e 9, entre o transformador e a máquina assíncrona [p.u.];

Na Figura 4.22 e Figura 4.23 representa-se as redes eléctricas estudadas sobre diferentes topologias (Série e Paralelo) descritas por parâmetros constantes.

- Rede Eléctrica Série

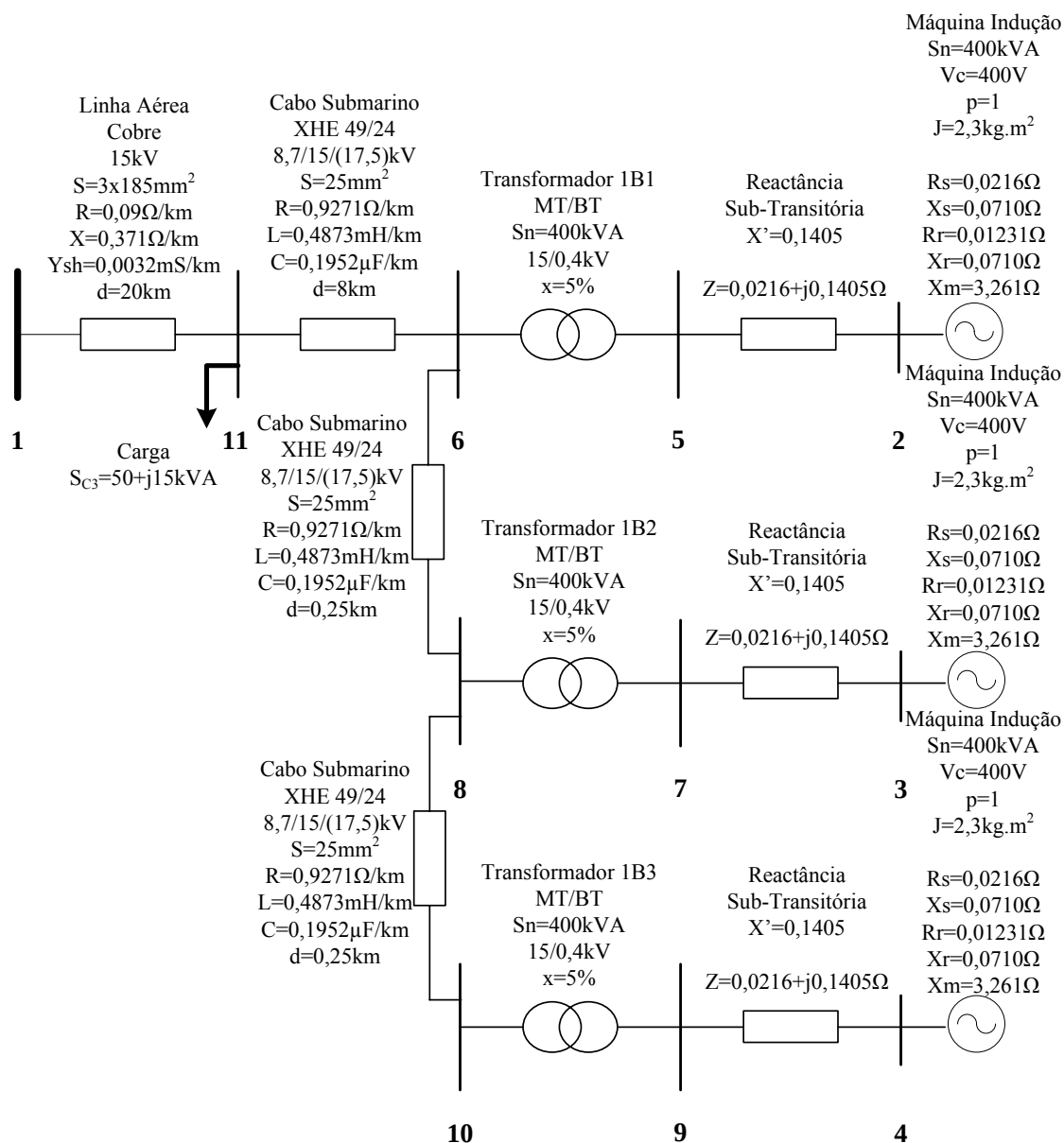


Figura 4.22 - Rede eléctrica em série com os parâmetros especificados.

- Rede Eléctrica Paralelo

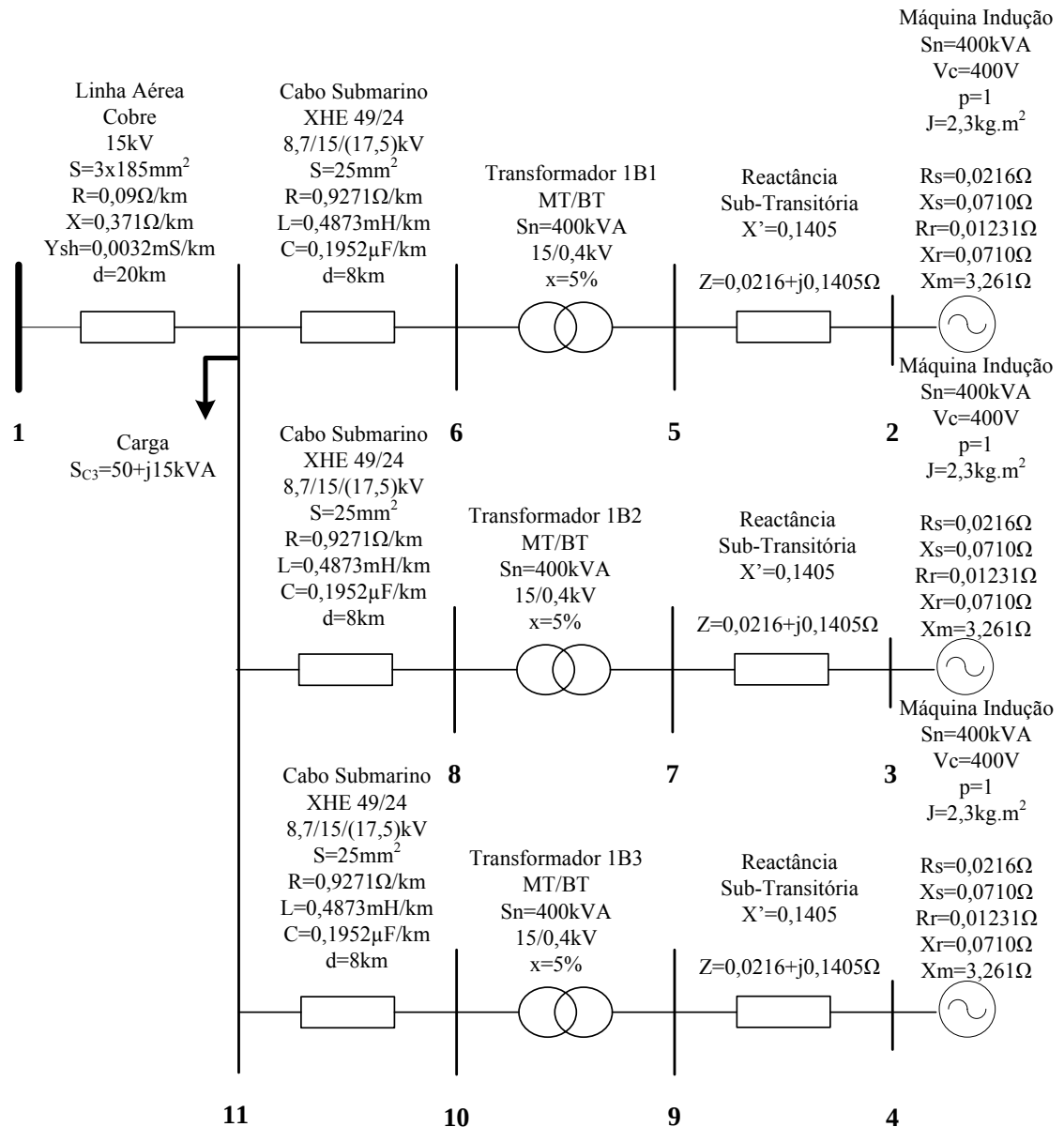


Figura 4.23 – Rede eléctrica em paralelo com os parâmetros especificados.

O Modelo Matemático implementado em Matlab Simulink está descrito na figura 4.24:

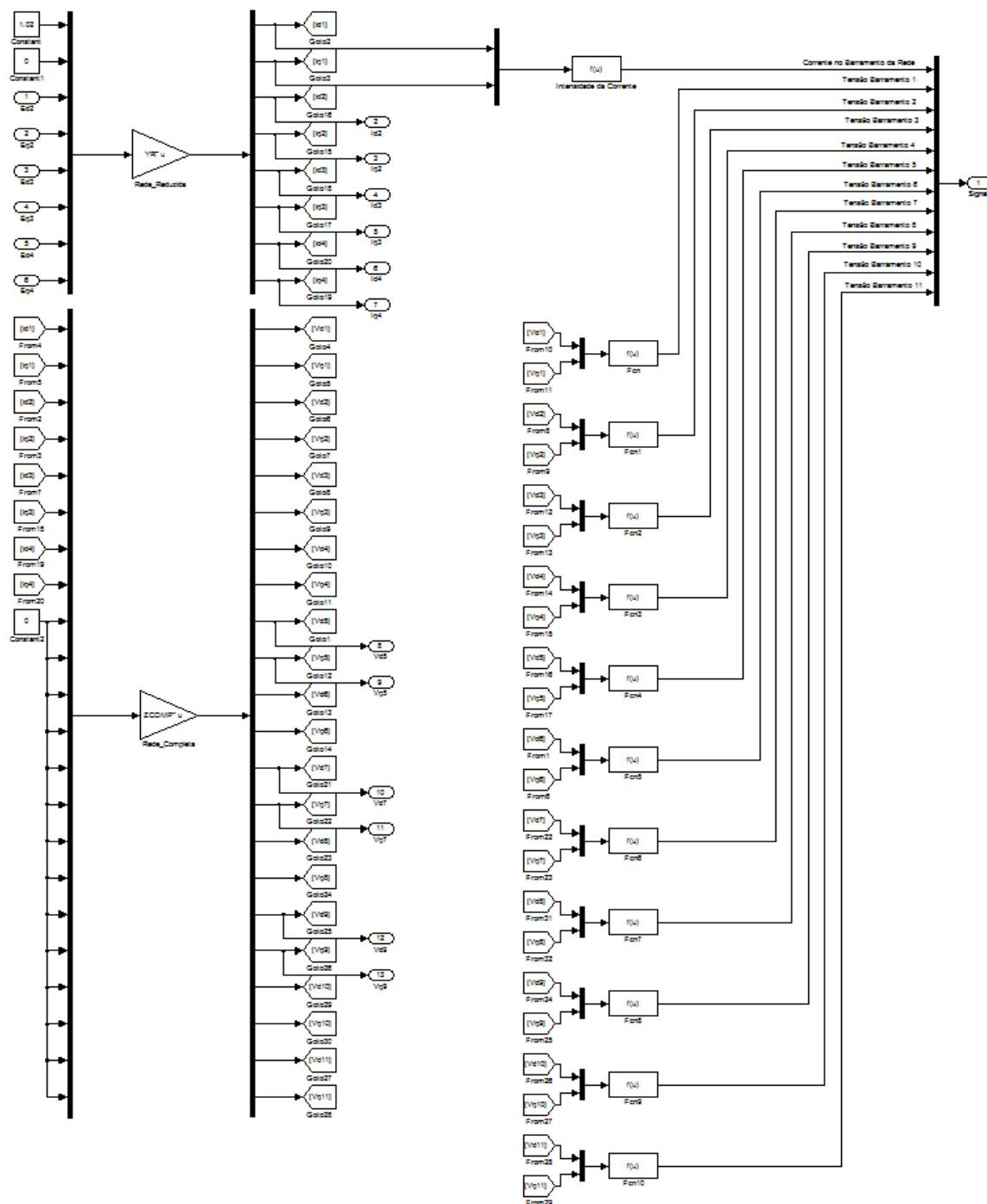


Figura 4.24 – Modelo matemático implementado em Simulink da rede eléctrica.

Capítulo 5 - Resultados de Simulação

5.1 Introdução

Para a simulação no domínio do tempo dos modelos matemáticos descritos por blocos no Capítulo 4, é necessário ter presente os parâmetros de entrada anteriormente apresentados. Apresenta-se no Anexo B uma tabela resumo com a especificação de todos os parâmetros de entrada do sistema de conversão de energia das ondas em energia eléctrica. Nesta tabela podem-se consultar desde as dimensões do corpo do flutuador, às características do Sistema Hidráulico, passando pelas características do sistema eléctrico de energia. Para demonstração do comportamento do dispositivo de conversão são seleccionados os parâmetros que seguem:

- $H_s; T_e$ – Caracterização do Estado de Mar;
- S_{cc} – Potência de curto-circuito;
- V_{acc} - Volume total do Acumulador;
- P_0 - Pressão de Pré-carga;
- α - Ângulo de variação da cilindrada.

A especificação de todos os parâmetros considerados nesta dissertação teve por base a consulta em referências e catálogos das especialidades, de modo a que os resultados que serão apresentados neste capítulo fossem o mais realistas possíveis.

5.2 Operação do Conversor de Energia das Ondas

Para a resolução numérica (aproximação) das equações diferenciais ordinárias que definem a dinâmica do conversor de energia das ondas, existem diferentes métodos iterativos disponíveis em ambiente Matlab Simulink:

- Métodos discretos;
- Métodos de extrapolação;
- Método de Euler de 1ª Ordem;
- Método de Heun de 2ª Ordem;
- Método de Bogacki-Shampine de 3ª Ordem;
- Método de Runge–Kutta de 4ª Ordem;
- Método de Dormand-Prince de 5ª Ordem.

Dos métodos apresentados seleccionou-se o método de Runge–Kutta de quarta ordem (ode4 Runge-Kutta) com passo de iteração fixo de 0,01 segundos. O método seleccionado entende-se como o melhor compromisso entre os resultados alcançados e o tempo de simulação.

5.2.1 Dinâmica de Movimentos

Como anteriormente descrito nesta dissertação na secção 3.2.1, a série temporal da variação da superfície da onda para um estado de mar H_s , T_e em cada instante de tempo t é obtida do somatório de um número finito de ondas sinusoidais (3.3). Cada uma das quais caracterizada pela amplitude, função da densidade espectral das diferentes frequências que constituem o espectro e fase (φ) gerada aleatoriamente. Para que se possa realizar a análise de resultados, de forma comparativa por variação dos valores dos parâmetros a especificar é necessário estabelecer que a série temporal da elevação de superfície é sempre a mesma para cada par H_s , T_e . O mesmo será dizer que os valores de amplitude e fase terão que ser iguais para cada simulação efectuada com estado de mar H_s , T_e . Para demonstrar a influência da variação da superfície da onda, na dinâmica de movimentos do corpo do flutuador, dos parâmetros anteriormente seleccionados especifica-se as seguintes condições de teste:

Tabela 5.1 – Tabela com a especificação dos parâmetros utilizados na simulação.

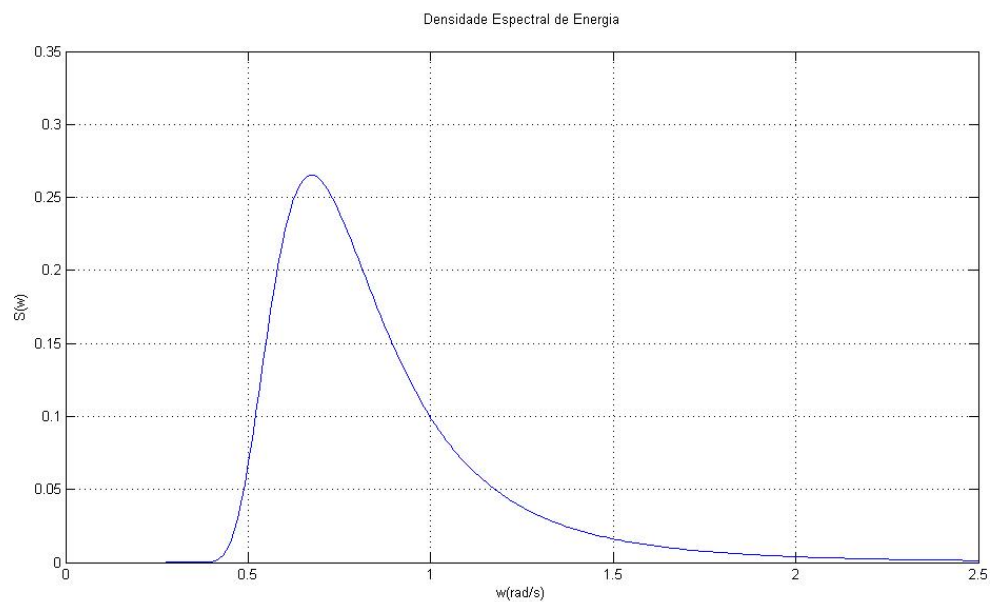
	Condição 1	Condição 2
H_s – Altura Significativa [m]	4	2
T_e – Período de Energia [s]	11	8
V_{acc} – Volume total do Acumulador [m ³]	2	2
P_0 – Pressão de Pré-carga [Pa]	120×10^5	100×10^5
α – Ângulo de variação da cilindrada [°]	35	6.5

As condições de teste serão apresentadas para diferentes cenários da potência de curto-circuito (S_{cc}). Os resultados que a seguir se apresentam na dinâmica de movimentos do corpo do flutuador consideram as duas condições de teste especificado para a S_{cc} de 50MVA.

5.2.1.1 Densidade Espectral e Elevação da Superfície da Onda

As séries temporais e os respectivos espectros que descrevem os dois estados de mar considerados nas condições de teste são apresentadas nas figuras que se seguem:

- $H_s=2; T_e=8s$

Figura 5.1 – Densidade espectral de energia para $H_s=2m; T_e=8s$.

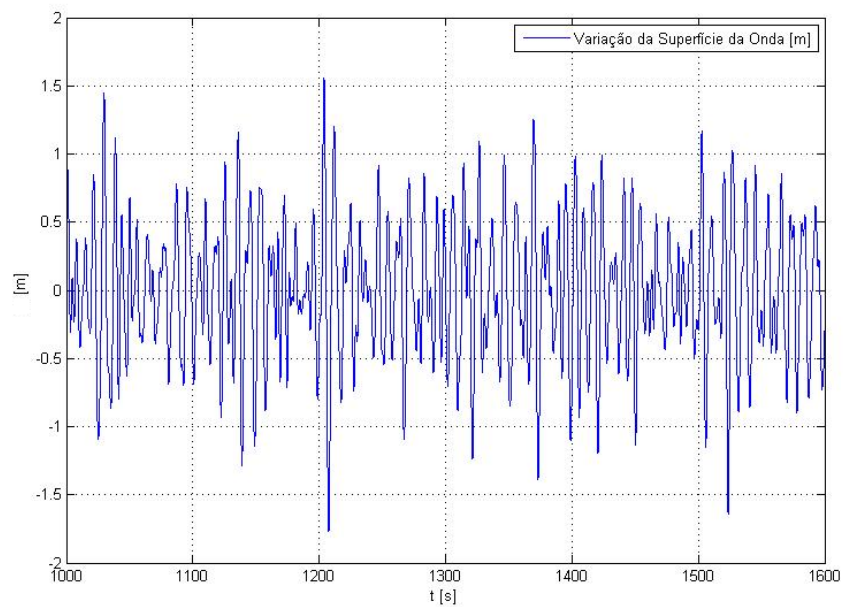


Figura 5.2 – Variação da superfície da onda em metros, para $H_s=2m$; $T_e=8s$.

- $H_s=4$; $T_e=11s$

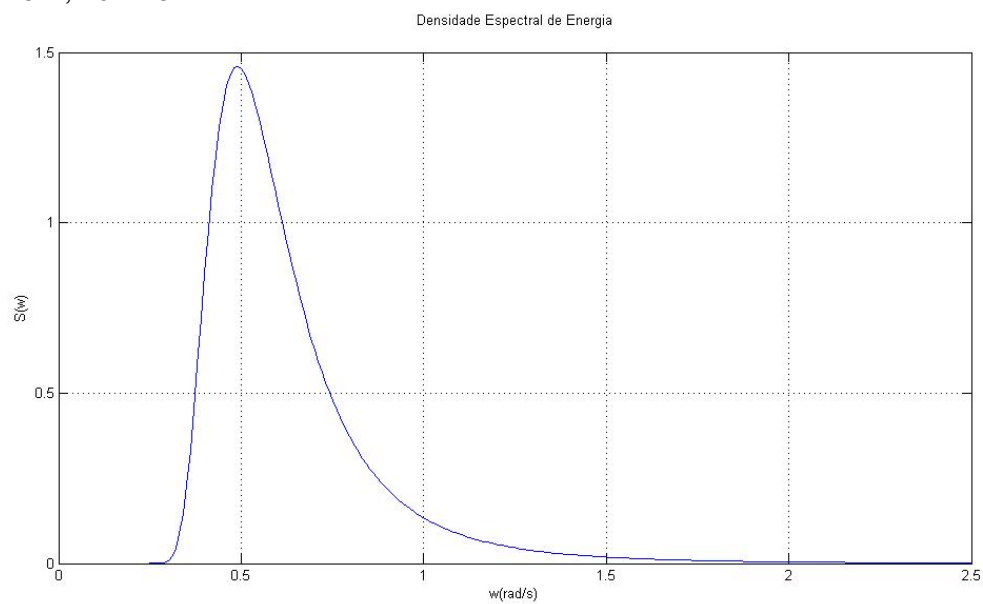


Figura 5.3 – Densidade espectral de energia para $H_s=4m$; $T_e=11s$.

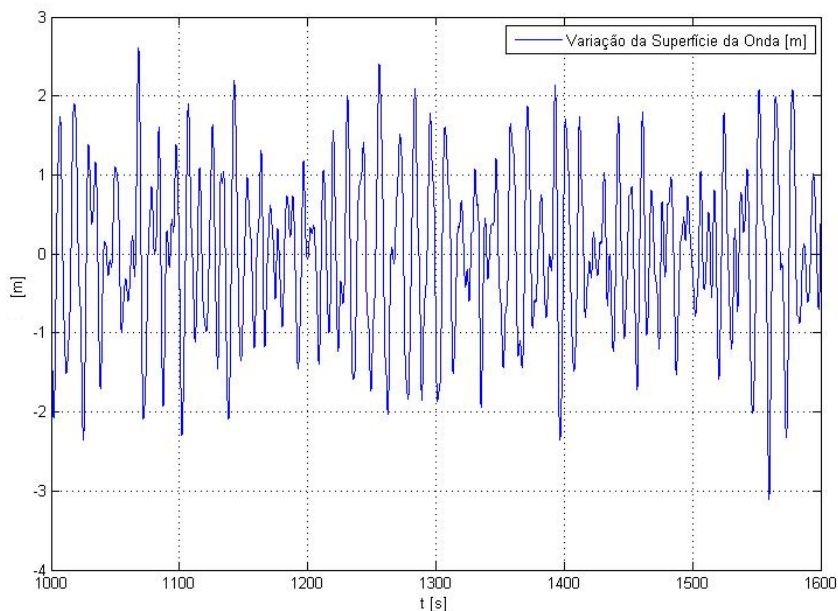


Figura 5.4 – Variação da superfície da onda em metros, para $H_s=4\text{m}$; $T_e=11\text{s}$.

Foram seleccionados estados de mar, de acordo com os dados de frequência da ocorrência de uma das bóias oceanográficas da costa Portuguesa, com o propósito de representar ambientes energéticos distintos, do ponto de vista operacional do conversor de energia das ondas. No primeiro caso apresenta-se ondas de pequena amplitude e curtos períodos, no segundo ondas de amplitude média e períodos médios. A potência incidente destes estados de mar, para profundidades superiores a 50 metros é apresentada na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Potência incidente para ondas de pequena e média amplitude de períodos curtos e médios.

H_s [m]	T_e [s]	P [kW/m]
2	8	15,68
4	11	86,24

5.2.1.2 Velocidades

Em função da variação da superfície da onda e das condições do sistema de extracção de energia, o corpo do flutuador pode apresentar variações de velocidade relativa entre o corpo do flutuador e o cilindro hidráulico na ordem dos 2 m/s para estados menos energéticos e de 3 m/s para estados mais energéticos em intervalos de tempo de 4 segundos. No entanto, para os

mesmos estados de mar registam-se intervalos de tempo mais longos (aprox: 20 s) no qual a velocidade do corpo do flutuador é nula.

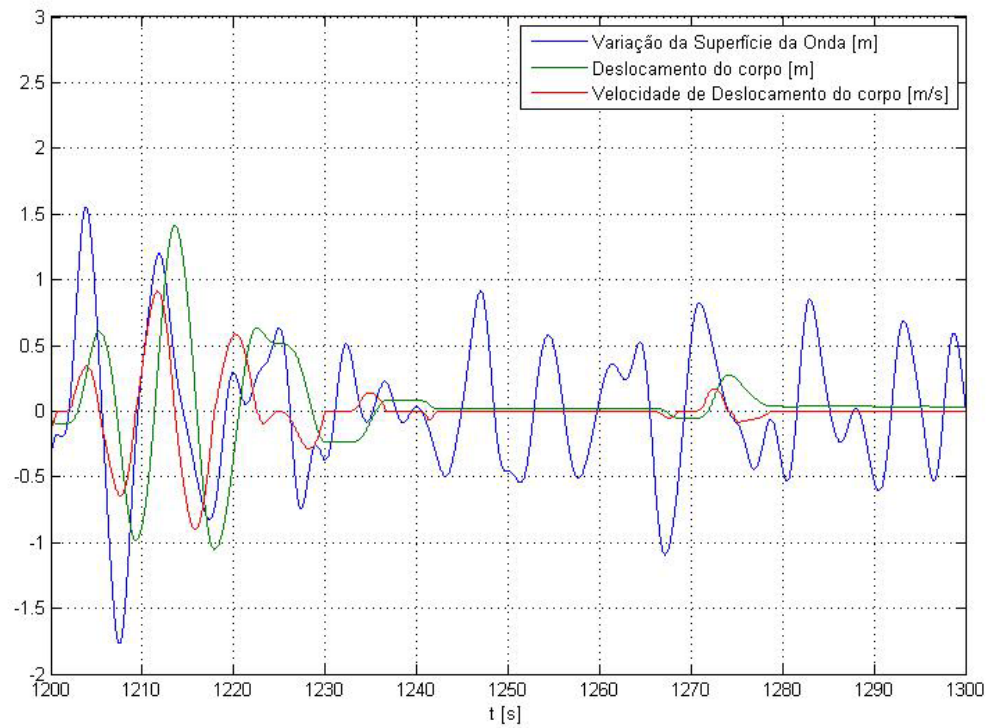


Figura 5.5 – Variação da superfície da onda e sua influência na velocidade e deslocamento do corpo para $H_s=2\text{m}$; $T_e=8\text{s}$.

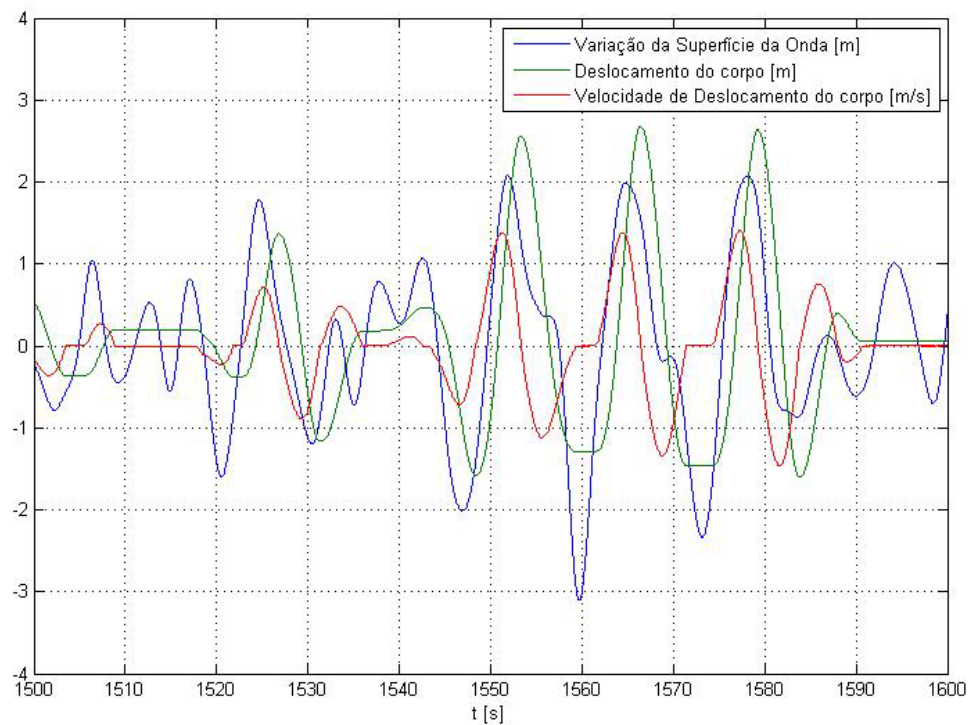


Figura 5.6 – Variação da superfície da onda e sua influência na velocidade e deslocamento do corpo
 $H_s=4\text{m}; T_e=11\text{s}$.

A velocidade do corpo do flutuador é nula na cava e na crista da onda. A ausência de velocidade no corpo do flutuador resulta em particular da oposição ao movimento imposta pela força do PTO (3.46), característica do sistema de conversão de energia das ondas em energia eléctrica, ser superior à resultante das forças hidrodinâmicas. Como se verifica na Figura 5.5 a velocidade do corpo é nula, o valor do deslocamento relativo entre o corpo do flutuador e o cilindro hidráulico é constante em contraste com a variação da superfície da onda. Esta situação ocorre geralmente para ondas de menor dimensão, inferiores a 1 metro. Destacando-se deste modo uma necessidade de uma selecção correcta dos parâmetros que caracterizam os sistemas hidráulico e eléctrico.

5.2.1.3 Forças

É de esperar que quando a F_{PTO} é nula a amplitude da bóia aumenta. De acordo com a Figura 5.7 e Figura 5.8 é possível constatar o que anteriormente foi referido, ou seja, para que se registre o movimento do corpo do flutuador, a Força hidrodinâmica total tem que ser superior à força imposta pelo PTO.

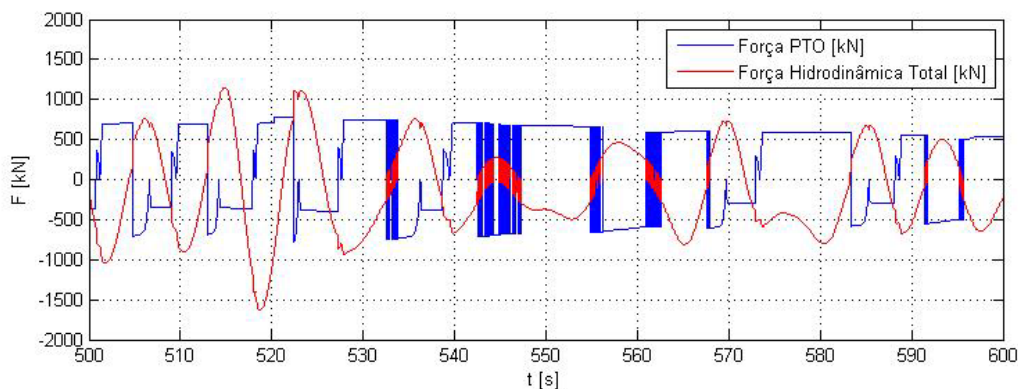


Figura 5.7 – Variação da Força PTO e da Força Hidrodinâmica de acordo com a evolução da velocidade de deslocamento do corpo da Figura 5.8.

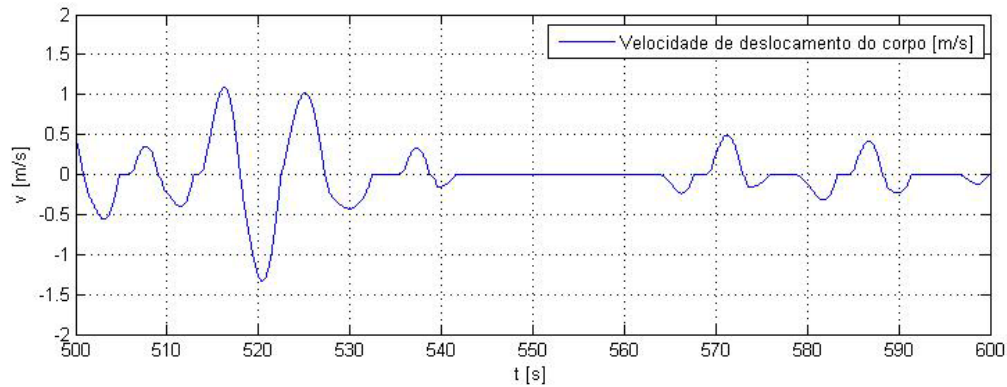


Figura 5.8 – Variação da velocidade de deslocamento para $H_s=2m$; $T_e=8s$.

Das forças hidrodinâmicas descritas na secção 3.2.2.1, a força de radiação é a que apresenta menor contribuição para as condições de teste consideradas.

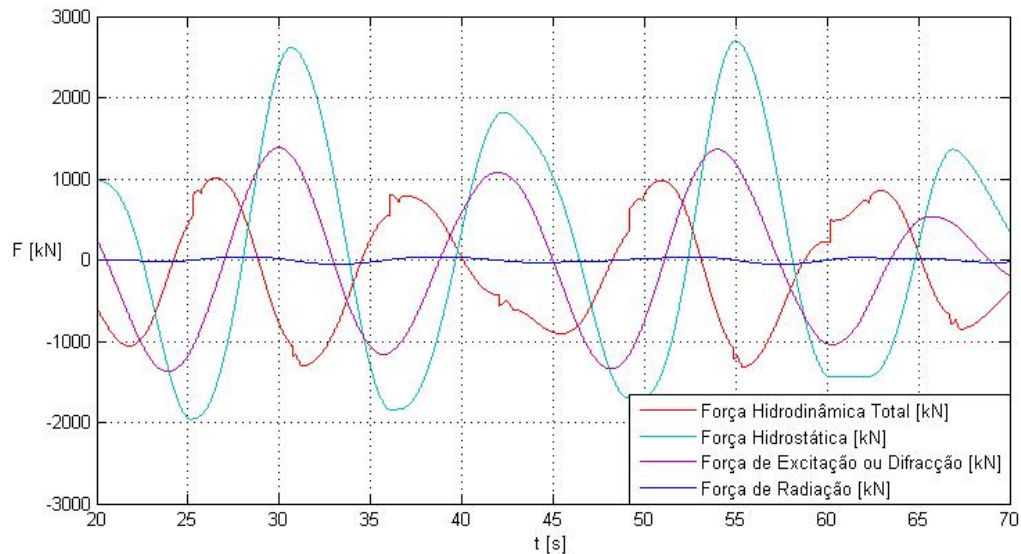


Figura 5.9 – Variação das Forças de Radiação, de Hidrostática, de Excitação e de Hidrodinâmica Total para $H_s=4m$; $T_e=11s$.

Esta situação regista-se tanto para os estados de mar mais energéticos como para estados de mar menos energéticos. Tal situação pode ocorrer quando o período natural de resposta do conversor de energia das ondas não coincide com o período da onda seleccionado, por conseguinte fora da ressonância.

Os valores das forças para os estados de mar mais energéticos, Figura 5.9, pode atingir 5 vezes o valor do estado de mar menos energético, Figura 5.10.

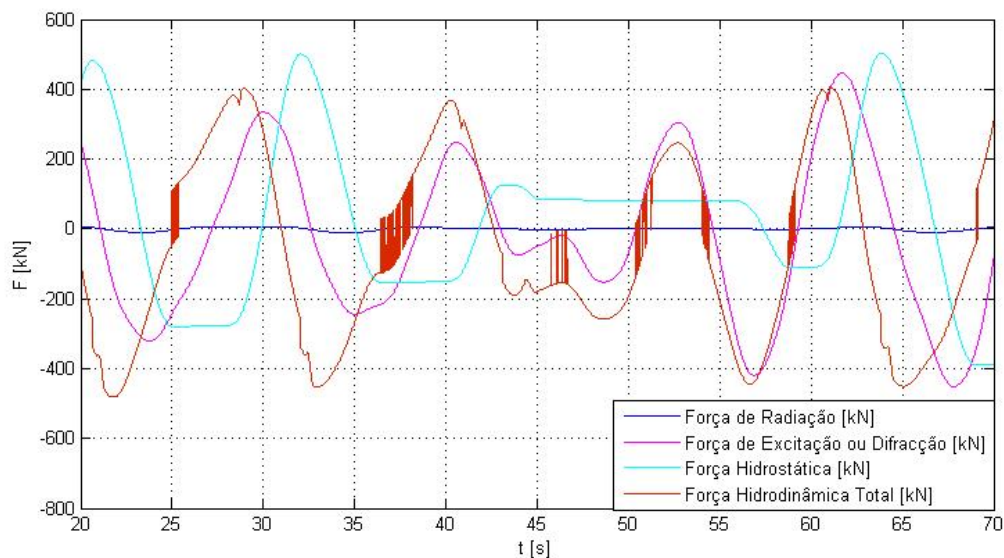


Figura 5.10 – Variação das Forças de Radiação, de Hidrostática, de Excitação e de Hidrodinâmica Total para $H_s=2m$; $T_e=8s$.

De realçar, que devido ao facto do tipo de cilindro hidráulico utilizado (duplo efeito com haste simples) apresentar áreas de trabalho diferentes, a área Anular para o movimento ascendente e a área do êmbolo para o movimento descendente, constata-se um acréscimo de velocidade em movimento ascendente e por conseguinte uma diminuição da força do PTO.

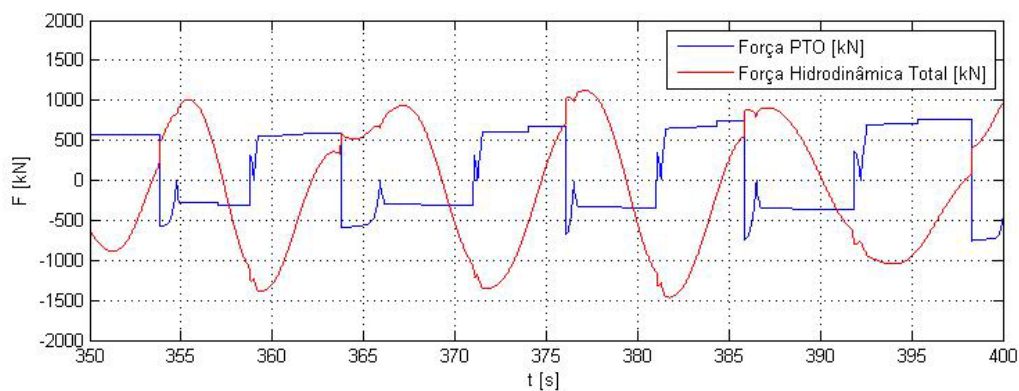


Figura 5.11 – Variação da Força PTO e da Força Hidrodinâmica de acordo com a evolução da velocidade de deslocamento do corpo da Figura 5.12.

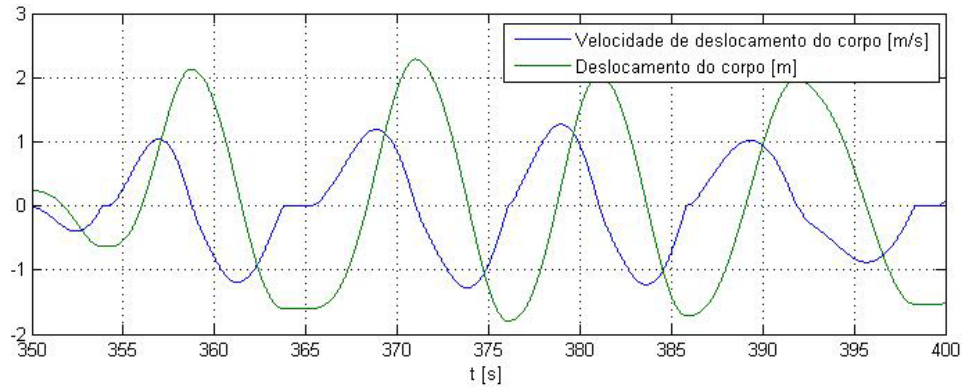


Figura 5.12 – Variação da velocidade de deslocamento para $H_s=4\text{m}$; $T_e=11\text{s}$.

5.2.1.4 Pressões

Para que exista pressão no circuito hidráulico, terá que haver resistência à passagem do caudal gerado pelo movimento do cilindro hidráulico, de modo a que se estabeleça o efeito de compressibilidade (3.35). Desprezando-se o diâmetro e o comprimento das condutas, o aumento da pressão no circuito hidráulico só se fará sentir em duas circunstâncias:

- Quando a pressão no acumulador for superior à pressão nos cilindros (3.38) à (3.41);
- Quando na ausência de acumulador existir controlo sobre o Binário electromagnético de forma a aumentar o seu valor para valores superiores ao binário mecânico fornecido pelo motor hidráulico (3.56).

Deste modo teriam que ser considerados dois tipos de pressão neste sistema hidráulico, a pressão do sistema relativa à diferença de pressão entre as câmaras do cilindro hidráulico (3.36) e (3.37) a pressão do sistema relativa à diferença de pressão entre o acumulador e a pressão no reservatório (3.53). Enquanto a pressão no sistema for superior à pressão de carregamento do Acumulador (Pré-carga) o valor da pressão no sistema hidráulico é determinado pela diferença de pressão entre o acumulador e o reservatório, não sendo igual à diferença de pressão entre as câmaras dos cilindros por motivos de compressibilidade. Se porventura o valor da pressão do sistema for inferior à pré-carga, o que implica a inexistência de óleo no interior do acumulador, a pressão do sistema é determinada pela diferença de pressão entre as câmaras do cilindro hidráulico e imposta pelo binário electromecânico por variação do caudal consumido pelo motor, função da velocidade de rotação do veio.

Como não foram estabelecidas metodologias de controlo para o gerador através da utilização de conversores electrónicos de potência, considerou-se no regime de funcionamento do PTO o acumulador sempre activo. Deste modo realizaram-se diversas simulações, entre as quais as que se apresentam nas condições 1 e 2 da Tabela 5.1 de forma a que o valor da pressão do

acumulador (P_{acc}) nunca fosse inferior à pressão de carregamento ou pré-carga (P_0). Poder-se-á mencionar que a pré-carga corresponde ao valor de pressão para o qual se inicia o regime de trabalho do acumulador.

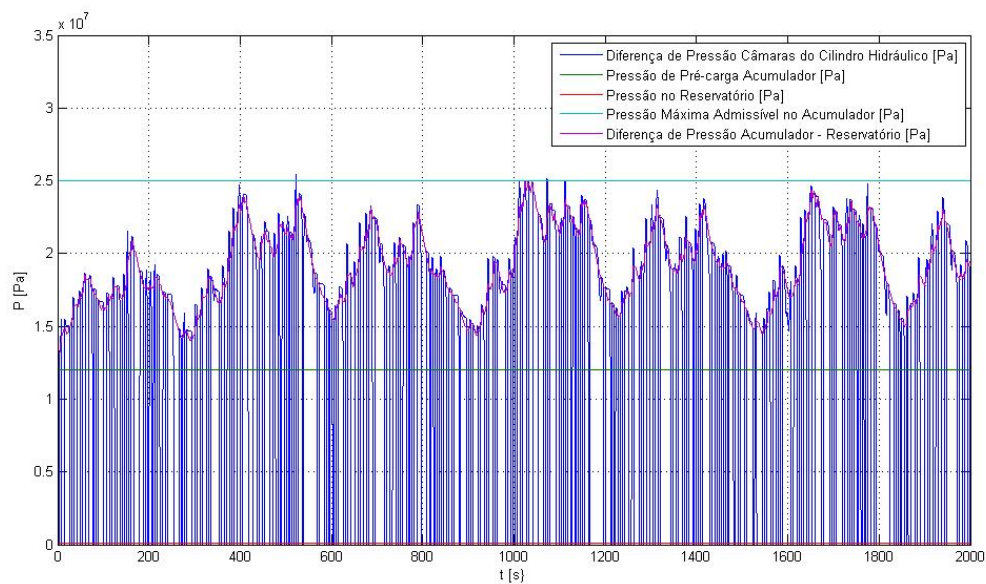


Figura 5.13 – Variação de pressão para $H_s=4m$; $T_e=11s$.

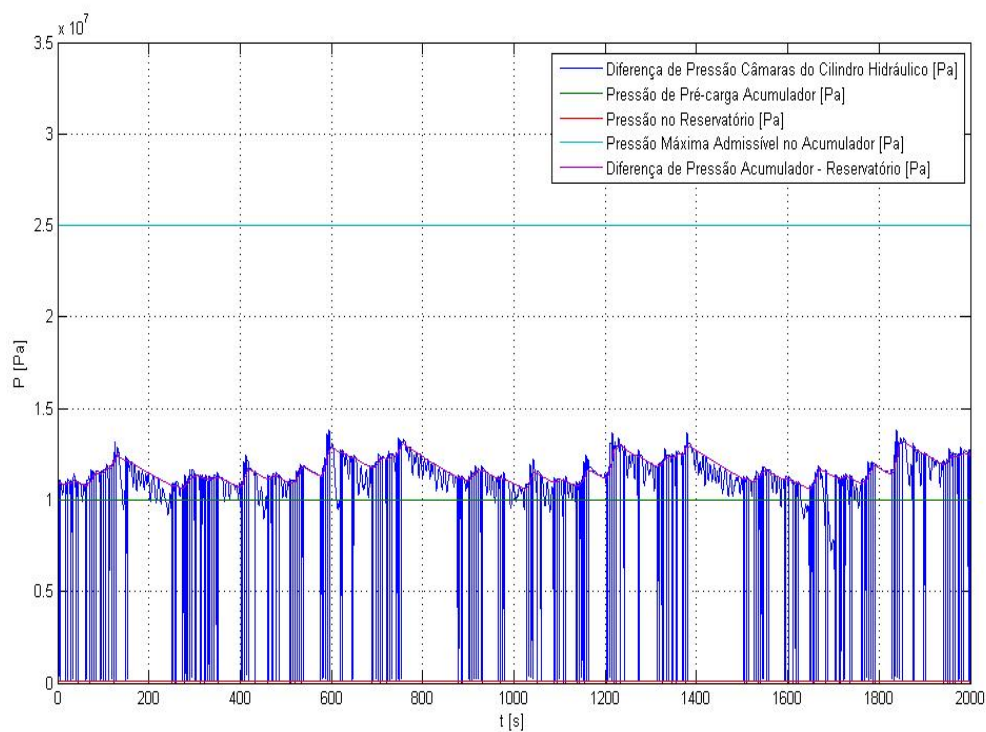


Figura 5.14 – Variação de pressão para $H_s=2m$; $T_e=8s$.

Verificou-se que a selecção correcta da pré-carga (P_0) pode implicar ganhos relativos à estabilidade da onda de potência mecânica do motor hidráulico (P_m) e eléctrica do gerador (P_e) e por conseguinte respectivo aumento do valor médio.

Tabela 5.3 – Resultados da pressão do acumulador, potência mecânica do motor hidráulicos e potência do gerador eléctrico para variações da pressão de carregamento com um estado de mar $H_s=4m$ $T_e=11s$.

		Scc=50MVA					
		$P_0=100e5$ [Pa]		$P_0=120e5$ [Pa]		$P_0=140e5$ [Pa]	
		Média	Máximo	Média	Máximo	Média	Máximo
Condição 1	P_{acc} [Pa]	1,90E+07	2,50E+07	1,92E+07	2,50E+07	1,94E+07	2,42E+07
	P_e [kW]	143,65	189,3	145,39	189,27	146,34	183,04
	P_m [kW]	153	202,17	154,84	202,17	195,41	195,41

5.2.1.5 Caudais

Os caudais existentes no circuito hidráulico são dependentes da velocidade (3.38) à (3.41). O caudal gerado pelo cilindro é dependente da velocidade de deslocamento do corpo do flutuador e o caudal volúmico do motor é dependente da velocidade de rotação do veio motor gerador. O caudal de óleo do acumulador é o resultado da soma dos caudais gerados com o caudal consumido (3.51). No instante de tempo que a velocidade de deslocamento do corpo é igual a zero, os caudais gerados pelo cilindro também são iguais a zero, no entanto não implica que o caudal no acumulador tenha que ser igual a zero, como se verifica para o instante de tempo superior a 200s, Figura 5.15, e 550s, Figura 5.17. Nestes instantes, o caudal proveniente dos cilindros é nulo, no entanto o acumulador encontra-se a descarregar caudal para o motor que gere o seu consumo por imposição da cilindrada do motor.

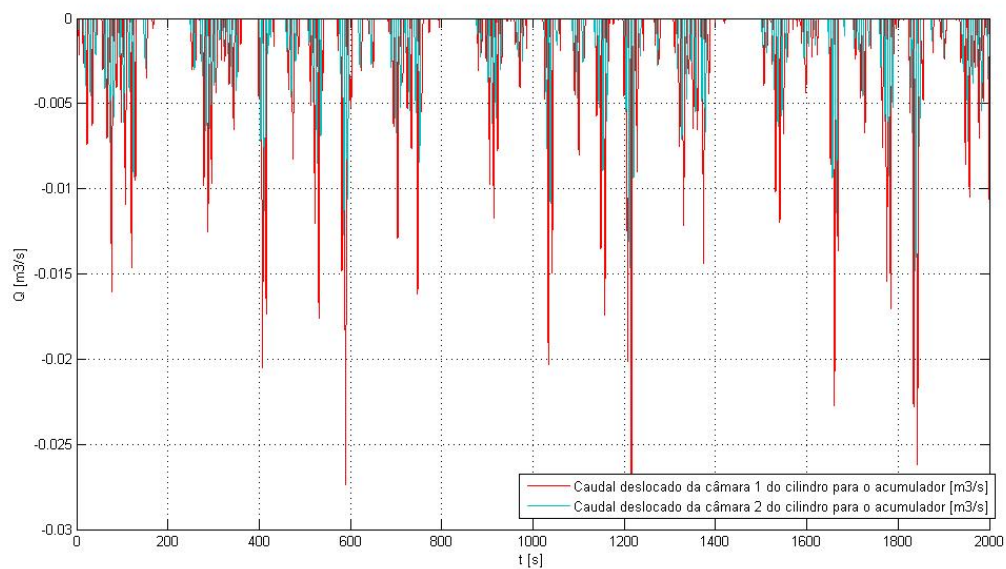


Figura 5.15 – Variação do caudal deslocado da câmara 1 e 2 para o cilindro do acumulador para $H_s=2\text{m}; T_e=8\text{s}$.

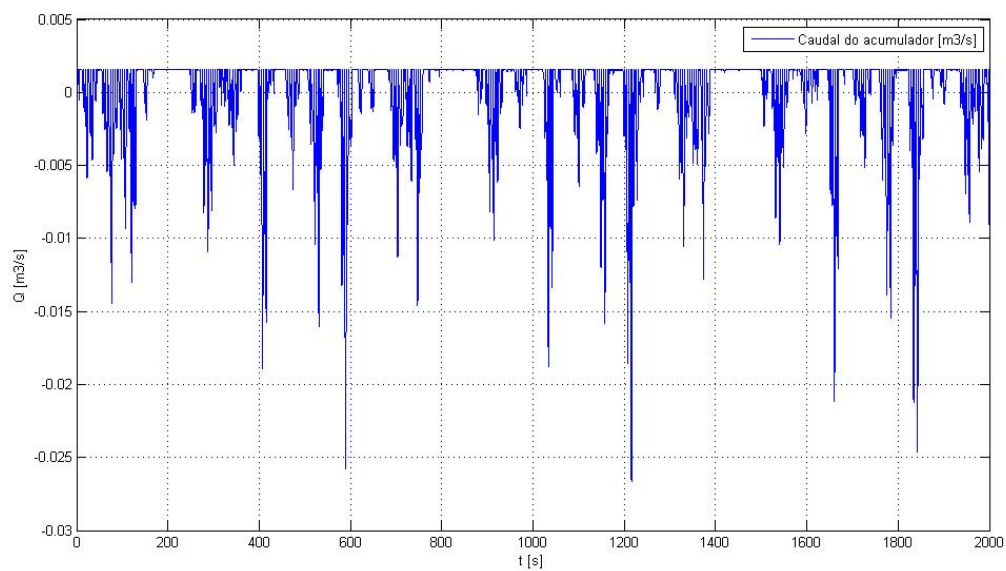


Figura 5.16 – Variação do caudal do acumulador para $H_s=2\text{m}; T_e=8\text{s}$.

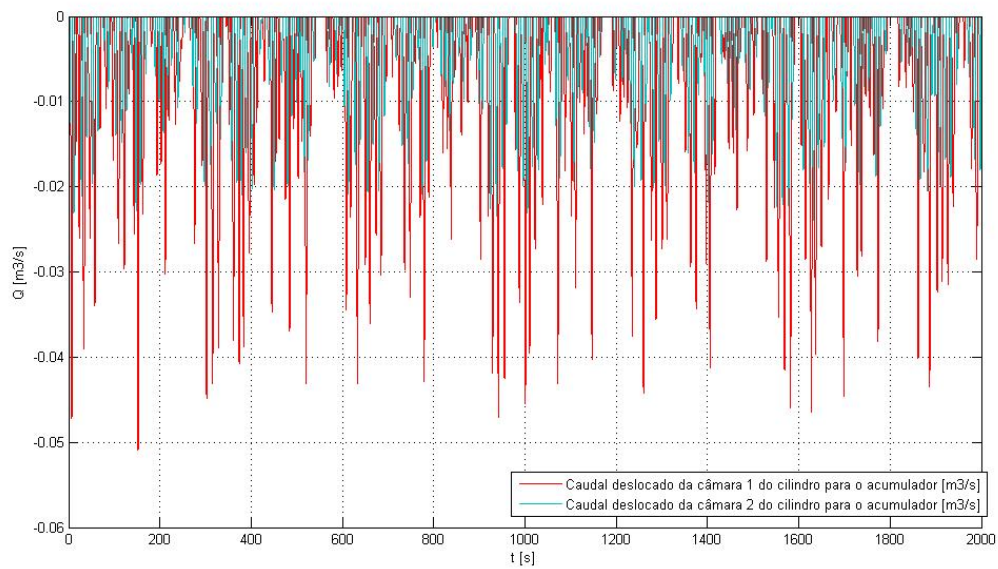


Figura 5.17 – Variação do caudal deslocado da câmara 1 e 2 para o cilindro do acumulador para $H_s=4\text{m}; T_e=11\text{s}$.

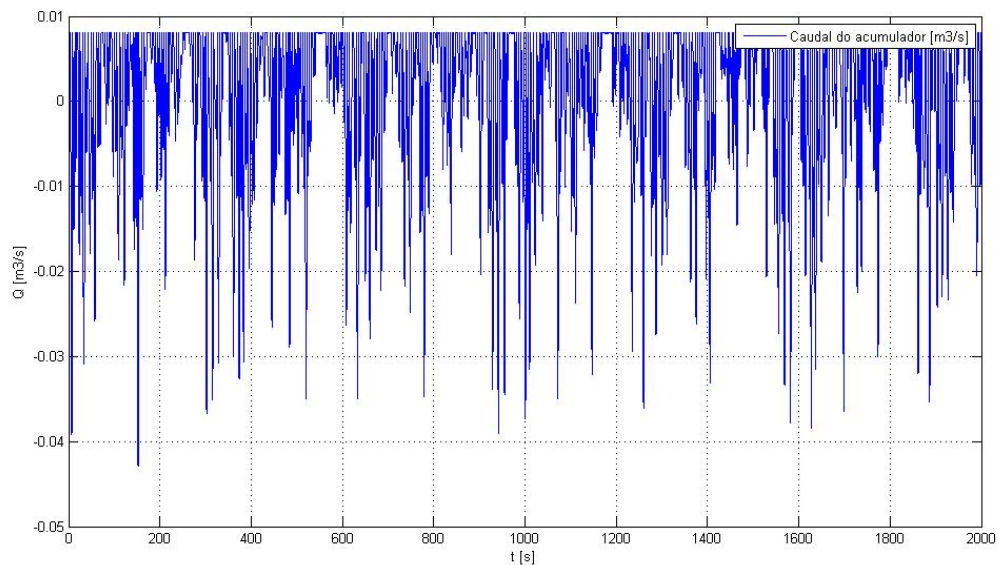


Figura 5.18 – Variação do caudal do acumulador para $H_s=4\text{m}; T_e=11\text{s}$.

Dos gráficos a seguir apresentados regista-se que a soma dos caudais médios gerados em módulo ($0.0017\text{m}^3/\text{s}$) são aproximadamente iguais ao caudal médio consumido pelo motor ($0.0016\text{m}^3/\text{s}$), desprezando-se praticamente as variações médias do caudal em módulo armazenado no acumulador ($8.5629\text{e-}005\text{m}^3/\text{s}$).

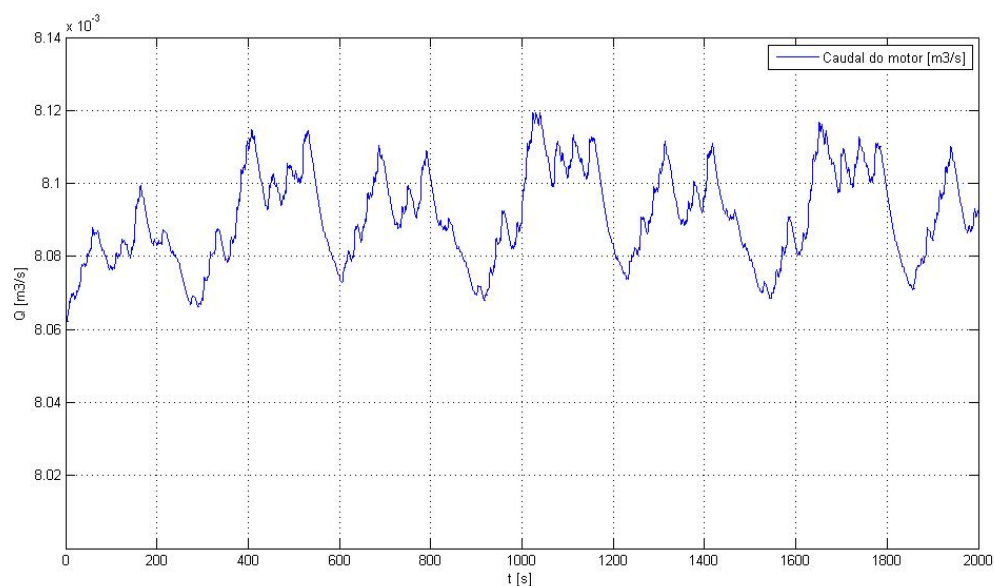


Figura 5.19 – Variação do caudal do motor para $H_s=4\text{m}$; $T_e=11\text{s}$.

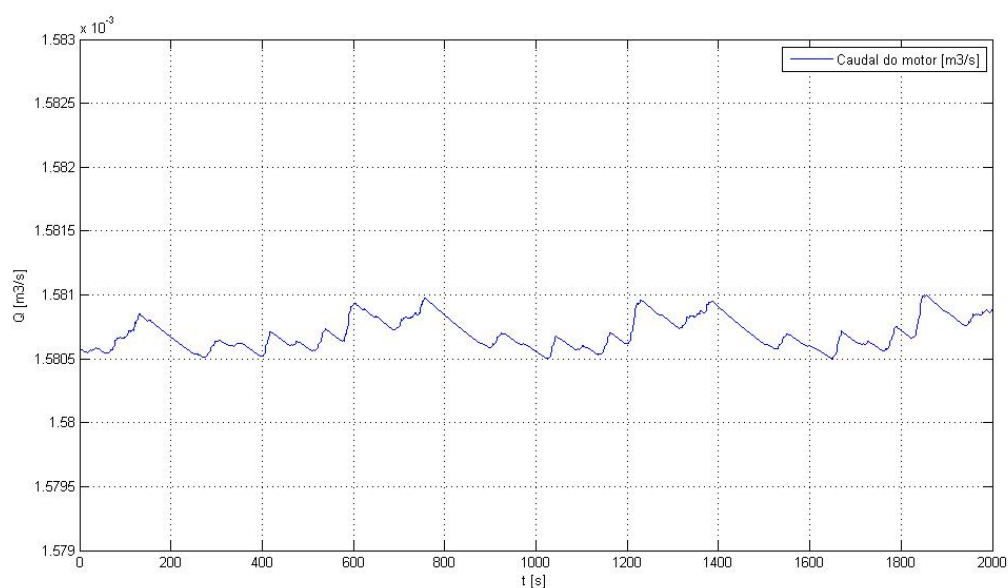


Figura 5.20 – Variação do caudal do motor para $H_s=2\text{m}$; $T_e=8\text{s}$.

Para estados de mar mais energéticos os valores dos caudais do motor ($0,0081\text{m}^3/\text{s}$), continuam como não podia deixar de ser, aproximadamente iguais aos caudais médios gerados ($0,0083\text{m}^3/\text{s}$), no entanto regista-se uma maior variação do caudal do motor ao longo do tempo. Enquanto que para estados de mar menos energéticos o caudal do motor permanecia praticamente constante com variações aproximadamente iguais a $0,0005\text{m}^3/\text{s}$, em estados de mar

mais energéticos o mesmo não se sucede. Verifica-se que a diferença entre variações de caudais para estados de mar mais energéticos num determinado instante de tempo (100s) chega a ser 100 vezes superiores aos registados em estados de mar menos energéticos.

Esta variação é o reflexo não só do estado de mar, como também da variação da cilindrada do motor de $6,5^\circ$ para 35° . Considerando o motor com 160cm^3 e por conseguinte à cilindrada máxima, a variação do ângulo da cilindrada pode representar um acréscimo 5 vezes superior, relativamente ao que se obtinha para a cilindrada mínima (aprox. 32cm^3).

5.2.1.6 Volume de Energia Armazenado

Considerando o volume total do acumulador especificado, constante, nas duas condições de teste, comprova-se que o volume de óleo no acumulador aumenta por aumento do caudal gerado.

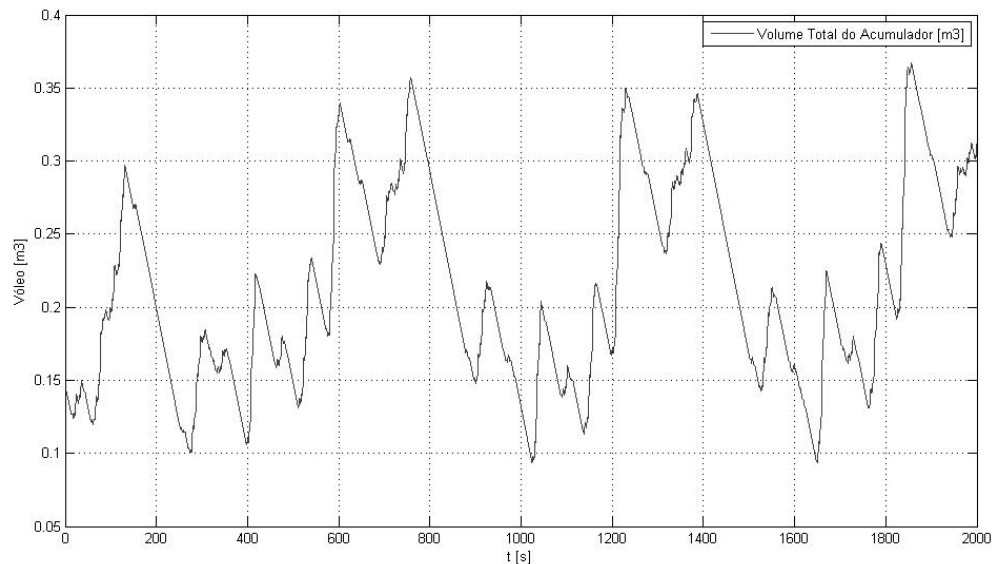


Figura 5.21 – Variação do volume de óleo no acumulador para $H_s=2\text{m}$; $T_e=8\text{s}$.

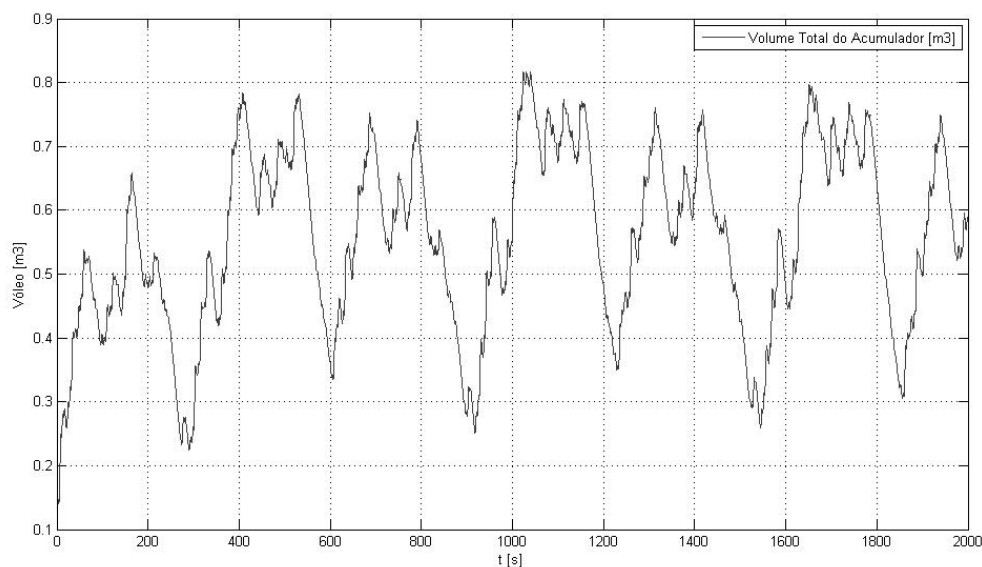


Figura 5.22 – Variação do volume de óleo no acumulador para $H_s=4\text{m}$; $T_e=11\text{s}$.

Aumentando o volume total do acumulador e considerando constante a pré-carga para um instante de tempo de 500 s, verifica-se que os valores máximos e médios do volume de óleo no acumulador aumenta, reflectindo-se numa diminuição dos valores máximos e médios da potência mecânica e potência eléctrica por diminuição da pressão do sistema.

Tabela 5.4 – Resultados do Volume de óleo armazenado no acumulador, Potência mecânica fornecida pelo motor hidráulico e potência eléctrica gerada pela máquina assíncrona por variação do volume total do acumulador.

		$S_{cc}=50\text{MVA}$					
		$V=1 \text{ [m}^3\text{]}$		$V=2 \text{ [m}^3\text{]}$		$V=3 \text{ [m}^3\text{]}$	
		Média	Máximo	Média	Máximo	Média	Máximo
Condição 1	$V_{\text{óleo}} \text{ [m}^3\text{]}$	0,32	0,48	0,62	0,95	0,8	1,21
	$P_e \text{ [kW]}$	135,14	189,39	130,42	187,54	118,39	156,44
	$P_m \text{ [kW]}$	143,97	202,18	138,91	200,31	126,09	166,6

5.2.1.7 Potências

Para estados de mar menos energéticos o valor da potência média produzida pelo gerador eléctrico situa-se próximo de 14 kW e para estados de mar mais energéticos na ordem de 145 kW, com valores de pico 1,3 a 1,7 vezes superiores ao valor médio.

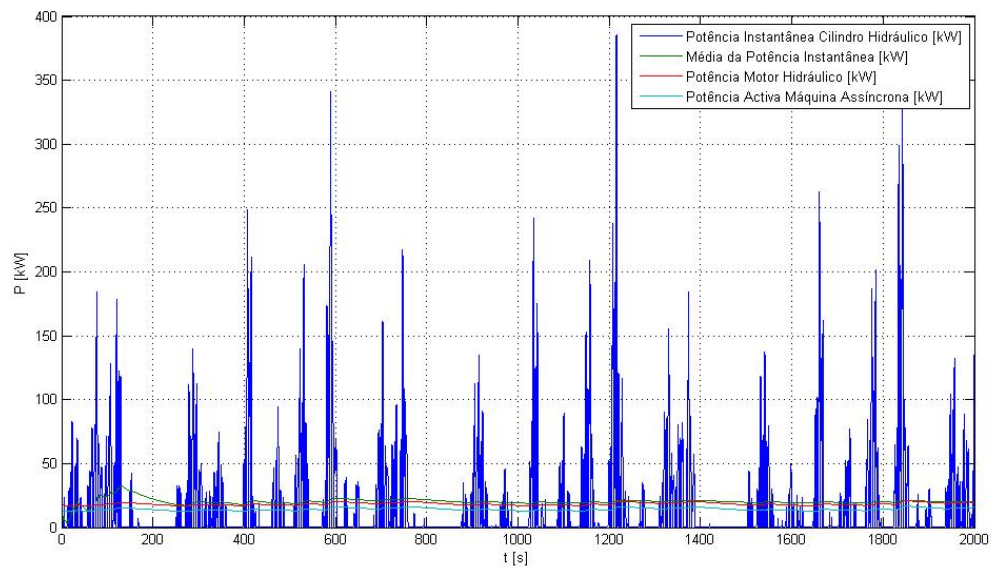


Figura 5.23 – Evolução das Potências (activa da máquina assíncrona, motor hidráulico e cilindro hidráulico) para $H_s=2\text{m}$; $T_e=8\text{s}$.

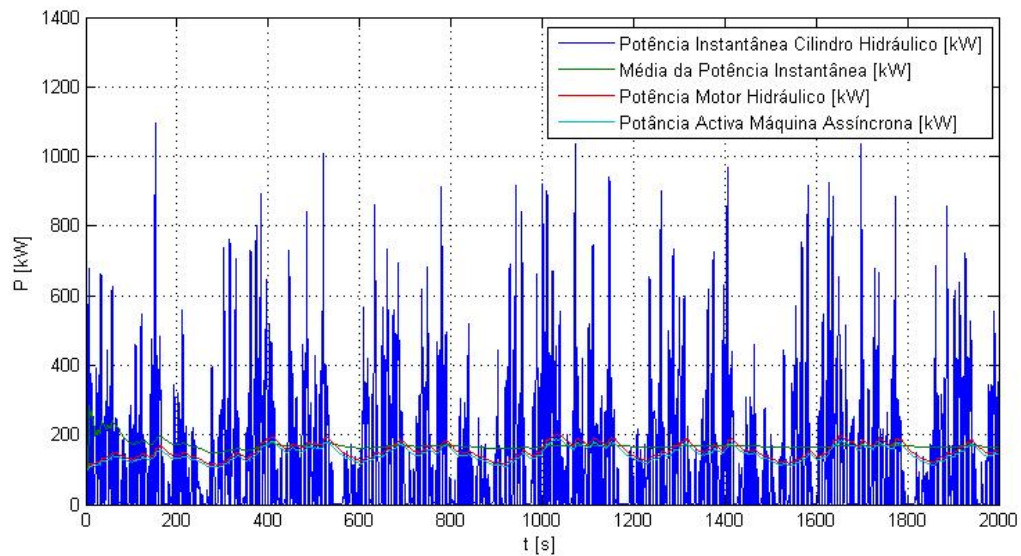


Figura 5.24 – Evolução das Potências (activa da máquina assíncrona, motor hidráulico e cilindro hidráulico) para $H_s=4\text{m}$; $T_e=11\text{s}$.

Tabela 5.5 – Resultados da potência mecânica gerada pelo cilindro hidráulico, da potência eléctrica da máquina assíncrona e da potência mecânica do motor hidráulico durante para 2000s de simulação com um estado de mar $H_s=4\text{m}$ e $T_e=11\text{s}$.

		$S_{cc}=50\text{MVA}$	
		Média	Máximo
Condição 1	P_{cil} [kW]	167	1100
	P_e [kW]	145	189
	P_m [kW]	155	202
Condição 2	P_{cil} [kW]	21	386
	P_e [kW]	14	25
	P_m [kW]	18	21

Com os resultados obtidos poder-se-á dizer que a eficiência de conversão em termos de valores médios situa entre os 60% e os 86%.

5.2.2 Tensão Eléctrica nos Barramentos 3 e 5

Do ponto de vista da rede eléctrica na análise do conversor de energia das ondas considerou-se inicialmente uma potência de curto-circuito de 50MVA, tendo-se registado valores da tensão no barramento do gerador eléctrico (barramento 3) na ordem de 1,0197 p.u. e no barramento da carga eléctrica (barramento 5) considerada de 1,014 p.u.. Ambos os valores poder-se-ão considerar praticamente constantes não se tendo verificado que este conversor tenha qualquer impacto no valor das tensões em condições de estados de mar menos energéticos.

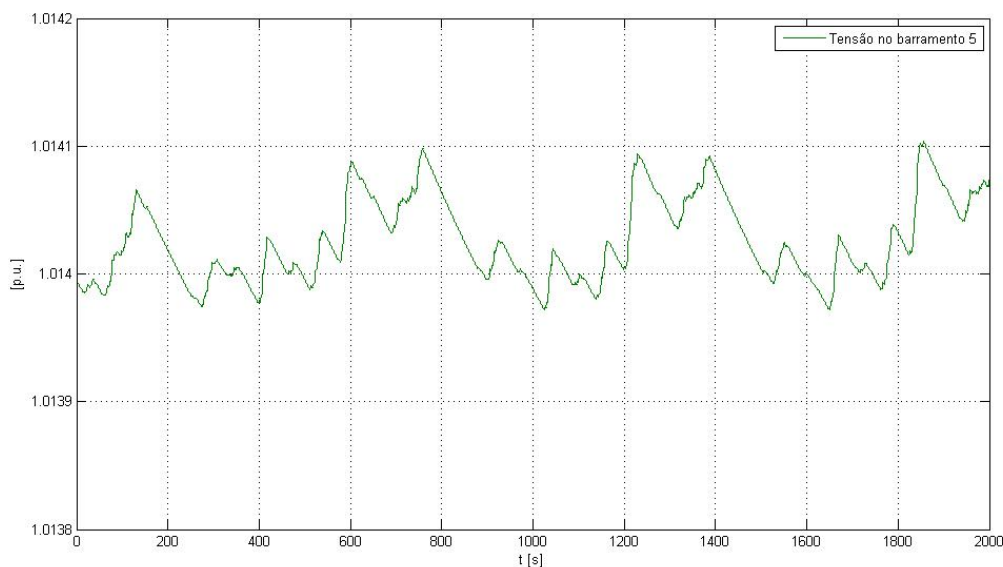


Figura 5.25 – Evolução da tensão no barramento 5, para $H_s=2\text{m}$; $T_e=8\text{s}$.

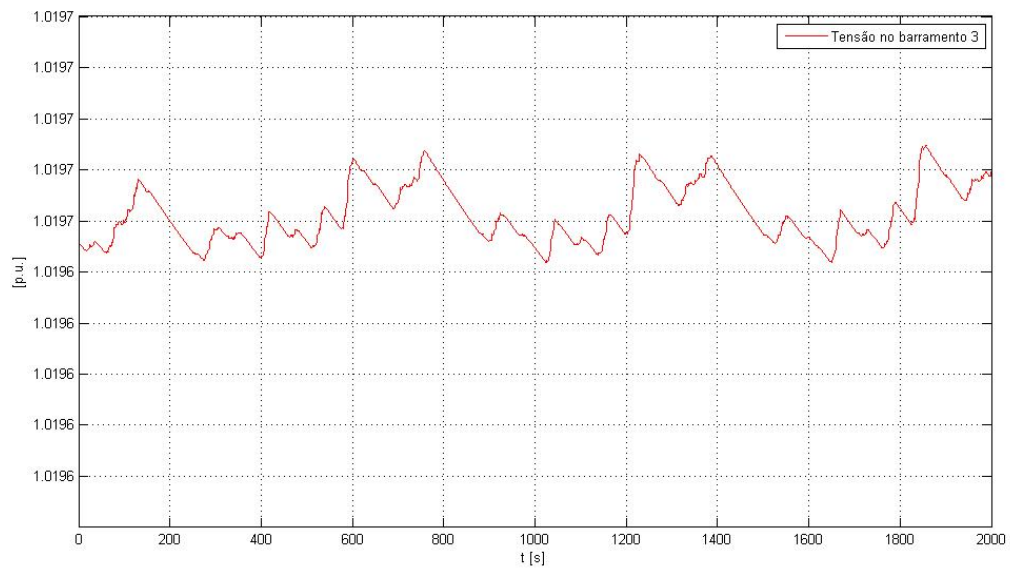


Figura 5.26 – Evolução da tensão no barramento 3, para $H_s=2m$; $T_e=8s$.

Já no que diz respeito ao estado mais energético registam-se variações de 0,0014 p.u. a 0,0009 p.u. nos barramentos 3 e 5.

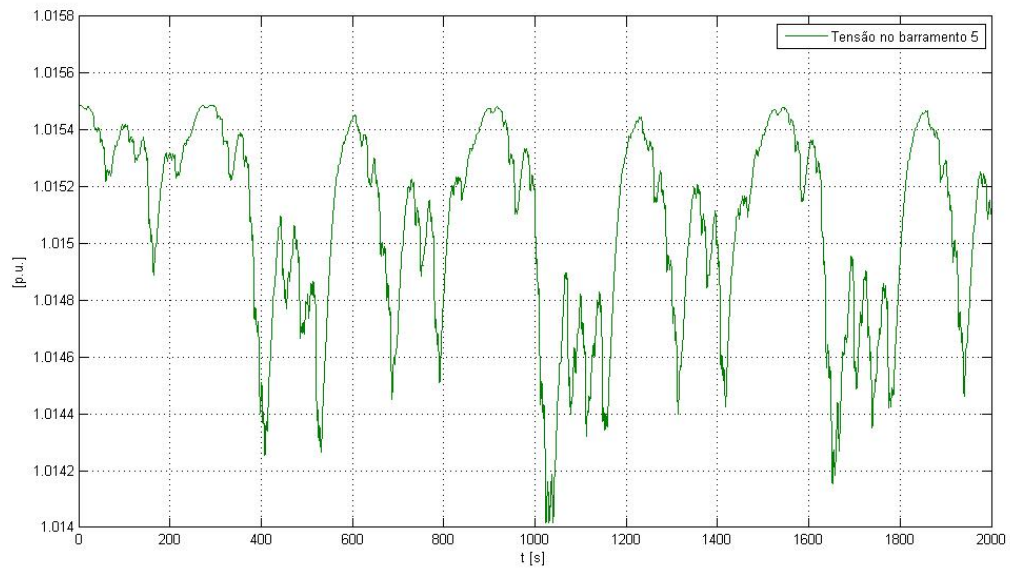


Figura 5.27 – Evolução da tensão no barramento 5, para $H_s=4m$; $T_e=11s$.

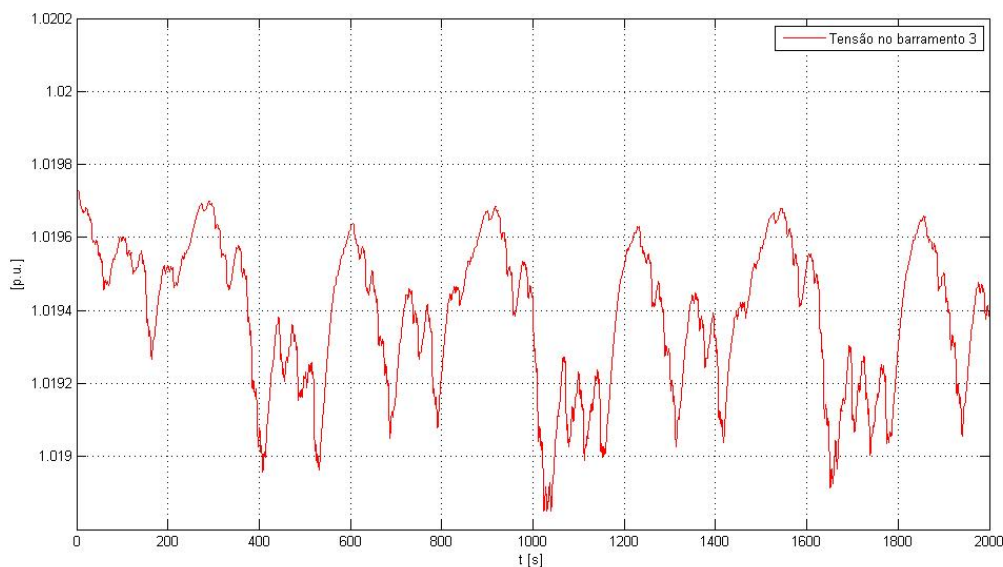


Figura 5.28 – Evolução da tensão no barramento 3, para $H_s=4m$; $T_e=11s$.

O que se conclui que um simples conversor com estas características e para estes estados de mar ligado a uma rede no qual o ponto de recepção se caracteriza por uma potência de curto-circuito de 50 MVA não apresenta qualquer impacto nos limites de integração estabelecidos pelo operador de Rede Eléctrica. Esta conclusão têm como referência que o limite das variações de tensão em regime estacionário para Portugal se regem pela relação $(1/R)$. Onde R é o quociente entre a potência de curto-circuito e a potência aparente nominal da máquina.

Tabela 5.6 – Resultados das tensões nos barramentos 3 e 5, potência eléctrica activa e reactiva da máquina assíncrona para diferentes valores da S_{cc} e sobre condições de teste 1 e 2.

		Scc=1MVA			Scc=10MVA			Scc=50MVA		
		Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo
Condição 1	V3 [p.u.]	0,9923	1,0167	0,9758	1,0178	1,0191	1,0167	1,0195	1,0198	1,0193
	V5 [p.u.]	0,9882	1,0123	0,9715	1,0136	1,0147	1,0123	1,0153	1,0155	1,0149
	Pe [kW]	145,31	188,50	38,08	145,14	189,23	26,79	145,39	189,27	24,87
	Qe [kVAr]	69,31	83,64	48,43	70,87	84,92	45,99	71,07	85,04	45,37
Condição 2	V3 [p.u.]	1,0180	1,0206	1,0177	1,0196	1,0200	1,0196	1,0197	1,0198	1,0197
	V5 [p.u.]	1,0124	1,0154	1,0122	1,0139	1,0148	1,0139	1,0140	1,0146	1,0140
	Pe [kW]	14,25	38,08	0,95	14,20	26,79	8,36	14,23	24,87	9,27
	Qe [kVAr]	49,59	50,03	47,14	49,74	49,92	45,99	49,75	49,89	45,37

Tendo presente as condições de teste 1 e 2 descritas na tabela 5.1 e variando a potência de curto-circuito do ponto de recepção, para valores menores à potência de curto-circuito de 50MVA, verificou-se que o impacto na variação de tensão apenas terá expressão para redes eléctricas muito fracas. O mesmo será dizer, redes eléctricas que apresentam uma relação de $\frac{1}{4}$. Note-se que mesmo nestas circunstâncias, só para condições de estados de mar mais energéticos é que a variação de tensão se aproxima dos limites estabelecidos, como se apresenta na tabela (5.6) a sombreado. Por último destaca-se o elevado consumo da potência versus potência activa produzida em condições de estados de mar menos energéticos (Condição 2).

5.3 Operação de Parques de Ondas

De forma avaliar o desempenho de um parque de ondas, considerou-se que os conversores de energia das ondas estavam sujeitos às condições de teste da Tabela 5.1 e dispostos de acordo com as diferentes topologias da rede estudadas (Série e Paralelo) com características do ponto de recepção diferentes (2MVA, 10MVA e 50MVA). Os resultados que a seguir se apresentam para potências de curto-circuito de 10 MVA e 50 MVA, têm presentes por figura, a comparação das potências activas e reactivas totais do conjunto de máquinas, assim como os valores das tensões nos barramentos 5, 7, 9, 11 ligadas em série e paralelo

- Condição de Teste 1 com $S_{cc}=10\text{MVA}$ e ligações série e paralelo

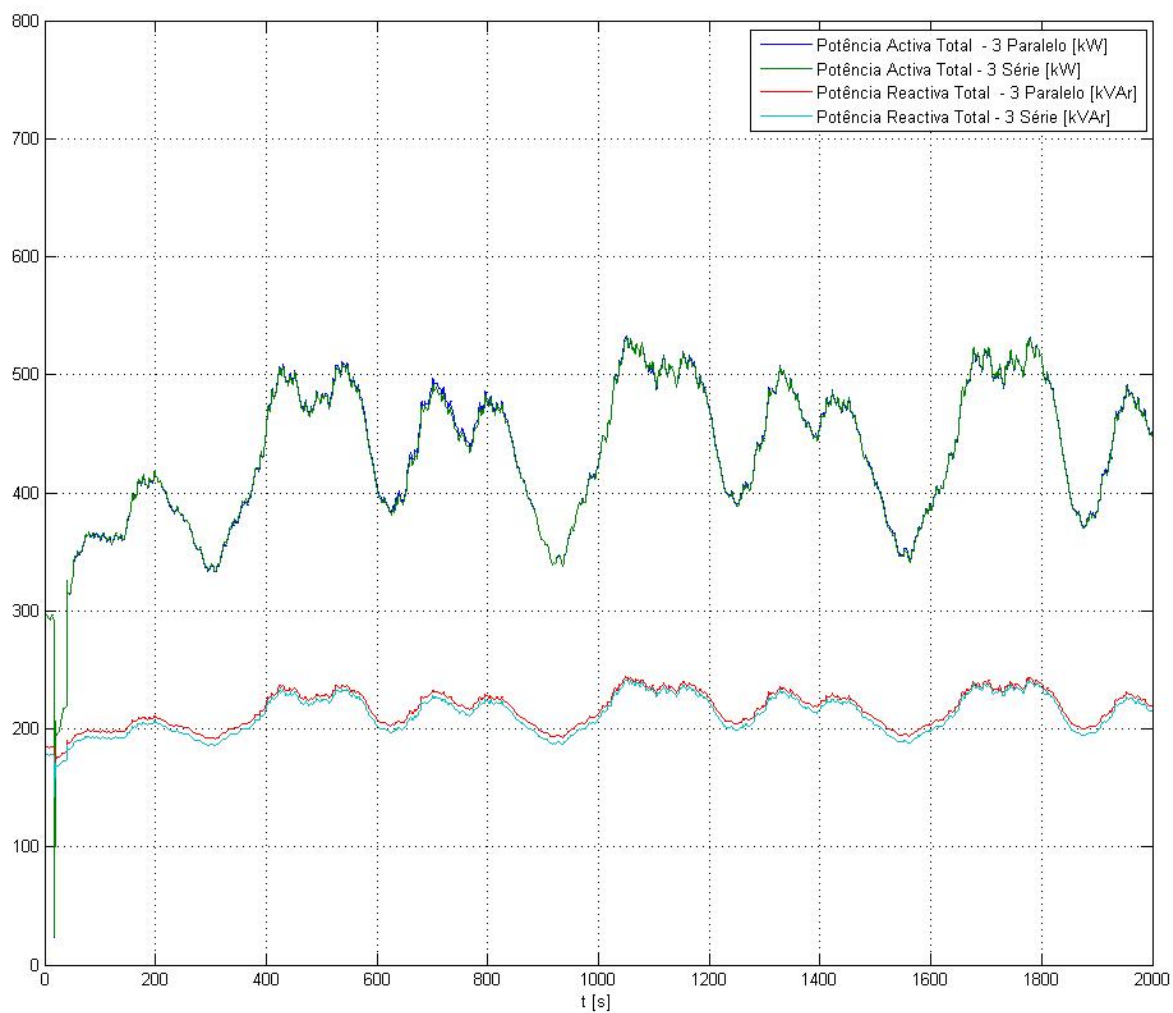


Figura 5.29 – Evolução da Potência Activa e Reactiva para os casos da associação série e paralelo das máquinas para $S_{cc}=10\text{MVA}$.

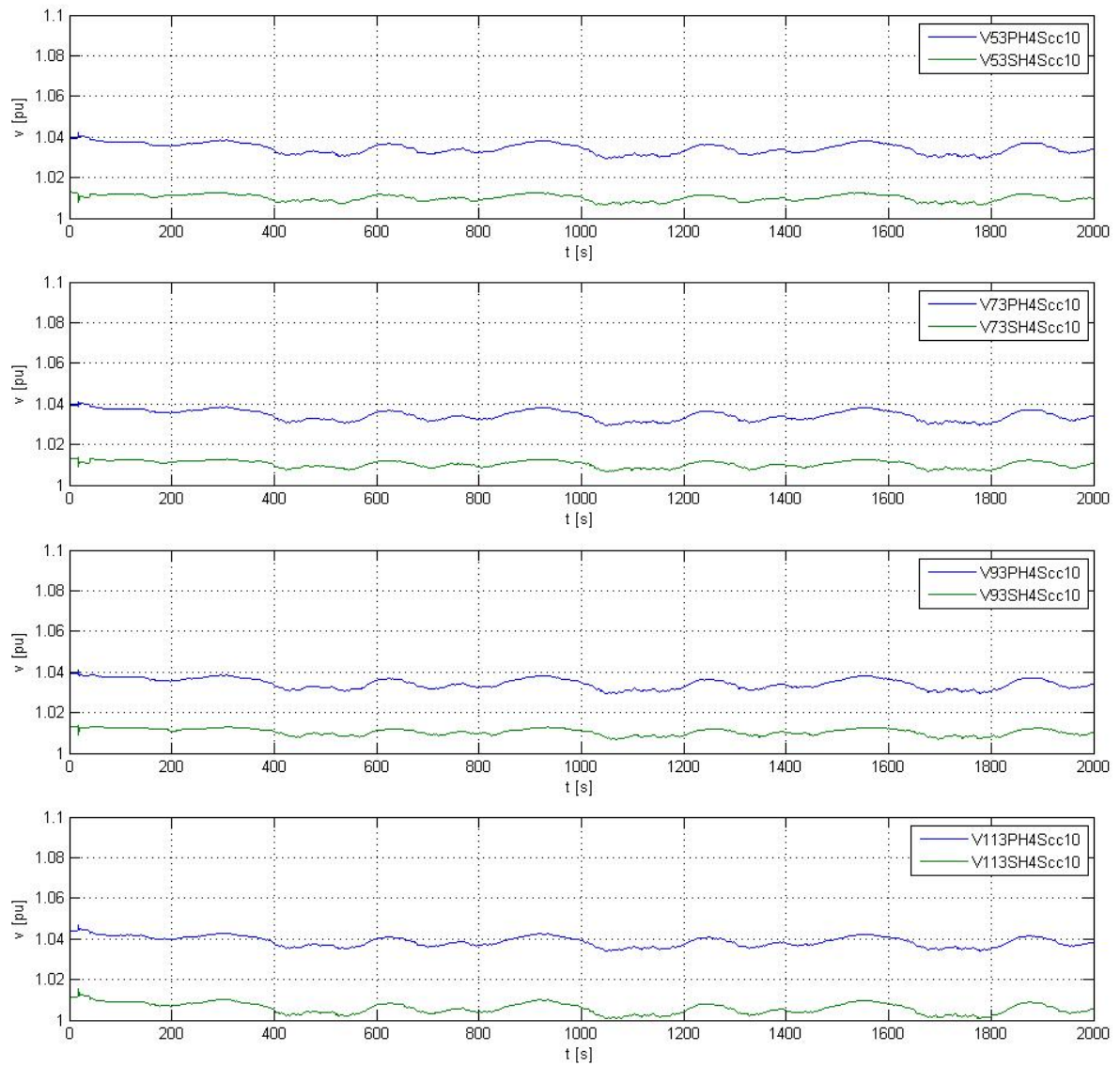


Figura 5.30 – Evolução da tensão nos barramentos 5, 7, 9, 11 para os casos da associação série e paralelo das máquinas para $S_{cc}=10\text{MVA}$.

- **Condição de Teste 2 com $S_{cc}=10\text{MVA}$ e ligações série e paralelo**

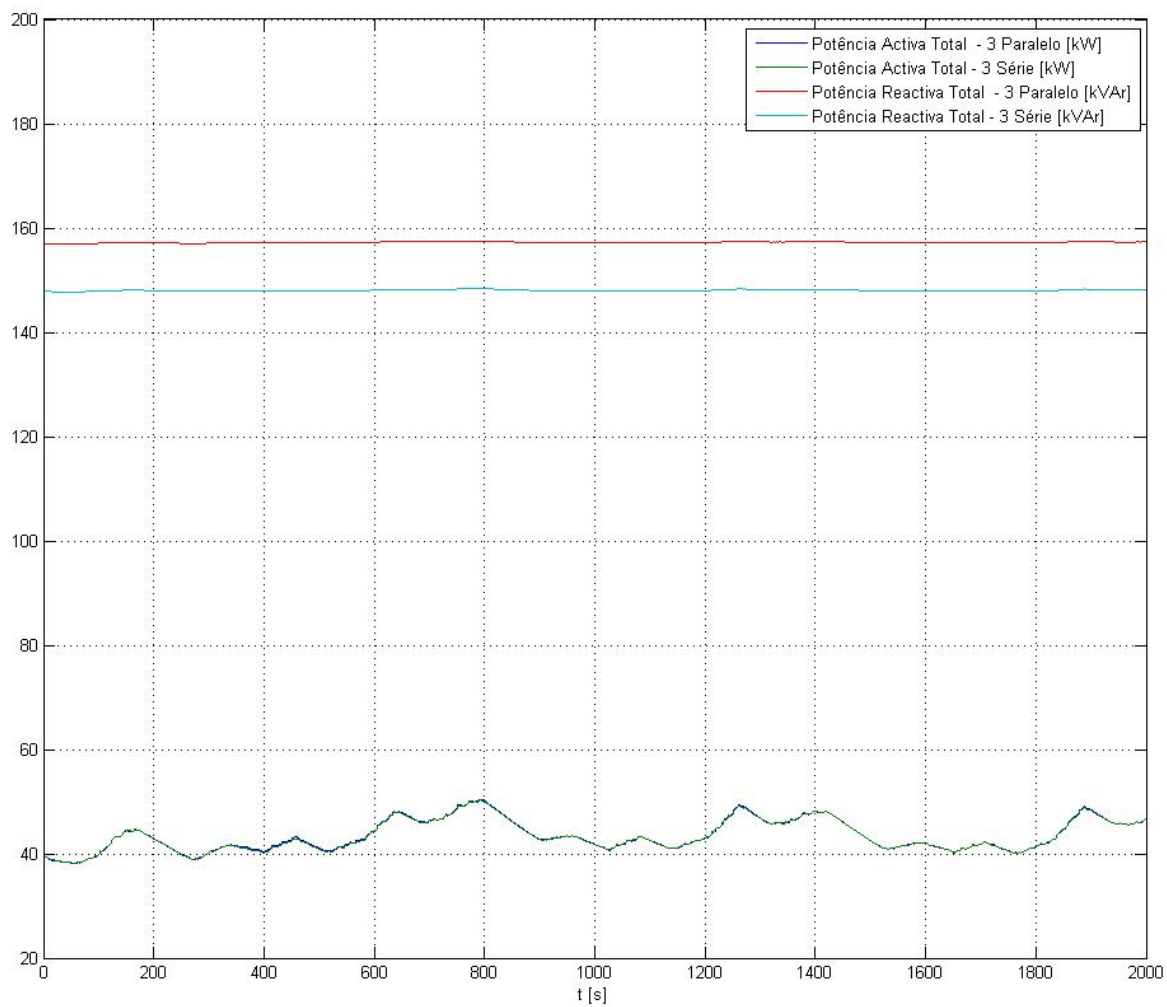


Figura 5.31 – Evolução da Potência Ativa e Reactiva para os casos da associação série e paralelo das máquinas e das condições 2.

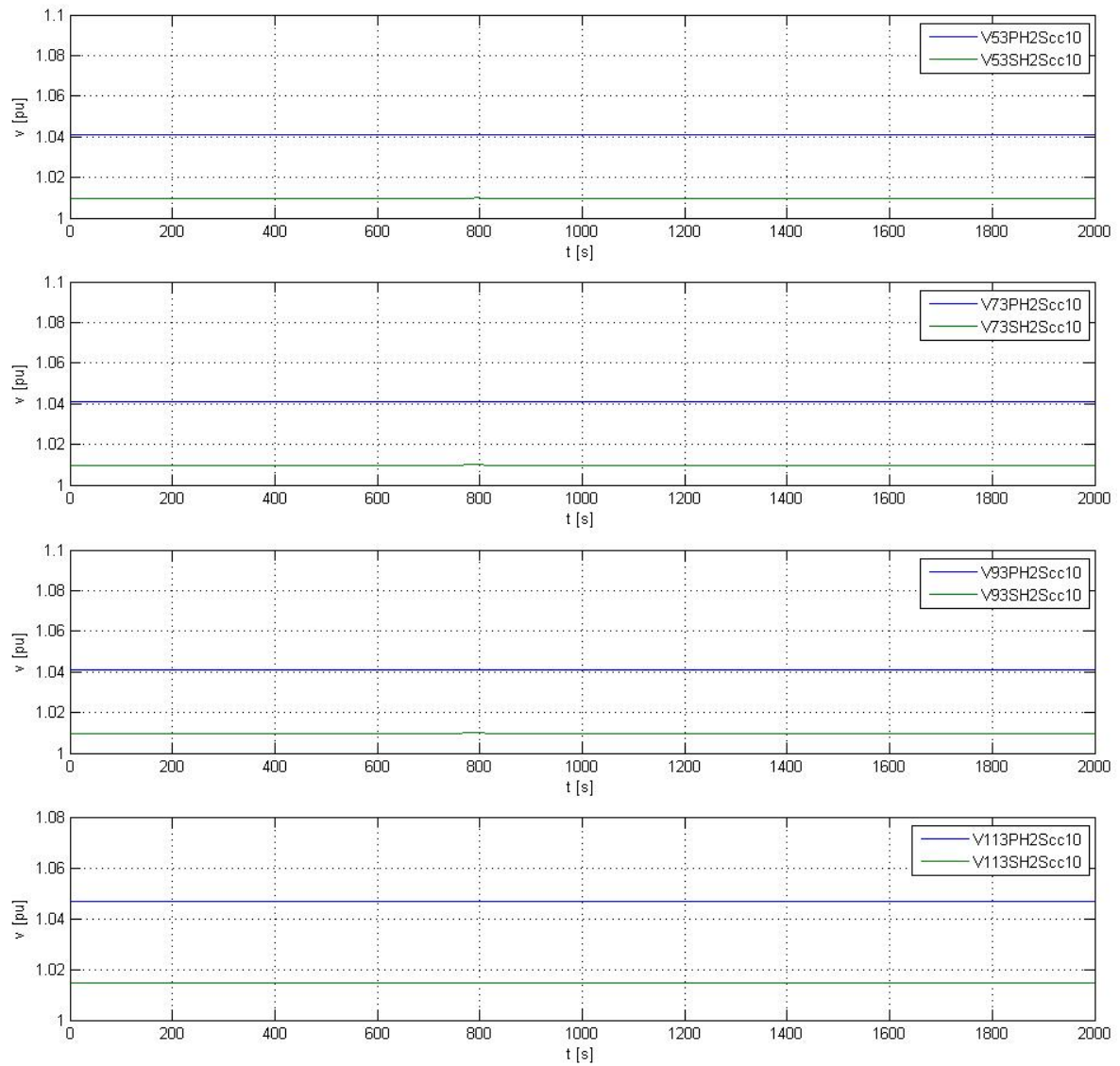


Figura 5.32 – Evolução da tensão nos barramentos 5, 7, 9, 11 para os casos da associação série e paralelo das máquinas e das condições 2.

- **Condição de Teste 1 com $S_{cc}=50\text{MVA}$ e ligações série e paralelo**

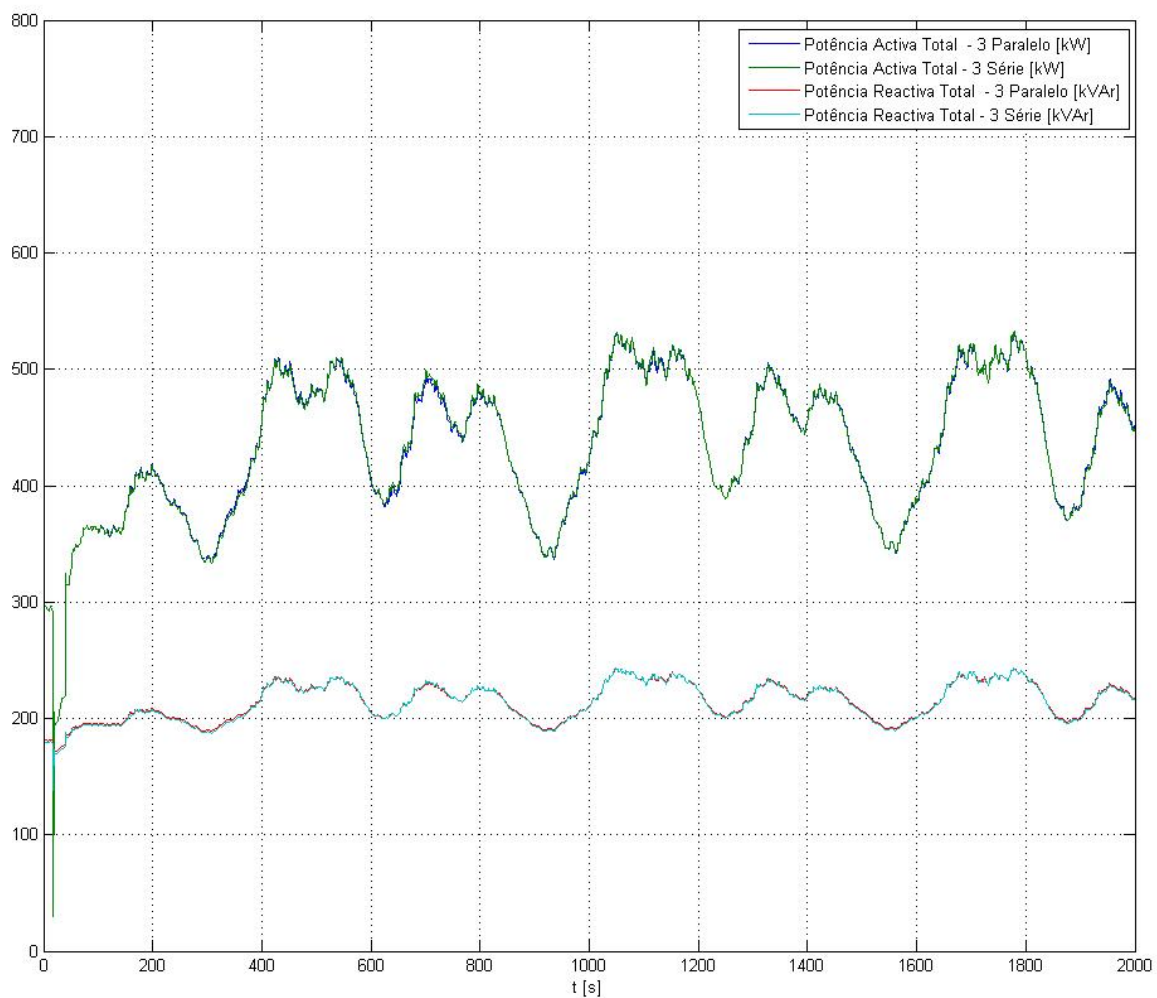


Figura 5.33 – Evolução da Potência Activa e Reactiva para os casos da associação série e paralelo das máquinas e das condições 3.

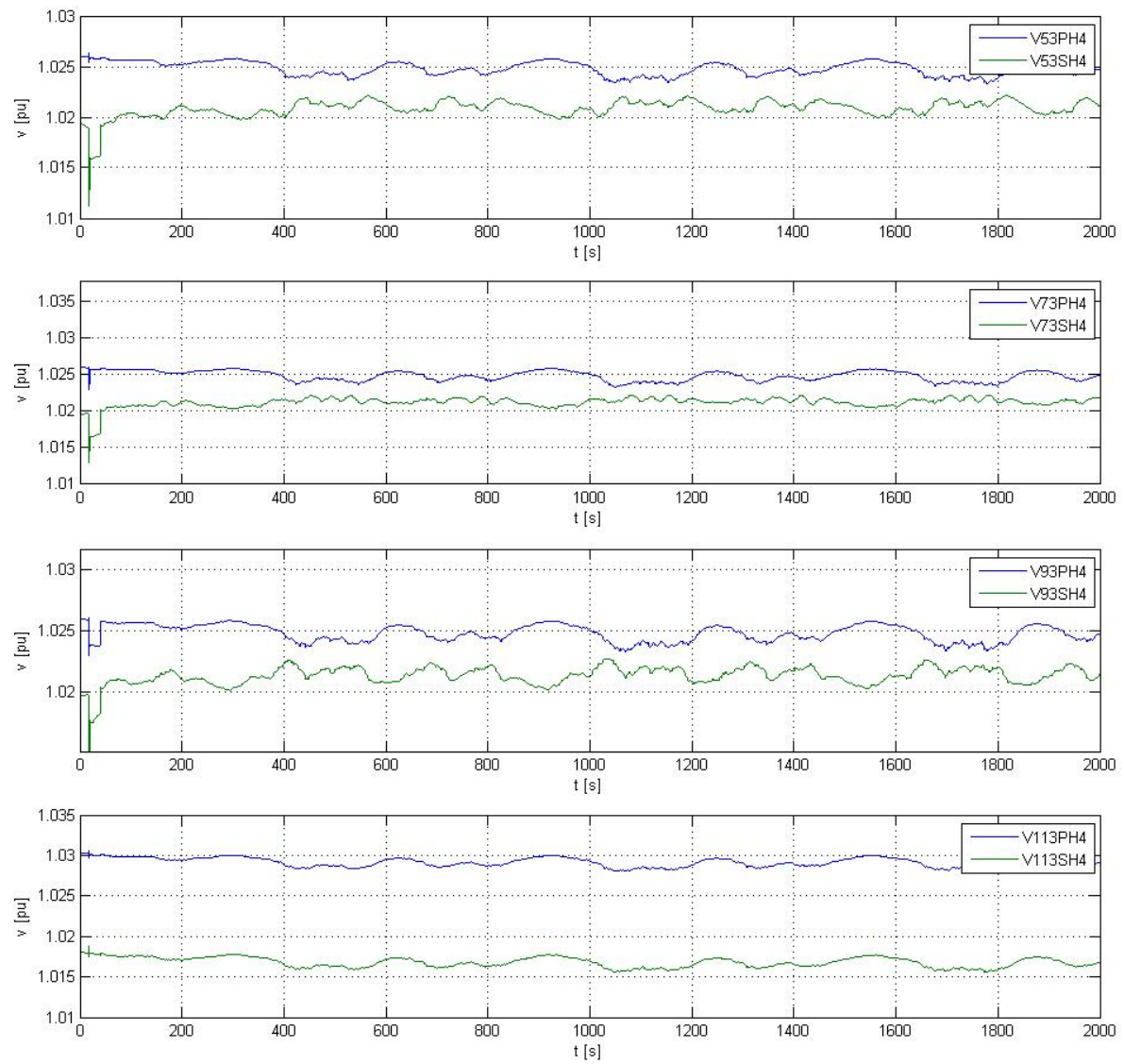


Figura 5.34 – Evolução da tensão nos barramentos 5, 7, 9, 11 para os casos da associação série e paralelo das máquinas e das condições 3.

- **Condição de Teste 2 com $S_{cc}=50\text{MVA}$ e ligações série e paralelo**

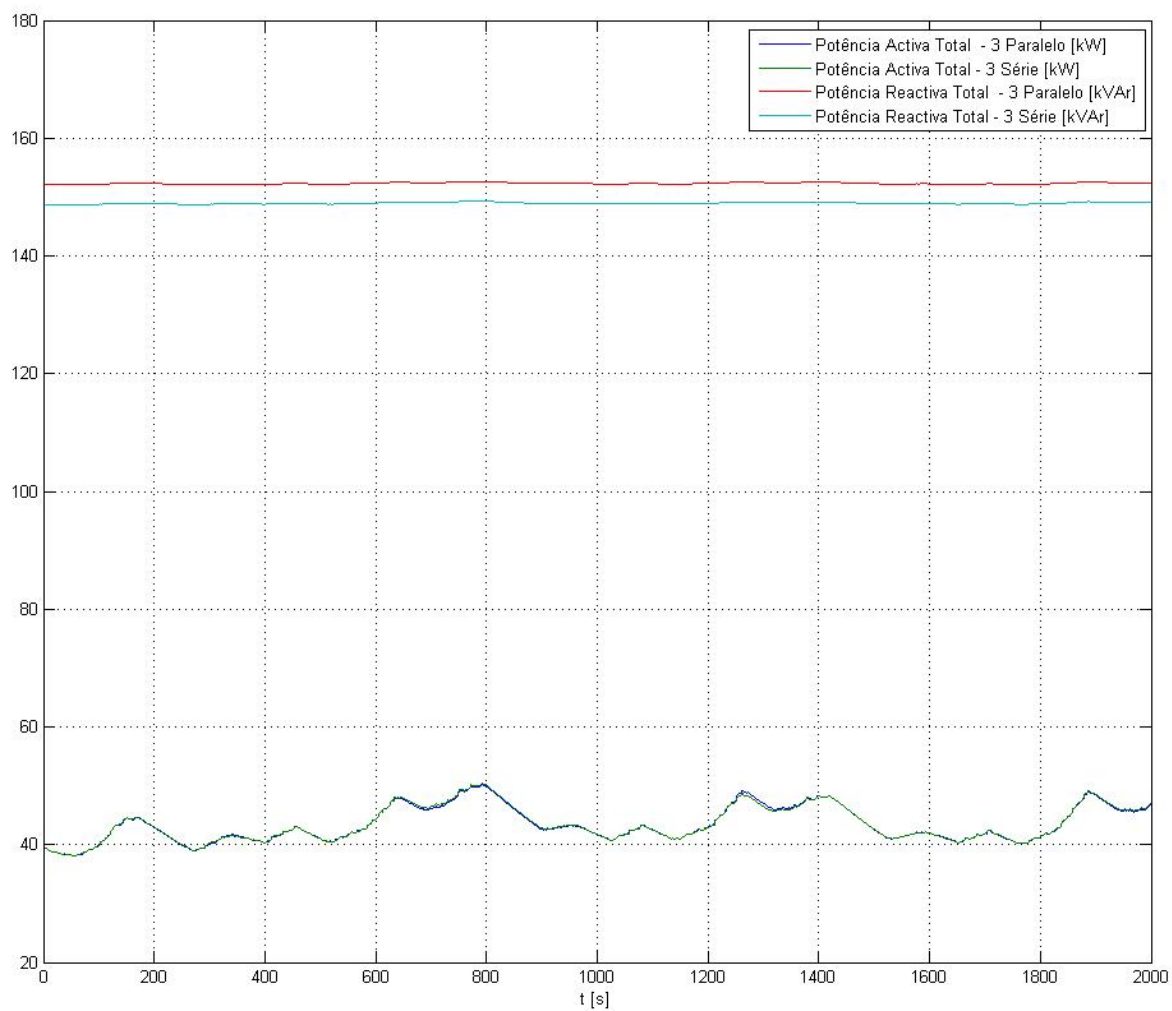


Figura 5.35 – Evolução da Potência Activa e Reactiva para os casos da associação série e paralelo das máquinas e das condições 4.

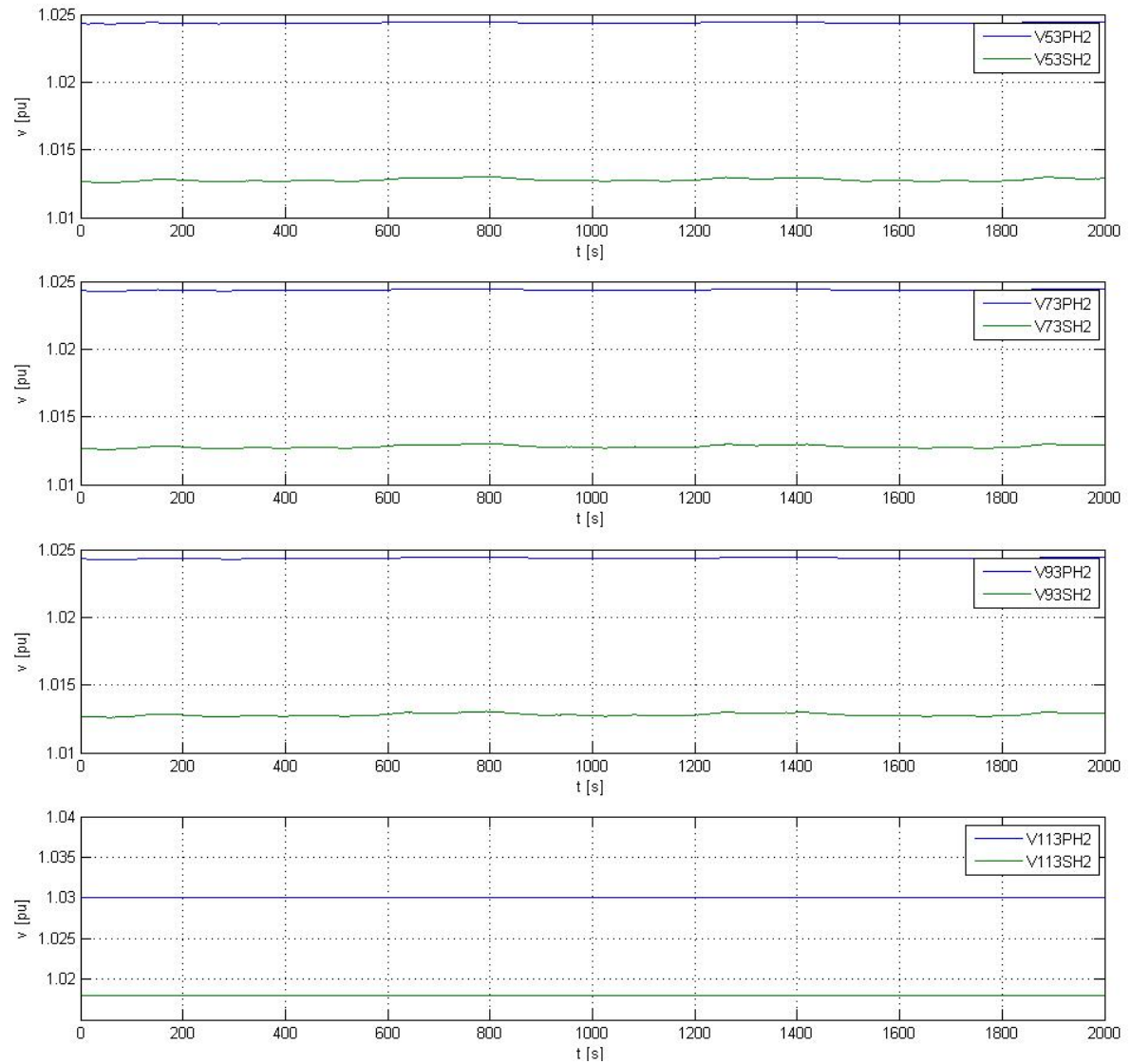


Figura 5.36 – Evolução da tensão nos barramentos 5, 7, 9, 11 para os casos da associação série e paralelo das máquinas e das condições 4.

Tabela 5.7 – Resultados das tensões nos barramentos 5, 7, 9, 11, potência eléctrica activa e reactiva do total das máquinas assíncronas para diferentes valores da S_{cc} e sobre condições de teste 1 e 2.

			Scc=2MVA			Scc=10MVA			Scc=50MVA		
			Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo
Condição 1	Série	V5 [p.u.]	0,9191	0,9658	0,8564	1,0100	1,0126	1,0063	1,0210	1,0222	1,0191
		V7 [p.u.]	0,9194	0,9668	0,8556	1,0103	1,0129	1,0064	1,0213	1,0222	1,0200
		V9 [p.u.]	0,9196	0,9671	0,8572	1,0104	1,0132	1,0067	1,0214	1,0227	1,0201
		V11 [p.u.]	0,9140	0,9640	0,8493	1,0057	1,0107	1,0007	1,0168	1,0179	1,0156
		P [kW]	434,83	526,44	312,99	436,78	531,81	313,78	437,35	532,26	313,97
		Q [kVAr]	201,33	235,69	171,95	212,70	241,52	182,26	214,69	243,28	183,94
	Paralelo	V5 [p.u.]	1,0739	1,1085	1,0367	1,0342	1,0390	1,0293	1,0248	1,0259	1,0233
		V7 [p.u.]	1,0739	1,1084	1,0365	1,0342	1,0389	1,0291	1,0248	1,0258	1,0232
		V9 [p.u.]	1,0739	1,1083	1,0367	1,0342	1,0388	1,0294	1,0248	1,0258	1,0233
		V11 [p.u.]	1,0784	1,1131	1,0413	1,0386	1,0432	1,0339	1,0291	1,0301	1,0280
		P [kW]	438,78	531,21	314,13	437,56	532,43	313,49	437,22	531,40	313,86
		Q [kVAr]	225,77	244,82	206,47	217,16	244,30	188,38	215,31	243,21	185,33
Condição 2	Série	V5 [p.u.]	0,9944	0,9945	0,9943	1,0097	1,0099	1,0095	1,0128	1,0130	1,0126
		V7 [p.u.]	0,9944	0,9945	0,9943	1,0097	1,0099	1,0095	1,0128	1,0130	1,0126
		V9 [p.u.]	0,9944	0,9945	0,9943	1,0097	1,0099	1,0095	1,0128	1,0131	1,0126
		V11 [p.u.]	0,9994	0,9995	0,9993	1,0148	1,0148	1,0148	1,0180	1,0180	1,0179
		P [kW]	43,73	50,67	38,12	43,56	50,35	38,09	43,60	50,45	38,08
		Q [kVAr]	143,64	143,96	143,40	148,03	148,38	147,77	148,94	149,29	148,67
	Paralelo	V5 [p.u.]	1,1324	1,1325	1,1324	1,0409	1,0410	1,0409	1,0244	1,0245	1,0243
		V7 [p.u.]	1,1324	1,1325	1,1324	1,0409	1,0410	1,0408	1,0244	1,0245	1,0243
		V9 [p.u.]	1,1324	1,1325	1,1324	1,0409	1,0410	1,0408	1,0244	1,0245	1,0243
		V11 [p.u.]	1,1388	1,1388	1,1388	1,0467	1,0467	1,0467	1,0301	1,0301	1,0300
		P [kW]	43,37	50,29	37,87	43,61	50,48	38,05	43,57	50,24	38,06
		Q [kVAr]	185,79	186,04	185,60	157,22	157,52	157,00	152,32	152,62	152,08

Dos resultados obtidos, destacam-se:

- Parques constituídos por três máquinas em série ou paralelo para estados de mar menos energéticos apresentam valores de potência reactiva aproximadamente 4 vezes superior ao valor da potência activa gerada;
- Potências reactivas totais, do conjunto das máquinas, para as mesmas condições de teste apresentam maior valor para topologias de rede em paralelo;
- Variações de tensão inferiores a 0.01 p.u. considerando a potência de curto-circuito entre 10 MVA e 50MVA ;
- Diminuição dos valores das tensões registadas da ligação em série em comparação com a ligação em paralelo para as mesmas condições de teste.

Capítulo 6 - Conclusões

6.1 Principais conclusões

Dos resultados da modelação matemática dos diversos sistemas de conversão de energias das ondas, têm vindo a demonstrar a sua viabilidade quando são comparados com os resultados obtidos de forma experimental. Tornando-se deste modo, como ferramentas técnico-económicas de referência nos estudos preliminares e desenvolvimento de novos conceitos. Para a implementação do modelo matemático descrito nesta dissertação, uma vasta pesquisa de informação sobre métodos numéricos que descrevam o comportamento dinâmico de diversos equipamentos e sistemas foi executado. Do conhecimento dos métodos de modelação da superfície livre do mar, como parte de um vasto conjunto de fenómenos existentes no recurso oceânico, passando pela interacção e integração da resposta hidrodinâmica de um corpo do flutuador sobre os equipamentos constituintes, como os sistemas hidráulicos e eléctricos, métodos de armazenamento de energia e infra-estruturas de ligação à rede continuam a ser tema de estudo e discussão.

Os resultados apresentados nesta dissertação vieram demonstrar a aplicabilidade dos sistemas hidráulicos às elevadas forças e baixas velocidades impostas pelo recurso energético. Em alguns casos essa velocidade chega a ser nula por efeito da força de oposição do sistema de extracção de energia (PTO), essencialmente para condições de estados de mar (H_s, T_e) considerados menos energéticos. Esta força de oposição depende essencialmente das pressões de trabalho dos sistemas hidráulicos e das características geométricas de alguns dos seus componentes como sendo o cilindro, o motor e o acumulador. O acumulador desempenha o papel principal no conjunto de equipamentos definidos dado que assegura um armazenamento de energia hidráulica temporária, a ser fornecida ao motor em períodos em que a velocidade do corpo é nula. No qual resulta, que apesar das potências geradas pelo conversor serem baixas, as tensões da rede eléctrica se mantenham estáveis.

Em redes receptoras onde se verifique que a relação entre a potência aparente do parque das ondas e a potência de curto-circuito local for inferior a 5%, é expectável a ocorrência de variações de tensão com desvios que podem ser apreciáveis, conforme se descreveu no Capítulo 5.

Esta situação é semelhante à que ocorre em redes electricamente fracas onde se venham a ligar aerogeradores dotados de máquinas de indução com rotor em curto-circuito.

Os resultados indicam que uma correcta selecção de parâmetros como a pressão de carregamento do acumulador e do ângulo de variação de cilindrada se pode atingir um rendimento global entre os 60 e os 80%. Da disposição eléctrica das redes de cabos verifica-se um aumento substancial da tensão para ligações em paralelo face às ligações em série, dado o maior valor de comprimento de cabos utilizados.

6.2 Perspectivas de Desenvolvimento

A um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas caracterizado por uma forma geométrica e massa inalterada está-lhe associado um período natural de resposta. Quando o período natural coincide com o período da onda, deparamo-nos com um aumento da energia absorvida (Ressonância) [58]. Da caracterização desta forma geométrica, são obtidos os coeficientes hidrodinâmicos utilizados nas funções de transferência das força de excitação ou difracção e da força de radiação que compõem a força hidrodinâmica total. O conhecimento destes métodos permite desenvolver formas geométricas optimizadas.

No entanto, as ondas do mar são caracterizadas por outros períodos, diferentes do período natural do dispositivo. Ao qual os sistemas de conversão de energia das ondas respondem de forma natural de acordo com as suas características, apesar de não ser o óptimo ponto de funcionamento. Dispositivos pequenos como o considerado nesta dissertação, em comparação com o comprimento de onda apresentam uma faixa estreita de ressonância em comparação com dispositivos de maior dimensão. Sendo necessário desenvolver estratégias de controlo que passem por maximizar a potência produzida por obtenção da fase e amplitude óptima fora da ressonância.

O número de equipamentos utilizados na cadeia de processo utilizado nesta dissertação, para efectuar a conversão de energia das ondas em energia eléctrica pode ser num futuro próximo face ao rendimento apresentado ser substituído por sistemas de transmissão directa de energia das ondas em energia eléctrica, com recurso a geradores eléctricos lineares controlados electronicamente por conversores electrónicos. O que requer particular importância, face à variação do recurso apresentado e por conseguinte integração da produção de energia eléctrica na rede eléctrica. Se acrescentarmos o crescente desenvolvimento deste tipo de tecnologias, e por conseguinte a sua forte integração nas redes eléctricas, terão que ser desenvolvidas estratégias de controlo, à semelhança da energia eólica, de forma a contribuir para o controlo da tensão através

do controlo da potência reactiva produzida e da frequência por intermédio do controlo da potência activa, assim como a capacidade de permanecer ligado à rede em caso de falha da mesma (*ride through default*).

Referências

- [1] H. D. O. N. A. O. (HDNO) and O. T. R. F. M. O. DEFENCE. Ocean Atlas. Available: http://www.oceansatlas.com/unatlas/about/physicalandchemicalproperties/background/see_more1.html
- [2] N. R. E. Laboratory. Ocean Thermal Energy Conversion. Available: <http://www.nrel.gov/otec>
- [3] S. E. Skilhagen, et al., "Osmotic power — power production based on the osmotic pressure difference between waters with varying salt gradients," Elsevier, vol. Desalination, p. 6, 2008.
- [4] ESRU, "Marine Current Resource and Technology Methodology," Energy Systems Research Unit 2007.
- [5] S. D. Commission, "Turning the Tide - Tidal Power in the UK," 2007.
- [6] J. Cruz, Ocean Wave Energy - Current Status and Future Perspectives: Springer, 2008.
- [7] NASA/SSE, "Annual 50m Wind Speed July 1983 - June 1993," http://www.ocean.udel.edu/WindPower/ResourceMap/sse_figure28a_rev.gif, Ed., ed, 2004.
- [8] A. M. Conett, "A Global Wave Energy Resource Assessment," in Proceedings of the Eighteenth (2008) International Offshore and Polar Engineering Conference, Vancouver, BC, Canada, 2008.
- [9] N. N. Panicker, "Power Resource Estimate of Ocean Surface-Waves," Ocean Engineering, vol. 3, pp. 429-439, 1976.
- [10] t. E. C. o. t. IEA-OES, "Glossy Handout 2008," 2008.
- [11] A. Clement, et al., "Wave energy in Europe: current status and perspectives," Renewable & Sustainable Energy Reviews, vol. 6, pp. 405-431, Oct 2002.
- [12] G. S. Bhuyan, "Harnessing the Power of tge Oceans," An IEA OPEN Energy Technology Bulletin Article, July 2008.
- [13] W. Economics, "Crude Oil Prices," http://www.wtrg.com/oil_graphs/oilprice1947.gif, Ed., ed, 2009.
- [14] J. M. B. P. Cruz, et al., "Energia das Ondas Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Económicos e Ambientais," Instituto do Ambiente 2004.
- [15] IEA, "Map Energy Indicators - World - Total Primary Energy Supply 2006," <http://www.iea.org/Textbase/country/maps/world/tpes.htm>, Ed., ed, 2006.
- [16] V. L. Regina, et al., "Wave Energy Development From Portugal To All Over Europe: A Policy Landscape," 2006.
- [17] V. L. Regiña, et al., "Opportunities Of Portugal For Wave Energy Development," 2006.
- [18] L. Cavaleri, et al., "Wave modelling - The state of the art," Progress in Oceanography, vol. 75, pp. 603-674, 2007.
- [19] T. W. Thorpe, "A Brief Review of Wave Energy," ETSU Report Number R-120 for the DTIMay 1999.
- [20] W. M. Organization, "Guide To Wave Analysis And Forecasting," 1998.
- [21] EPRI, "Oregon Offshore Wave Power Demonstration Project," 2005.

- [22] A. L. Rodrigues, "Wave Power Conversion Systems for Electrical Energy Production," ed, 2008.
- [23] N. D. B. C. (NDBC), "World Map Buoy Location," <http://www.ndbc.noaa.gov/>, Ed., ed, 2009.
- [24] R. H. Stewart. (2005, Ocean Waves. Available: http://oceanworld.tamu.edu/resources/ocng_textbook/chapter16/chapter16_01.htm
- [25] K. N. Ramboll, "Annex II Report 2003 - Implementing Agreement on Ocean Energy Systems," IEA - Ocean Energy Systems 2003.
- [26] J. V. D. TEMPEL, "Design of Support Structures for Offshore Wind Turbines," Phd, Technische Universiteit Delft, 2006.
- [27] C. Trust. (2009, Ocean waves and wave energy device design Available: http://www.carbontrust.co.uk/technology/technologyaccelerator/ME_guide2.htm
- [28] J. Twidell and T. Weir, "Renewable Energy Resources," Taylor & Francis Group, 2006.
- [29] Randlov, "EU-unded OWEC-1 project and report," 1996.
- [30] R. Begard, "E2I EPRI Global WP 009 " EPRI 2005.
- [31] J. Brooke, "Wave Energy Conversion," Elsevier, 2003.
- [32] R. Henderson, "Design, simulation, and testing of a novel hydraulic power take-off system for the Pelamis wave energy converter," Renewable Energy, vol. 31, pp. 271-283, Feb 2006.
- [33] L. Pelamis Wave Power. (2008, Pelamis Web Page. Available: www.pelamiswave.com
- [34] A. F. d. O. Falcão, "First-Generation Wave Power Plants: State of the Art and R&D Requirements," in 22nd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Cancun, México, 2003.
- [35] A. F. D. Falcao and P. A. P. Justino, "OWC wave energy devices with air flow control," Ocean Engineering, vol. 26, pp. 1275-1295, Dec 1999.
- [36] W. E. C. (WEC). (2006, OWC Pico Power Plant. Available: <http://www.pico-owc.net/>
- [37] A. Brito-Melo, et al., "Full-scale Data assessment in OWC Pico Plant," presented at the Proc. 17th Int Off shore and Polar Eng Conf, Lisbon, Portugal, 2007.
- [38] L. Christensen, et al., "Worlds Largest Wave Energy Project 2007 in Wales," in PoqweGen 2006 Europe, Cologne - Germany, 2006.
- [39] W. Knapp, "Model tests on different turbines designed for the Wave Dragon," 2000.
- [40] J. P. Kofoed, et al., "Prototype testing of the wave energy converter wave dragon," Renewable Energy, vol. 31, pp. 181-189, Feb 2006.
- [41] M. Jasinski, et al., "The Power Takeoff System of the Multi-MW Wave Dragon Wave Energy Converter," presented at the EWTEC, 2007.
- [42] J. Tedd, et al., "Advanced Control Techniques for WEC Wave Dragon," 2007.
- [43] P. Frigaard, et al., "3 years experience with energy production on the Nissum Bredning Wave Dragon Proto Type," presented at the CA-OE workshop, Lisbon, 2006.
- [44] T. Hyysalo, "AW-Energy and WaveRoller," AW-Energy, Ed., ed. Peniche - Portugal, 2007.
- [45] L. Rodrigues, "Wave power conversion systems for electrical energy production," 2008.
- [46] M. Folley and T. Whittaker, "The design of small seabed-mounted bottom-hinged wave energy converters," in 7th European Wave and Tidal Energy Conference, Porto, 2007.
- [47] M. Folley, et al., "The effect of water depth on the performance of a small surging wave energy converter," Ocean engineering -Elsevier, 2007.
- [48] A. Weinstein, et al., "AquaBuOY-the offshore wave energy converter numerical modeling and optimization ," Oceans '04. MTTTS/IEEE Techno-Ocean '04, 2004.
- [49] S. Hamblin and T. Lindeman, "Finavera," ed, 2007.
- [50] A. Weinstein, "AquaBuOY in Portugal," ed, 2006.
- [51] A. Weinstein, et al., "AquaBuOY Hose-Pumps – theory and experimental results," presented at the 7th European Wave and Tidal Energy Conference, Porto, Portugal, 2007.
- [52] K. L. Kukes, "Harvesting the Motion of the Ocean," J. I. s. E. Marina, Ed., ed. Bilbao: AquaEnergy, 2005.
- [53] H. Polinder, et al., "Archimedes wave swing linear permanent-magnet generator system performance," in Proceedings of the 6th European wave and tidal energy conference, Glasgow: University of Strathclyde, 2005.
- [54] H. Polinder, et al., "Linear generator systems for wave energy conversion," in Proceedings of 7th European Wave and Tidal Energy Conference, Porto, Portugal, 2007.

-
- [55] H. Polinder, et al., "Linear generators for direct-drive wave energy conversion," *Electric Machines and Drives Conference IEMDC'03*, IEEE International, vol. 2, pp. 798-804, June 2003.
 - [56] N. J. Baker, "Linear Generators for Direct Drive Marine Renewable Energy Converters," PhD, University of Durham, Durham, UK, February 2003.
 - [57] J. S. d. Costa, et al., "Time Domain Model of the AWS Wave Energy Converter," presented at the 6th European Wave and Tidal Energy Conference, Glasgow, UK, 2005.
 - [58] J. Falnes, "Ocean Waves and Oscillating Systems: linear interactions including wave-energy extraction," Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2002.
 - [59] J. S. d. Costa, et al., "Time Domain Model Of The Aws Wave Energy Converter," in *Proceedings of the 6th European Wave and Tidal Energy Conference*, University of Strathclyde - Glasgow - UK, 2005.
 - [60] M. G. S. Prado, et al., "AWS Results of Pilot Plant Testing 2004," presented at the 6th European Wave and Tidal Energy Conference, Glasgow, UK, 2005.
 - [61] P. Pinto, "Time Domain Simulation of AWS," Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2004.
 - [62] D. Valério, et al., "Identification and Control of the AWS using neural network models," *Applied Ocean Research - Elsevier*, pp. 178-188, 2008.
 - [63] AWS. (2009, AWS Ocean Energy. Available: www.awsocan.com
 - [64] E. Spooner and M. A. Mueller, "Comparative Study of Linear Generators and Hydraulic Systems for Wave Energy Conversion," Crown2001.
 - [65] J. A. P. Lopes, et al., "CIGRE Technical Brochure on Modeling new forms of generation and storage - TF 38.01.10," November 2000.
 - [66] J. Khan, et al., "Ocean Wave and Tidal Current Conversion Technologies and their Interaction with Electrical Networks," *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008 IEEE, pp. 1-8, 2008.
 - [67] G. S. Bhuyan, "Annex III - Integration of Ocean Energy Plants into Distribution and Transmission Electrical Grids," Powertech Labs Inc. of Canada Canada2009.
 - [68] ABB, "Offshore Wind Energy - Grid Connections," ed: ABB, 2003.
 - [69] Nexans, "Submarine Power Cables," Nexan, Ed., ed. Hannover: Nexans Deutschland Industries GmbH & Co. KG - Energy Networks, March 2003.
 - [70] I. M. d. Alegria, et al., "Transmission alternatives for offshore electrical power," *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2008.
 - [71] M. Previsic, "Wave Power Technologies," IEEE, 2005.
 - [72] J. Cruz, et al., "Estudo Comparativo entre Tecnologias de Aproveitamento de Energia Eólica e Energia das Ondas," presented at the ENER05 - Conferência sobre Energias Renováveis e Ambiente em Portugal, Figueira da Foz, Portugal, 2005.
 - [73] A. P. McCabe, et al., "A Time-Domain Model of a floating body using transforms," presented at the 6th European Wave and Tidal Energy Conference, University of Strathclyde, Glasgow, UK, 2005.
 - [74] A. F. d. O. Falcão, "Phase control through load control of oscillating-body wave energy converters with hydraulic PTO system," *Elsevier*, vol. 35, pp. 358-366, March 2008 2008.
 - [75] Y. Goda, *Random Seas and Design of Maritime Structures* vol. 15: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2000.
 - [76] C. B. Josset and A. H. Clement, "A wave-to-wire model of the SEAREV wave energy converter," *Proceedings- Institution Of Mechanical Engineers Part M Journal Of Engineering For The Maritime Environment*, vol. 221, pp. 81-94, 2007.
 - [77] H. Eidsmoen, "Tight-moored amplitude-limited heaving-buoy wave-energy converter with phase control," *Elsevier - Applied Ocean Research*, vol. 20, pp. 157-161, 1998.
 - [78] K. Ogata, "Engenharia de Controle Moderno," Prentice-Hall, 2004.
 - [79] A. P. McCabe, "Time- and Frequency-Domain Modelling," R. E. R. Group, Ed., ed: Lancaster University, 2008.
 - [80] M. Delannoy, et al., "Modeling Hybrid Multibody Systems: Application to Vehicle Hydraulic Semi-Active Suspensions," presented at the *Multibody Dynamics 2005*, Madrid, Spain, 2005.
 - [81] Bosch, "Planning and Design of Hydraulic Power Systems," Rexroth Hydraulics, 1988.

-
- [82] P. H. Corporation, "Hydraulic Motors - Series V12, V14, T12," M. C. D. Parker Hannifin, Ed., ed, 2004.
 - [83] P. Kundur, "Power System Stability and Control," McGraw-Hill, Inc., 1993.
 - [84] N. Jenkins, *et al.*, "Dynamic and Steady-State Modelling of the Doubly-Fed Induction Machine (DFIM) for Wind Turbine Applications," Internal MCEE UMIST report on 2002.
 - [85] J. P. S. Paiva, "Redes de Energia Eléctrica: uma análise sistémica," Lisboa: IST Press, 2005.

Anexos

Anexo A - Propriedades Linear da Onda de Superfície

EN475 – OCEAN ENGINEERING MECHANICS – Equation Sheet 1: Linear Wave Properties

	Shallow Water	Intermediate Depth	Deep Water
Surface Elev., η	$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t)$	$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t)$	$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t)$
Wave Length, L	$L = T \sqrt{gd}$	$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kd)$ $L = L_0 \tanh(kd)$	$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi}$
Wave Speed or Celerity, $C=L/T$	$C = \sqrt{gd}$	$C = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kd} = \frac{gT}{2\pi} \tanh kd$	$C_0 = \sqrt{\frac{g}{k_0}} = \frac{gT}{2\pi}$
Potential, ϕ	$\phi = \frac{Hg}{2\sigma} \sin(kx - \sigma t)$	$\phi = \frac{Hg}{2\sigma} \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} \sin(kx - \sigma t)$	$\phi = \frac{Hg}{2\sigma} e^{kz} \sin(kx - \sigma t)$
Horizontal (x-dir'n) velocity, u	$u = \frac{Hgk}{2\sigma} \cos(kx - \sigma t)$ $u = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{d}} \cos(kx - \sigma t)$ $u = \frac{\pi H}{T} \frac{1}{kd} \cos(kx - \sigma t)$	$u = \frac{Hgk}{2\sigma} \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} \cos(kx - \sigma t)$ $u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh kd} \cos(kx - \sigma t)$ $u = \frac{\pi H}{T} K_x \cos(kx - \sigma t)$	$u = \frac{Hgk}{2\sigma} e^{kz} \cos(kx - \sigma t)$ $u = \frac{\pi H}{T} e^{kz} \cos(kx - \sigma t)$
Vertical (z-dir'n) velocity, w	$w = \frac{Hg(z+d)}{2\sigma d} \sin(kx - \sigma t)$ $w = \frac{\pi H}{T} \left(1 + \frac{z}{d}\right) \sin(kx - \sigma t)$	$w = \frac{Hgk}{2\sigma} \frac{\sinh k(z+d)}{\cosh kd} \sin(kx - \sigma t)$ $w = \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh k(z+d)}{\sinh kd} \sin(kx - \sigma t)$ $w = \frac{\pi H}{T} K_z \sin(kx - \sigma t)$	$w = \frac{Hgk}{2\sigma} e^{kz} \sin(kx - \sigma t)$ $w = \frac{\pi H}{T} e^{kz} \sin(kx - \sigma t)$
Horizontal Particle Acceleration, a_x	$a_x = \frac{Hg}{2d} \sin(kx - \sigma t)$	$a_x = \frac{2\pi^2 H}{T^2} K_x \sin(kx - \sigma t)$	$a_x = \frac{Hgk}{2} e^{kz} \sin(kx - \sigma t)$
Vertical Particle Acceleration, a_z	$a_z = -\frac{Hg(z+d)}{2d} \cos(kx - \sigma t)$	$a_z = -\frac{2\pi^2 H}{T^2} K_z \cos(kx - \sigma t)$	$a_z = -\frac{Hgk}{2} e^{kz} \cos(kx - \sigma t)$
Particle Paths	tend to lines	elliptical	circular

	Shallow Water	Intermediate Depth	Deep Water
Pressure, $p_{total} = p_{static} + p_{dynamic}$	$p_{total} = -\rho g z + \rho g \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t)$ $p_{total} = \rho g (\eta - z)$	$p_{total} = -\rho g z + \rho g \frac{H}{2} \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} \cos(kx - \sigma t)$ $p_{total} = -\rho g z + \rho g \frac{H}{2} K_p \cos(kx - \sigma t)$ $p_{total} = \rho g (K_p \eta - z)$	$p_{total} = -\rho g z + \rho g \frac{H}{2} e^{kz} \cos(kx - \sigma t)$ $p_{total} = \rho g (e^k \eta - z)$
Energy in One Wave Length, E	$E = \frac{\rho g H^2 L}{8}$	$E = \frac{\rho g H^2 L}{8}$	$E = \frac{\rho g H^2 L}{8}$
Average Energy Density, $\bar{E}$	$\bar{E} = \frac{\rho g H^2}{8}$	$\bar{E} = \frac{\rho g H^2}{8}$	$\bar{E} = \frac{\rho g H^2}{8}$
Power, $P = \frac{nE}{T}$	$P = \bar{E} C = \bar{E} C_g$	$P = \frac{\bar{E} C}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right)$ $P = n \bar{E} C = \bar{E} C_g$	$P = \frac{\bar{E} C}{2} = \bar{E} C_g$
Group Velocity, C_g	$C_g = C$	$C_g = \frac{C}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right)$ $C_g = n C$	$C_g = \frac{C}{2}$
Dispersion Equation	$\sigma^2 = k^2 g d$	$\sigma^2 = g k \tanh kd$	$\sigma^2 = g k$

Shoaling & Refraction: $H = H_0 K_S K_R$ $K_S = \sqrt{\frac{C_{g0}}{C_g}}$ $K_R = \sqrt{\frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha}}$ $\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{C}{C_0} \sin \alpha_0 \right) = \sin^{-1} (\tanh kd \sin \alpha_0)$

Standing Waves: surface elevations: $\eta_i = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t)$ $\eta_r = \frac{H}{2} \cos(kx + \sigma t)$ $\eta = \eta_i + \eta_r = H_i \cos(kx) \cos(\sigma t)$

dynamic pressure: $p_d = p_{di} + p_{dr} = \rho g H_i \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} \cos(kx) \cos(\sigma t)$

velocities: $u = u_i + u_r = \frac{2\pi H_i}{T} \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh kd} \sin(kx) \sin(\sigma t)$ $w = w_i + w_r = \frac{2\pi H_i}{T} \frac{\sinh k(z+d)}{\sinh kd} \cos(kx) \sin(\sigma t)$

H = wave height $\sigma = \frac{2\pi}{T}$ $k = \frac{2\pi}{L}$ T = wave period L = wave length d = water depth $K_p = \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd}$ $K_s = \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh kd}$ $K_r = \frac{\sinh k(z+d)}{\sinh kd}$ $n = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right]$

Anexo B - Parâmetros do sistema de conversão de energia das ondas em energia eléctrica

Corpo do Flutuador

m, Massa do corpo	1369.49	[ton]
M, Massa Adicional	377.36	[ton]
R_o , Densidade da água do mar	1025	[kg/m ³]
g, Aceleração da gravidade	9.8	[m/s ²]
R_b , Raio da Bóia	6	[m]
Calado	12	[m]

Sistema Hidráulico

Cilindro

D_E , Diâmetro do êmbolo, D_E	0,210	[m]
D_H , Diâmetro da Haste	0,147	[m]
C_c , Curso do cilindro Hidráulico	9,000	[m]
B_u , Módulo de Bulk (1.5 a 1.75GPa)	1,5E+09	[Pa]

Sistema Paragem

K, Rigidez da mola	50	[kN/m]
B, Factor de amortecimento	9200	[kg/m]

Acumulador

$P_{máx}$, Pressão Máxima no acumulador	2,50E+07	[Pa]
γ , Razão dos calores específicos	1,400	adi.

Reservatório

P_t , Pressão no Reservatório de óleo	1,00E+05	[Pa]
---	----------	------

Motor

D_{35} , Cilindrada Máxima do motor 35°	160	[cm ³ /rot]
η_v , Eficiência Volumétrica	1	adi.
N_m , Eficiência mecânica	1	adi.

Sistema Eléctrico

Máquina Assíncrona

S_n , Potência Aparente	400	[kVA]
V_n , Tensão nominal	400	[V]
R_s , Resistência estatórica	0,0216	[Ω]
X_s , Reactância estatórica	0,0710	[Ω]
R_r , Resistência rotórica	0,01231	[Ω]
X_r , Reactância rotórica	0,0710	[Ω]
X_m , Reactância de Magnetização	3,261	[Ω]
W_s , Velocidade estatórica,	3000	[r.p.m.]
p , N.º de pólos	1	
J , Momento de Inércia	2,3	[kg.m ²]

Transformadores

$S_{nT1}=S_{nG}$:	MT/BT	[%VA]
S_n , Potência Aparente	400	[kVA]
V_{1T1} , Tensão do primário	15000	[kV]
$V_{2T1}=V_G$, Tensão do secundário	150,4	[kV]
x_{T1} , Reactância de Fugas do primário,	5	[%]

Linhas Aéreas

Material Condutor	Cobre	[CU]
V , Tensão da Linha	15	[kV]
s , Secção da Linha	3x185	[mm ²]
R , Resistência da Linha	0,09	[Ω/km]
X , Reactância da linha	0,371	[Ω/km]
Y_{sh} , Admitância da linha	0,0032	[mS/km]
d , Comprimento da linha	20	[km]

Cabos Submarinos

Código do Cabo	XHE 49/24	
V , Tensão do Cabo	8,7/15/(17,5)	[kV]
s , Secção	25	[mm ²]
R , Resistência do Cabo	0,9271	[Ω/km]
L , Indutância do Cabo	0,4873	[mH/km]
C , Capacidade do Cabo	0,1952	[μF/km]
d , Comprimento do Cabo	8	[km]

Anexo C - Coeficientes das funções de transferência

Tabela C.1 - Coeficientes da função de transferência estável de excitação da onda.

	$B_{exc}^{est}(s)$	$A_{exc}^{est}(s)$
s8	-	1
s7	248,02	5,73
s6	1403,43	24,47
s5	5902,31	74,79
s4	17753,33	159,45
s3	36745,56	217,06
s2	46681,51	182,23
s1	33126,23	84,24
-	8872,97	16,13

Tabela C.2 - Coeficientes da função de transferência instável de excitação da onda.

	$B_{exc}^{inst}(s)$	$A_{exc}^{inst}(s)$
s11	-	1
s10	248,02	7,52
s9	1880,49	42,98
s8	10713,77	171,57
s7	42702,67	546,32
s6	135131,9	1372,28
s5	336476,7	2781,21
s4	672018,9	4502,69
s3	1061140	5715,08
s2	1298110	5381,08
s1	1115993	3349,07
-	601247,2	1028,77

Tabela C.3 - Coeficientes da função de transferência de radiação.

	$B_{rad}(s)$	$A_{rad}(s)$
s10	-	1
s9	19,84	4,48
s8	90,41	20,82
s7	399,03	58,46
s6	1129,89	133,11
s5	2360,81	232,85
s4	4104,98	308,27
s3	4476,6	293,1
s2	3976,04	182,76
s1	612,74	66,46
-	-0,46	9,26