



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Modelação numérica de um gerador de energia a partir das ondas do mar

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Mecânica Estrutural

Autor

Aline Sofia dos Santos Nascimento

Orientador

Fernando Pedro Simões da Silva Dias Simão

José Simão Antunes do Carmo

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correcções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Julho, 2016

RESUMO

Desde o século XVIII até à atualidade, a sociedade mundial tem assistido ao aumento significativo da utilização de matérias-primas para a produção e consumo de energia e, conseqüentemente, ao aumento do custo das fontes (carvão, petróleo bruto e gás natural). Assim, um dos objetivos dos projetos no âmbito do desenvolvimento tecnológico do século XXI é a criação de soluções e equipamentos que satisfaçam as necessidades subjacentes ao crescente consumo de energia, nomeadamente na forma de eletricidade. Estas soluções e equipamentos deverão ser o quanto mais eficientes, o mais favoravelmente económicos e não deverão comprometer o meio ambiente.

As energias renováveis são virtualmente inesgotáveis e não são poluentes como tal, servem de solução alternativa aos combustíveis fósseis. Estas fontes de energia alternativa solucionam os problemas ecológicos provocados pelas fontes de energia convencionais (carvão, petróleo bruto e gás natural), tais como o aquecimento global, a redução da camada de ozono, a ocorrência de chuvas ácidas e o aumento do nível do mar.

A presente dissertação tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema de transformação de ondas marítimas em energia elétrica através da modelação computacional de uma estrutura multicorpo. Este sistema será composto por quatro corpos: um flutuador que oscila à superfície da água, um braço mecânico bi-articulado e uma torre fixa ao fundo do mar. A energia é capturada através dos movimentos de rotação das articulações do braço mecânico, que une o flutuador ao topo da torre. Estas articulações são modeladas por sistemas mola-amortecedor.

A concretização deste trabalho consistirá, numa primeira fase, na caracterização teórica das ações hidrodinâmicas, desde o comportamento ondulatório do mar até à interação onda-estrutura e numa fase de estudo e elaboração de uma metodologia teórica baseada na Dinâmica Multicorpo (Shabana, 2010), implementando métodos de integração no tempo, designadamente o método implícito de Hilber-Huges-Taylor.

Palavras-chave: Energia das ondas, Energias Renováveis, Dinâmica Multicorpo, Estruturas Offshore, Análise não linear, Integração no tempo

ABSTRACT

Since the 18th century to the present day, the world society has witnessed the significant increase in the use of raw materials for the production and consumption of energy and, consequently, to the rising cost of fossil fuels. Thus, one of the purposes of technological development projects of the 21st century is the creation of solutions and equipment that satisfies the requirements underlying the increasing electricity consumption. These solutions and equipment shall be the more effective, the more economic and should not compromise the environment.

Renewable energies are virtually inexhaustible and are not pollutant as well as serve as workarounds to fossil fuels. These alternative energy sources solve the ecological problems caused by conventional energy sources (coal, crude oil and natural gas) such as the global warming, the reduction of the ozone layer, the occurrence of acid rain and rising sea levels.

The present work has as purpose the development of a wave energy converter (WEC) system through computational modelling of multibody structure. This system is composed of four bodies: a float that swings to the surface of the water, a bi-articulated mechanical arm and a tower attached to the bottom of the sea. Energy is captured through the rotation movement of the joints of the mechanical arm, which unites the float to the top of the tower. The joints are modelled by spring-damper systems.

The completion of this work will be, as a first step, the theoretical characterization of hydrodynamic action, since the wave behavior of the sea to the wave-structure interaction. There also will be a phase of study and elaboration of a theoretical methodology based on Multibody Dynamics (Shabana, 2010), implementing methods of integration in time, namely the Hilber-Hughes-Taylor implicit method.

Keywords: Wave energy, Renewable energies, Multibody Dynamics, Offshore structures, Nonlinear analysis, Integration in time.

ÍNDICE

RESUMO	ii
ABSTRACT	ii
ÍNDICE.....	iii
1 INTRODUÇÃO.....	5
2 ENERGIAS RENOVÁVEIS	7
2.1. Definição	7
2.2. Tipos de energia renováveis	7
2.2.1. Energia oceânica.....	7
2.2.2. Restantes tipos de energia renováveis	9
2.3. Enquadramento económico e de sustentabilidade	11
2.4. Enquadramento nacional	12
2.5. Mecanismos de extração de energia das ondas	13
2.5.1. Insucessos de mecanismos de extração de energia das ondas	15
2.5.2. Mecanismos de extração de energia similares ao proposto	17
3 APRESENTAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO	19
3.1 Introdução	19
3.2 Caracterização do gerador.....	19
3.3 Propriedades de massa e inércia dos corpos	21
3.4 Matriz de restrições.....	22
3.4.1 Matriz Jacobiana das Restrições	25
3.5 Ação do mar	26
3.5.1 Considerações iniciais	26
3.5.2 Metodologia de cálculo da velocidade, aceleração, variação da superfície livre em relação à superfície livre em repouso e pressão total	27
3.5.3 Metodologia de cálculo da pressão no flutuador	30
3.6 Vetor das restantes forças	33
3.6.1 Considerações iniciais	33
3.6.2 Vetor de forças centrífugas.....	33
3.6.3 Vetor de forças exteriores.....	34
3.7 Equação de equilíbrio	41
4 METODOLOGIA NUMÉRICA DE INTEGRACÃO NO TEMPO	42
4.1 Introdução	42
4.2 Estratégia numérica de integração no tempo	43
4.2.1 Identificação das variáveis dependentes.....	43
4.2.2 Resolução do sistema de equilíbrio através da fórmula canónica	43
4.2.3 Resolução do sistema de equilíbrio através do método HHT-I3	46
5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO GERADOR	48

5.1	Introdução	48
5.2	Resultados da modelação numérica	48
5.2.1	Resolução do sistema de equilíbrio através da fórmula canónica	50
5.2.2	Resolução do sistema de equilíbrio através do método HHT-I3	52
5.3	Análise dos resultados obtidos.....	53
6	CONCLUSÃO.....	54
6.1	Análise do trabalho realizado	54
6.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	54
6.2.1	Cálculo do Potencial de produção de energia.....	54
6.2.2	Análise de sensibilidade do gerador	55
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

1 INTRODUÇÃO

Após a primeira etapa da Revolução Industrial no final do século XVIII, o modo de vida da sociedade mundial sofreu grandes alterações. A utilização da máquina de vapor, a invenção do motor a combustão e da locomotiva a vapor no século XIX e o aparecimento e desenvolvimento da informática nas últimas décadas do século XX originaram a crescente exploração do carvão, petróleo e gás natural (combustíveis fósseis). Estas transformações impulsionaram, assim, o aumento do nível de qualidade de vida e o crescimento populacional, o que resultou no aumento significativo do consumo de energia.

De forma a acompanhar a evolução da sociedade, a procura e consumo de combustíveis fósseis ao longo do tempo tem sido muito superior à sua oferta, assim a disponibilidade destes recursos energéticos diminuiu e o seu custo terá tendência para aumentar. Assim, existe a possibilidade de estes recursos se esgotarem a médio/curto prazo e, para além do referenciado, a sua combustão provoca a emissão de gases, tais como o dióxido de carbono, metano, óxido de nitrogénio e óxido de enxofre. Estes gases trazem consequências nefastas ao ambiente, uma vez que são a causa do efeito de estufa, da redução da camada de ozono, da ocorrência de chuvas ácidas e do aumento do nível do mar.

De modo a resolver os problemas de escassez das fontes de energia convencionais e também os problemas de ordem ambiental, nas últimas décadas, têm sido desenvolvidas novas técnicas de aproveitamento energético através de recursos naturais, não poluentes e inesgotáveis, nomeadamente o sol, o vento, os cursos de águas e as ondas do mar, designados por fontes de energias renováveis.

Entre os diversos tipos de fontes de energia renovável existentes, destaca-se a energia produzida pelo movimento ondulatório do mar. A densidade de energia transportada por este tipo de fonte é mais elevada do que aquela que é transportada pela energia solar e energia eólica. A energia em ondas marítimas apresenta, ainda, a grande vantagem de ser uma fonte viável em pelo menos 65% do período anual, ao contrário da energia solar e da energia eólica que, devido às alterações sazonais, apresentam uma rentabilidade anual de 25%.

No âmbito do desenvolvimento tecnológico de soluções de geração de energia elétrica através da energia de ondas marítimas, este projeto tem como objetivo modelar numericamente um sistema multicorpo, constituído por um flutuador que oscila à superfície da água, um braço mecânico bi-articulado e uma torre fixa ao fundo do mar. A modelação computacional dos movimentos do braço mecânico serão calculados em função do movimento das ondas do mar, com base nos conceitos teóricos de Dinâmica Multicorpo. Serão, ainda, atribuídas propriedades fundamentais ao modelo estrutural, tais como a forma do flutuador, as propriedades geométricas

do gerador, as propriedades mecânicas do sistema mola-amortecedor e as forças de ligação entre os corpos do sistema.

A estrutura desta dissertação está dividida em 7 capítulos. O presente capítulo tem função introdutória do tema abordado, enumera os objetivos que se pretendem alcançar e descreve as metodologias adotadas para o desenvolvimento do trabalho. No segundo capítulo, encontra-se disposto o enquadramento contextual das energias renováveis e as suas diversas formas, nomeadamente a energia oceânica, bem como os dispositivos de conversão de energia das ondas que já foram desenvolvidos. O terceiro capítulo descreve as forças que atuam no flutuador e na torre e, conseqüentemente, as forças de dimensionamento. Este capítulo justifica, ainda, pormenorizadamente as equações desenvolvidas por Hussein, Negrut e Shabana (2008). O quarto capítulo é o fundamental e contém o foco principal deste estudo, uma vez que descreve a estratégia de resolução do problema de convergência de resultados na integração no tempo persistente no trabalho desenvolvido por Jorge Silva (2014), do qual esta dissertação faz continuidade. No quinto capítulo, procede-se à simulação de um gerador, atribuindo propriedades tanto ao mesmo como à onda atuante. O sexto, e último, capítulo apresenta as considerações finais do estudo e analisa as possibilidades futuras para o desenvolvimento deste sistema.

2 ENERGIAS RENOVÁVEIS

2.1. Definição

As energias renováveis são fontes inesgotáveis de energia obtidas da Natureza. São todas as formas de energia cuja taxa de utilização é inferior à sua taxa de renovação. As suas fontes podem ter origem terrestre (energia geotérmica), gravitacional (energia das marés) e solar (energia armazenada na biomassa, energia de radiação solar, energia hidráulica, energia térmica oceânica e energia cinética do vento e das ondas). Também são consideradas fontes de energia renovável os resíduos agrícolas, urbanos e industriais (DGEG). As energias renováveis ou alternativas tratam-se, então, de fontes de energia naturais, sem fim temporal de utilização estabelecido e não poluentes que se transformam em energia eléctrica, térmica ou mecânica de modo a satisfazer as necessidades da sociedade.

2.2. Tipos de energia renováveis

2.2.1. Energia oceânica

No âmbito do desenvolvimento tecnológico e científico, têm sido projetados alguns métodos de geração de energia renovável, sendo exemplo a energia eólica, a energia hídrica, a energia de radiação solar e, o objeto de estudo deste trabalho, a energia oceânica.

A energia oceânica tem um enorme potencial, que aguarda novos avanços e investimentos técnicos e tecnológicos que permitam um maior aproveitamento. Este tipo de fonte de energia pode ser originado por dois tipos de movimento: energia do movimento das marés e energia do movimento das ondas eólicas. Outra fonte de energia proveniente do mar é a energia térmica dos oceanos que provém da diferença de temperatura entre a superfície e o fundo do mar.

O movimento das marés resulta da interação gravítica entre a Terra, a Lua e o Sol. A energia contida neste movimento é transformada em energia eléctrica através de turbinas. A energia das ondas é originada pela interação entre vento gerado pelo aquecimento das massas de ar pelo Sol e a superfície do mar. Através de turbinas a ar ou água, a energia cinética contida no movimento das ondas é convertida em energia eléctrica.



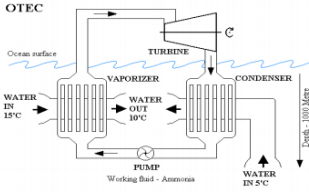
Energias Oceânicas	Conversão da energia	Tecnologia de conversão	Ilustração	Observações
Energia das Marés	Energia Elétrica	Turbinas	 <p>Figura 2.1 – Energia das marés. [6]</p>	Energia aproveitada através do movimento das massas de água que são influenciadas pela gravidade da terra, lua e sol.
Energia das ondas	Energia Elétrica	Turbinas a água ou ar	 <p>Figura 2.2 – Wave star energia das ondas. [7]</p>	As ondas são formadas pela interação do vento na superfície do mar. Convertendo assim a energia cinética das ondas em energia elétrica.
Energia térmica	Energia Térmica	Motor térmico + turbina a ar	 <p>Figura 2.3 – Energia térmica do oceano. [8]</p>	<p>Energia extraída da diferença de temperatura entre as águas superficiais e sub-superficiais através de um motor térmico.</p> <p>Através da água quente aquece-se um líquido com ponto de ebulição baixo, em que o vapor gerado deste acciona uma turbina produzindo energia elétrica.</p>

Tabela 1- Tipos de energia oceânica (Silva, Jorge (2014) “Desenvolvimento de um Mecanismo de Produção de Energia Elétrica Através das Ondas do Mar”)

As vantagens da utilização da energia oceânica em relação às restantes fontes de energia renovável residem no facto de a quantidade de energia transportada ser superior e de existir um armazenamento eficiente da energia produzida. Isto é, segundo a Comissão Europeia, 0.1% da energia contida nas ondas poderá fornecer até 5 vezes a quantidade de energia necessária para

satisfazer o consumo energético mundial. Como os períodos de ocorrência de vento e sol não são contínuos, haverá necessidade de recorrer aos combustíveis fósseis nas alturas em que estes elementos não estão presentes, o que não acontece com os períodos de ocorrência de ondas marítimas pois estes são contínuos.

Contudo, a energia oceânica apresenta desvantagens tais como, a irregularidade da amplitude, fase e direcção da onda, pois ainda não é possível obter o máximo de eficiência num sistema sobre uma gama inteira de frequências e nos casos de tempestade e/ou furacões a carga estrutural aplicada é 100 vezes superior à carga média e poderá causar a destruição do sistema (Portal Energia).

2.2.2. Restantes tipos de energia renováveis

Existem outros tipos de energia renovável para além da energia oceânica, são estas a energia solar, energia eólica, energia hídrica, energia geotérmica e a energia de biomassa. De seguida, apresenta-se na Tabela 2 a descrição de cada uma destas fontes de energia e a tecnologia de conversão utilizada.

Energias Renováveis	Conversões	Tecnologia de conversão	Observações
Energia Eólica	Energia mecânica	Moinhos	Processo de transformação com recurso do vento para a produção de energia mecânica que é utilizada geralmente para a moagem de grãos ou bombear água.
	Energia elétrica	Aerogeradores	A energia proveniente do vento também para produzir energia elétrica sendo que na conversão desta normalmente utiliza-se torres eólicas em que o eixo do aerogerador pode ser horizontal ou vertical.
Energia Solar	Energia térmica	Painéis Solares	Processo de transformação da energia proveniente do sol em energia térmica. Esta é utilizada para o aquecimento de águas sanitárias ou para a produção de vapor, através de elevadas temperaturas, para a geração de eletricidade através de turbinas.

	Energia elétrica	Painéis fotovoltaicos	A energia proveniente do sol também pode gerar energia elétrica que é obtida através da radiação solar a incidir sobre os painéis fotovoltaicos que posteriormente será transformada em energia elétrica.
Energia hídrica	Energia Elétrica	Turbinas hidráulicas	Processo de transformação da energia proveniente dos cursos de água em energia elétrica. Esta energia é obtida através da passagem da água pelas pás de uma turbina. A passagem da água pela turbina é realizada por gravidade devido à diferença de cota a montante (albufeira) e a jusante do rio.
Energia Geotérmica	Baixa entalpia	Água injetada na superfície	Energia obtida através do solo terrestre, sendo fácil de obter em zonas vulcânicas devido às grandes quantidades de calor. Quando a entalpia (grandeza que mede a quantidade de energia em forma de calor) é baixa, a energia é geralmente utilizada para aquecimento de águas sanitárias e ambiente.
	Alta entalpia	Turbinas a vapor	A energia de alta entalpia utiliza o vapor de água para produzir energia elétrica, uma vez que as quantidades de calor são elevadas, tendo capacidade de um sistema fechado ou aberto, transformar a água em vapor para girar um turbina.
Energia da Biomassa	Bioenergia	Combustão da matéria orgânica	<p>Processo de transformação que consiste, através de matéria orgânica (nomeadamente, resíduos florestais, agrícolas ou excrementos de animal) que em contacto com o sol, entra em decomposição, e gera um gás, normalmente o metano. Com o aproveitamento deste gás pode-se gerar inúmeras soluções.</p> <p>Um aspecto importante de referir, é o facto de a energia proveniente dos resíduos domésticos, apesar de o processo ser idêntico, é considerada uma energia não renovável.</p>

Tabela 2 - Tipos de energia renovável com exceção da energia oceânica (Silva, Jorge (2014) “Desenvolvimento de um Mecanismo de Produção de Energia Elétrica Através das Ondas do Mar”).

2.3. Enquadramento económico e de sustentabilidade

O crescimento populacional e a necessidade de elevar o nível de vida da sociedade provocaram o aumento do consumo energético. Através da análise do Gráfico 1, pode se verificar que em 2000 a população mundial consumiu cerca de 10 000 Mtoe de energia, enquanto que em 2012 se registou um consumo de aproximadamente 13 000 Mtoe de energia (onde 1 Mtoe = 11 630 000 MWh). De acordo com a *Energy Information Administration*, prevê-se que o crescimento anual do consumo energético total, entre 2012 a 2040, seja de 0.4% e o crescimento anual do consumo de energias renováveis, para o mesmo período de tempo, seja de 1.6%.

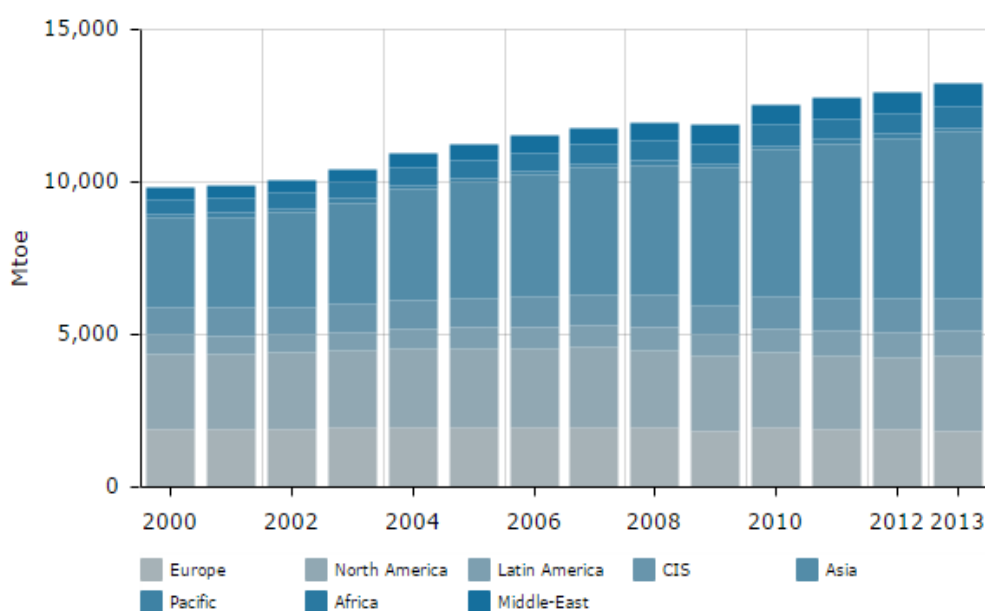


Gráfico 1 - Evolução do consumo mundial de energia de 2000 a 2013 (Enerdata).

Uma vez que este aumento do consumo energético provocou a subida do custo de energia, mais concretamente a subida da cotação dos combustíveis fósseis, a utilização de recursos como o petróleo teve como consequência o aumento dos encargos económicos da sociedade. Para além deste impacto negativo a nível económico, o crescente consumo de combustíveis fósseis resultou no agravamento do efeito de estufa, redução da camada de ozono, ocorrência de chuvas ácidas, aumento do número de ocorrências climáticas catastróficas, degelo das calotes polares e dos glaciares e, consequentemente, o aumento do nível do mar.

Sendo 40.7% da energia consumida utilizada na forma de energia elétrica, a energia oceânica revela ser uma solução muito eficiente, e alternativa aos combustíveis fósseis, para a geração de eletricidade, uma vez que se trata de uma fonte limpa e económica. A energia proveniente do movimento das ondas marinhas não é poluente e pode ser explorada localmente, isto é, não

emite gases que conduzam ao efeito de estufa e evita a necessidade de importação de energia, o que potencia a independência energética relativamente aos países produtores de gás natural e petróleo. Estes aspetos permitem resolver os problemas da ordem ambiental e irão atenuar a inflação do custo do petróleo a nível mundial.

2.4. Enquadramento nacional

Uma vez que Portugal é um país que não dispõe de recursos naturais fósseis, como tal depende de países como Angola para importar petróleo, e tendo em conta que as energias renováveis podem ser exploradas localmente, existe um aumento do consumo e aproveitamento de energias renováveis no país. Segundo o estudo realizado pela Enerdata, Portugal ocupa a 1ª posição no ranking mundial de produção de energia de eletricidade, através da energia solar e energia eólica, e é o 8º país que mais produz eletricidade através de energias renováveis no mundo.

Esta notável produção de eletricidade a nível nacional permitiu que, durante 4 dias consecutivos, Portugal fosse inteiramente abastecido por fontes energias renováveis, tendo por este destaque na imprensa europeia.

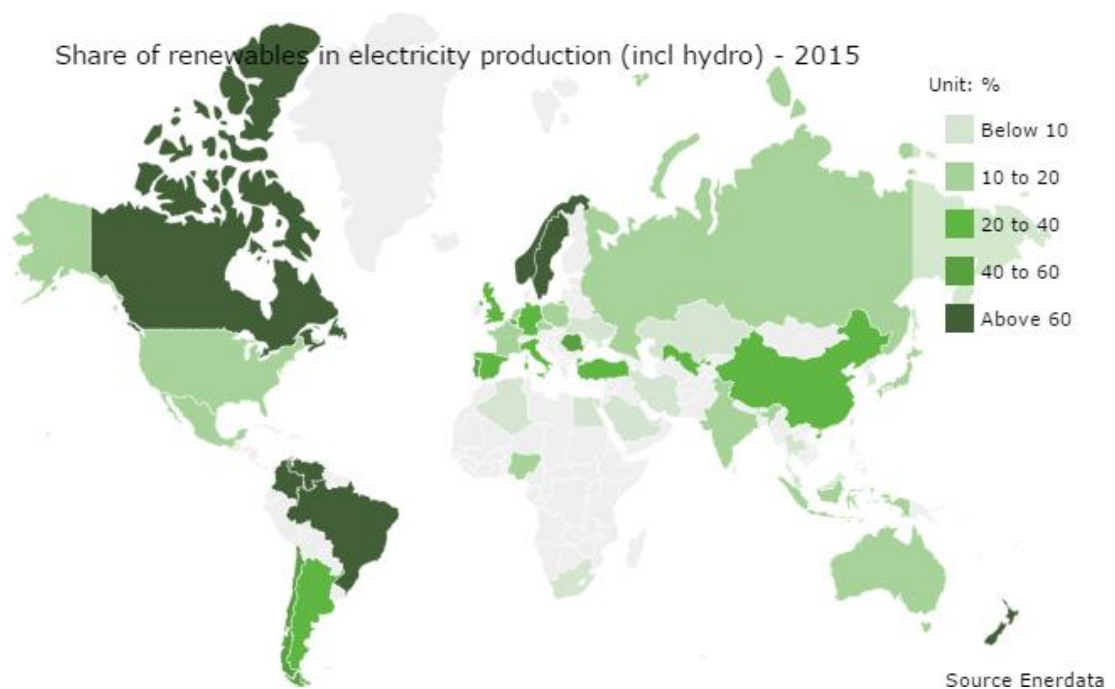


Figura 4 - Mapa da percentagem de eletricidade produzida através de energias renováveis (Enerdata).

De acordo com a Apren e a Quercus, em 2013, o aproveitamento das energias renováveis permitiu poupar cerca de 850 milhões de euros: 806 milhões de euros na importação de

combustíveis fósseis (gás natural e carvão) e 40 milhões de euros em licenças de emissão de dióxido de carbono (CO₂).

Para além destes aspetos que revelam um enorme potencial no aproveitamento de energia renováveis em Portugal, as ondas portuguesas têm uma característica muito favorável ao aproveitamento da sua energia, nomeadamente na costa ocidental do continente e nas ilhas dos Açores: o fluxo de energia contido em cada onda é de 25 a 30 kW/m. Este foi um dos motivos que tornou Portugal num dos países pioneiros a desenvolver duas centrais de aproveitamento de energia das ondas: uma na ilha do Pico (junto à costa) e a outra em Castelo de Neiva (no mar).

2.5. Mecanismos de extração de energia das ondas

Ao longo das últimas décadas, têm sido analisados e desenvolvidos novos métodos, dispositivos e técnicas para conversão de ondas marítimas em energia elétrica. A Tabela 3 descreve sumariamente os diversos tipos de mecanismos de extração de energia das ondas existentes.

Dispositivo	Site	País	Classificação	Fase
Aegir Dynamo	http://www.crses.sun.ac.za/files/technologies/ocean/WaveEnergyConvertors.pdf	Reino Unido	Nearshore & Offshore	Testado em laboratório
Anaconda	http://www.crses.sun.ac.za/files/technologies/ocean/WaveEnergyConvertors.pdf	Reino Unido	Nearshore	Testado em laboratório
AquaBouy	http://www.finavera.com/sites/default/files/pdfs/2007-10-05%20Finavera%20Renewables%20AquaBuoy%202.0%20Deployment%20Update.pdf	Canada	Offshore	Instalado
bioWave	http://www.biopowersystems.com/biowave.html	Austrália	Nearshore	Testado em laboratório
CETO	http://www.carnegiewave.com	Austrália	Offshore	Testar em Oceano
Drakoo	http://www.hann-ocean.com	Singapura	Nearshore & Offshore	Instalado
Floating absorbers	http://www.eurowaveenergy.com	Noruega	Nearshore & Offshore	Testado em Laboratório

FWPES	http://atecom.ru	Rússia	Offshore	Testado em Laboratório
Hydro Air	http://www.dresser-rand.com	EUA	Onshore & Nearshore & Offshore	Testado em laboratório
Manchester Bobber	http://www.reuk.co.uk/Manchester-Bobber-Wave-Power.htm	Reino Unido	Offshore	Testado em laboratório
McCabe Wave Pump	http://oceanenergysys.com	Irlanda	Nearshore & Offshore	Instalado
OE Buoy	http://www.oceanenergy.ie	Irlanda	Nearshore	Protótipo instalado no Oceano
OMI CES	http://oceanmotionintl.com	EUA	Offshore	Testado em laboratório
Oyster	http://www.aquamarinepower.com	Reino Unido	Nearshore	Instalado
Pelagic	http://www.pelagicpower.no	Noruega	Nearshore & Offshore	Instalado
Pontoon	http://www.pontoon.no	Noruega	Offshore	Instalado
Poseidon	http://www.poseidonorgan.com	Dinamarca	Offshore	Testado em Oceano
PS Frog	http://www.engineering.lancs.ac.uk/lureg/group_research/wave_energy_research/index.php	Reino Unido	Nearshore	Testado em Oceano
Rho Cee	http://www.floatinc.org	EUA	Offshore	Testado em Laboratório
Searaser	http://www.ecotricity.co.uk/our-green-energy/our-green-electricity/and-the-sea/seamills	Reino Unido	Offshore	Protótipo instalado em Oceano
SeaRay	http://columbiapwr.com	E.U.A	Offshore	Protótipo instalado em Oceano
Seatricity	http://www.seatricity.net	Reino Unido	Offshore	Testado em laboratório
SurgeDrive	http://www.aquagen.com.au	Austrália	Offshore	Testado em Laboratório
Vigor	http://www.vigorwave.com	Suécia	Nearshore	Testado no Oceano

Wave Dragon	http://www.wavedragon.net	Dinamarca	Nearshore & Offshore	Instalado
WaveRiver	http://www.waveriderenergy.com.au	Austrália	Offshore	Protótipo instalado no Oceano
Wempower	http://www.wempower.it	Itália	Offshore	Protótipo instalado no Oceano
Weptos	http://www.weptos.com	Dinamarca	Offshore	Testado em Laboratório
WRASPA	http://www.engineering.lancs.ac.uk/lu/reg/group_research/wave_energy_research/wraspa.php	Reino Unido	Nearshore	Testado em Laboratório
Yeti	http://avium.com.tr	Turquia	Offshore	Protótipo instalado no Oceano

Tabela 3 - Tipos de mecanismos de extração de energia de ondas existentes (Silva, Jorge (2014) “Desenvolvimento de um Mecanismo de Produção de Energia Elétrica Através das Ondas do Mar”).

2.5.1. Insucessos de mecanismos de extração de energia das ondas

Apesar dos grandes desenvolvimentos nas técnicas e tecnologias de extração de energia das ondas, alguns mecanismos apresentam falhas que provocam o insucesso do sistema. Serve de exemplo o “Pico Plant” instalado na Ilha do Pico, o “Pelamis” instalado na Póvoa do Varzim e o “CETO” instalado na Ilha da Reunião.



Figura 5 - Mecanismo "Pico Plant" (WavEC).



Figura 6 – Mecanismo "Pelamis" (Buildipedia).



Figura 7 - Mecanismo "CETO" (Offshorewind).

O dispositivo “Pico Plant” é um sistema de obtenção de energia cujo princípio de funcionamento é baseado na teoria da coluna de água oscilante: a variação da quantidade de água e ar no interior da câmara pneumática contida numa estrutura de betão aciona uma turbina de ar. Esta turbina aciona o gerador elétrico. O “Pico Plant” encontra-se atualmente inativo e em risco de colapso, devido à deterioração da estrutura de betão. Esta deterioração foi provocada pela força de rebentamento das ondas. As fundações deste dispositivo também se encontram em risco de colapso devido à erosão da costa marinha.



Figura 8 - Princípio de funcionamento do "Pico Plant" (Save Pico Powerplant).

O sistema “Pelamis” é composto por vários módulos cilíndricos que se encontram unidos por juntas flexíveis, com dimensão longitudinal da ordem de grandeza do comprimento de onda e está disposto no sentido de propagação de onda para que quando esta passar se gere um efeito de bombeamento (Portal Energia).

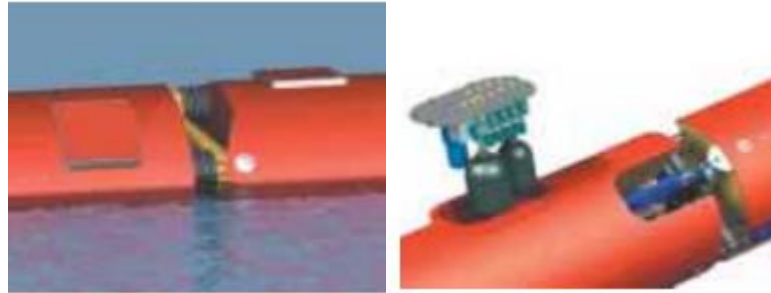


Figura 9- Detalhe das ligações dos módulos cilíndricos (Uma Nova Alternativa).

Em 2008, foram testados três protótipos do “Pelamis” à escala real na Praia da Aguçadoura, Póvoa de Varzim. Apesar dos problemas financeiros que surgiram três meses após o início dos testes, foram encontradas duas falhas técnicas no mecanismo: a falha primeira falha detetada foi a espuma que impulsionava a flutuação do sistema, pois esta não era adequada; a segunda falha foi encontrada nas ligações dos módulos cilíndricos, uma vez que estas se desgastaram antes do tempo previsto.

O mecanismo “CETO”, ao contrário dos anteriormente analisados, é um dispositivo que se encontra totalmente submerso. É composto por boias ligadas, através de um cabo, a uma bomba hidráulica ancorada ao fundo do oceano. O movimento das boias aciona os geradores, que se encontram no seu interior, e as bombas. A energia assim gerada é transportada para a costa através de cabos submarinos. Em janeiro de 2014, o ciclone Bejisa provocou o colapso do cabo que une as boias às bombas do dispositivo que se encontrava instalado na ilha de Reunião.

2.5.2. Mecanismos de extração de energia similares ao proposto

De entre os diversos mecanismos de extração de energia das ondas existentes, destacam-se dois particularmente semelhantes ao sistema em estudo: o “Wave Star” e o “Usina de ondas”.



Figura 10 - Mecanismo "Wave Star" (Wavestar). Figura 11 - Mecanismo "Usina de Ondas" (Fenatema).

Qualquer um destes mecanismos é destinado a gerar energia elétrica, exclusivamente, através do movimento vertical da superfície do mar. Isto é, não se considera a componente horizontal do movimento elíptico característico das partículas de água do mar. Outro aspeto similar ao sistema em desenvolvimento no trabalho que estes dois dispositivos apresentam é o movimento do flutuador ao longo do tempo. Este descreve uma função sinusoidal com as mesmas amplitudes da onda, que provoca movimentações no macaco hidráulico. Através da energia mecânica assim gerada, dá-se a rotação de uma turbina que a transforma em energia elétrica. Também é idêntico o movimento de cada um destes sistemas, que descreve um arco de circunferência (onde o deslocamento máximo do movimento ocorre no instante em que o flutuador se encontra na crista da onda).

A principal diferença que distingue o “Wave Star” do “Usina de ondas”, e deste último ao sistema proposto nesta dissertação, é a sua localização. O “Wave Star” é uma plataforma instalada em alto mar (estrutura *offshore*) enquanto o “Usina das Ondas” está fixo à costa marítima (estrutura *onshore*). Outro aspeto que difere entre estes dois sistemas é o tipo de onda a que cada um está sujeito. Sendo o “Wave Star” dinamarquês e, portanto, instalado a Norte do Atlântico, este dispositivo foi projetado para resistir a marés bravas e com grande quantidade de energia nelas contidas. O “Usina de ondas”, instalado na costa leste do Brasil, foi dimensionado para pequenas agitações marítimas. Outra diferença entre os dois mecanismos é o facto de a altura da plataforma do “Wave Star” ser ajustável isto é, pode se manter a distância entre o nível do mar e a plataforma. O mesmo não acontece com o “Usina de ondas”. Contudo, este aparelho pode ser remotamente recolhido, à semelhança do “Wave Star”, em condições meteorológicas extremas (tempestades e/ou furacões).

3 APRESENTAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

3.1 Introdução

Nas últimas décadas, as técnicas e estudos desenvolvidos são realizados em prol das necessidades quotidianas da sociedade, procurando minimizar os gastos energéticos. Desta forma, estes estudos e técnicas têm como objetivo a criação de equipamentos e sistemas que transformam o máximo da energia recebida em diversos tipos de energia final, diminuindo, assim, a energia perdida para o meio ambiente, isto é, equipamentos e sistemas com grande rendimento e eficiência energética. No âmbito da engenharia, estes equipamentos variam desde dispositivos fixos a estruturas pré-programadas com deslocamentos translacionais e rotacionais. Estas estruturas denominam-se por robots e requerem estudos extensos e modelações complexas para o seu desenvolvimento.

Em (Silva 2014) desenvolveu-se um modelo teórico para um sistema multicorpo constituído por 4 corpos: uma torre fixa ao fundo do mar, um flutuador e dois braços mecânicos, estando um deles articulado com a torre e com o outro braço que, por sua vez, se encontra fixo ao flutuador. Esta modelação foi baseada numa das mais importantes metodologias de estudo do comportamento dinâmico de estruturas, a Dinâmica Multicorpo (Shabana 2013). Neste estudo, Jorge Silva descreveu o movimento das ondas marítimas através da aproximação de 2ª ordem de Stokes, determinou a pressão que as ondas exercem sobre o flutuador, formulou o sistema de equilíbrio dinâmico adotando a metodologia de análise do movimento do corpo rígido no espaço tridimensional e apresentou uma estratégia de integração no tempo que, devido à alta não linearidade do problema dinâmico, originou problemas na convergência de resultados. Assim, com o intuito de contextualizar o procedimento de resolução do problema, apresentando uma nova estratégia para o efeito, este capítulo apresenta pormenorizadamente o modelo formulado a partir do modelo desenvolvido em 2014, que servirá de base para todo o desenvolvimento da presente dissertação.

3.2 Caracterização do gerador

A estrutura em estudo é constituída por 4 corpos rígidos com as seguintes características:

- Corpo 1- Torre que suporta todo o sistema, com o sistema de eixos ${}^1X{}^1Y{}^1Z$. Este corpo encontra-se rigidamente ligado ao fundo do mar através do ponto A;
- Corpo 2- Braço mecânico que acompanha e transmite à torre o movimento das ondas marítimas. Este corpo está ligado à torre através do ponto B e a outro braço

mecânico através do ponto C. Este braço mecânico está associado ao sistema de eixos local ${}^2X^2Y^2Z$.

Corpo 3- Braço mecânico que, juntamente com o corpo 2, acompanha o movimento das ondas. Tem o sistema de eixos local ${}^3X^3Y^3Z$ e está rigidamente ligado ao flutuador.

Corpo 4- Flutuador que capta e transmite a energia cinética das ondas do mar ao sistema. Os eixos de coordenadas associados a este corpo são ${}^4X^4Y^4Z$.

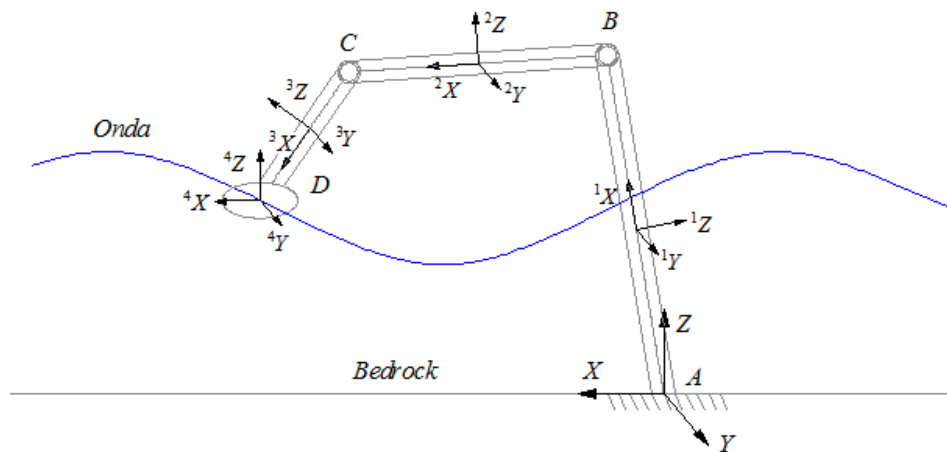


Figura 12 – Representação do sistema de eixos global (X,Y,Z) e dos sistemas de eixos locais (Silva, Jorge (2014) “Desenvolvimento de um Mecanismo de Produção de Energia Elétrica Através das Ondas do Mar”).

Importa referir que foi considerado que o sistema de eixos local coincide com o centro de gravidade de cada corpo (consideração necessária para simplificar a equação de equilíbrio). Atendendo ainda ao facto de que os corpos são rígidos, isto é, indeformáveis, a posição de quaisquer dos seus pontos relativamente ao sistema de eixos local associado é fixa. Assim, as coordenadas de um ponto iP no respetivo sistema local, ${}^i\bar{u}$, são transformadas em coordenadas no sistema global, ${}^i r$, através da matriz de transformação, iA , e do vetor de posição, iR , do sistema de eixos local (no referencial global), ${}^iX {}^iY {}^iZ$:

$${}^i r = {}^i R + {}^i A \cdot {}^i \bar{u} \quad (1)$$

A metodologia usada para definir a matriz de transformação, iA , foi a dos parâmetros de Euler. De acordo com esta metodologia, o corpo sofre uma rotação segundo a sequência Z-X-Z. Para evitar singularidades na definição da matriz iA , em vez dos três ângulos associados a esta rotação (ângulos de Euler) recorre-se aos parâmetros a eles relacionados- parâmetros de Euler. Existem quatro parâmetros de Euler, ${}^i\theta_0, {}^i\theta_1, {}^i\theta_2, {}^i\theta_3$, e uma vez que pelo menos um deles é

linearmente dependente, foi considerada a condição de normalidade estabelecida em (5). Desta forma, o movimento de cada corpo, ${}^i q$, é definido por 7 coordenadas – 3 coordenadas de translação, ${}^i r$, e 4 coordenadas de rotação que correspondem aos parâmetros de Euler, ${}^i \theta$.

$${}^i q = \left[{}^i R_x \quad {}^i R_y \quad {}^i R_z \quad {}^i \theta_0 \quad {}^i \theta_1 \quad {}^i \theta_2 \quad {}^i \theta_3 \right]^T \quad (2)$$

$${}^i r = \left[{}^i R_x \quad {}^i R_y \quad {}^i R_z \right]^T \quad (3)$$

$${}^i \theta = \left[{}^i \theta_0 \quad {}^i \theta_1 \quad {}^i \theta_2 \quad {}^i \theta_3 \right]^T \quad (4)$$

$$\sum_{k=0}^3 ({}^i \theta_k)^2 = {}^i \theta^T {}^i \theta = 1 \quad (5)$$

Assim, a matriz de transformação, ${}^i A$, é expressa da seguinte forma:

$${}^i A = \begin{bmatrix} 2[({}^i \theta_0)^2 + ({}^i \theta_1)^2] - 1 & 2({}^i \theta_1 {}^i \theta_2 - {}^i \theta_0 {}^i \theta_3) & 2({}^i \theta_1 {}^i \theta_3 + {}^i \theta_0 {}^i \theta_2) \\ 2({}^i \theta_1 {}^i \theta_2 + {}^i \theta_0 {}^i \theta_3) & 2[({}^i \theta_0)^2 + ({}^i \theta_2)^2] - 1 & 2({}^i \theta_2 {}^i \theta_3 - {}^i \theta_0 {}^i \theta_1) \\ 2({}^i \theta_1 {}^i \theta_3 - {}^i \theta_0 {}^i \theta_2) & 2({}^i \theta_2 {}^i \theta_3 + {}^i \theta_0 {}^i \theta_1) & 2[({}^i \theta_0)^2 + ({}^i \theta_3)^2] - 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Definida a matriz E , para coordenadas globais, e a matriz \bar{E} , para coordenadas locais, conforme se apresenta em (8), a matriz de transformação ${}^i A$ pode ser expressa de forma simplificada:

$${}^i A = {}^i E {}^i \bar{E}^T \quad (7)$$

$${}^i E = \begin{bmatrix} -{}^i \theta_1 & {}^i \theta_0 & -{}^i \theta_3 & {}^i \theta_2 \\ -{}^i \theta_2 & {}^i \theta_3 & {}^i \theta_0 & -{}^i \theta_1 \\ -{}^i \theta_3 & -{}^i \theta_2 & {}^i \theta_1 & {}^i \theta_0 \end{bmatrix}, \quad {}^i \bar{E} = \begin{bmatrix} -{}^i \theta_1 & {}^i \theta_0 & {}^i \theta_3 & -{}^i \theta_2 \\ -{}^i \theta_2 & -{}^i \theta_3 & {}^i \theta_0 & {}^i \theta_1 \\ -{}^i \theta_3 & {}^i \theta_2 & -{}^i \theta_1 & {}^i \theta_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

3.3 Propriedades de massa e inércia dos corpos

Duas das propriedades mecânicas mais importantes para definir o equilíbrio dinâmico de um corpo é a sua massa e a sua inércia. A matriz de massa de cada corpo, ${}^i M$, foi determinada

através da sua massa total, ${}^i m$, e dos momentos de inércia, i_{xx} , i_{yy} e i_{zz} , em relação aos eixos locais x, y e z, respetivamente.

$${}^i M = \begin{bmatrix} {}^i m_{RR} & 0 \\ 0 & {}^i m_{\theta\theta} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$${}^i m_{RR} = \begin{bmatrix} {}^i m & 0 & 0 \\ 0 & {}^i m & 0 \\ 0 & 0 & {}^i m \end{bmatrix} \quad (10)$$

$${}^i m_{\theta\theta} = {}^i \bar{G}^T \cdot {}^i \bar{I}_{\theta\theta} \cdot {}^i \bar{G} \quad (11)$$

$${}^i \bar{G} = 2 {}^i \bar{E} \quad (12)$$

$${}^i \bar{I}_{\theta\theta} = \begin{bmatrix} {}^i i_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & {}^i i_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & {}^i i_{zz} \end{bmatrix} \quad (13)$$

A partir da assemblagem da matriz de massa de cada corpo, ${}^i M$, onde $i=1, \dots, 4$, obtêm-se a matriz de massa total da estrutura tridimensional, M , cuja dimensão é de 28 linhas e 28 colunas)

$$M = \begin{bmatrix} {}^1 M & 0 & 0 & 0 \\ 0 & {}^2 M & 0 & 0 \\ 0 & 0 & {}^3 M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & {}^4 M \end{bmatrix} \quad (14)$$

3.4 Matriz de restrições

Conforme dito anteriormente, existem 4 pontos, A, B, C e D, que estabelecem ligações entre os corpos e o fundo do mar, ligação A, ligação B, ligação C e ligação D, respetivamente.

A ligação A é uma ligação rígida (encastramento) entre o corpo 1 e o fundo do mar como tal, todas as translações e rotações estão impedidas. Assim, a matriz de restrições associada a esta ligação, C_A , foi modelada através do movimento do ponto A no corpo 1, isto é das coordenadas

globais de translação 1r_A , obtidas de acordo com (1), e das coordenadas globais de rotação, ${}^1\theta_A$, e através de dois vetores constantes, k_r e k_θ , que representam a posição relativa entre os eixos do corpo 1 e do fundo do mar:

$$C_A({}^1q) = \begin{bmatrix} {}^1r_A - k_{rA} \\ {}^1\theta_A - k_{\theta A} \end{bmatrix} = 0 \quad (15)$$

A ligação B corresponde a uma ligação universal entre o corpo 1 e o corpo 2. Esta ligação impede todas as translações relativas e não permite a rotação relativa entre o eixo 1h , pertencente ao corpo 1, e o eixo 2h , pertencente ao corpo 2, conforme se apresenta na Figura 13.

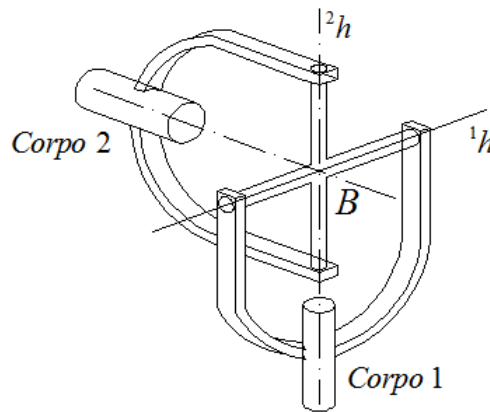


Figura 13 – Representação da ligação universal entre o corpo 1 e o corpo 2 (Silva, Jorge (2014) “Desenvolvimento de um Mecanismo de Produção de Energia Elétrica Através das Ondas do Mar”).

Através das coordenadas globais de translação do corpo 1, 1r_B , das coordenadas globais de translação do corpo 2, 2r_B , e da perpendicularidade ente o eixo 1h e o eixo 2h , a matriz de restrições formulada para a ligação B, C_B , é a que se apresenta de seguida:

$$C_B({}^1q, {}^2q) = \begin{bmatrix} {}^1r_B - {}^2r_B \\ {}^1h^T {}^2h \end{bmatrix} = 0 \quad (16)$$

Os versores associados ao eixo 1h e o eixo 2h foram definidos em coordenadas locais através da seguinte expressão:

$$\begin{cases} {}^1\bar{h}_B = [0 & 1 & 0] \\ {}^2\bar{h}_B = [0 & 0 & 1] \end{cases} \quad (17)$$

Assim, a restrição associada à perpendicularidade dos dois eixos foi definida por:

$${}^1A^1\bar{h}_B \cdot {}^2A^2\bar{h}_B = 0 \quad (18)$$

A ligação C é uma ligação revolutiva. Esta ligação não permite que o ponto C do corpo 2 tenha qualquer tipo de translação relativamente ao ponto C do corpo 3 e permite apenas uma rotação ente estes dois corpos segundo o eixo ${}^{23}h$.

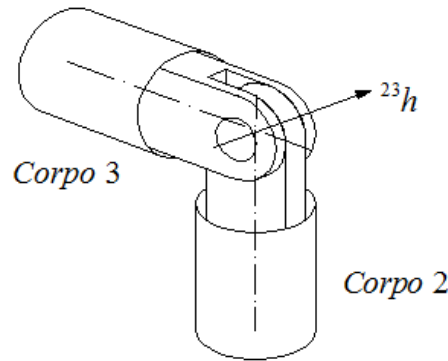


Figura 14 – Representação da ligação revolutiva entre o corpo 2 e o corpo 3 (Silva, Jorge (2014) “Desenvolvimento de um Mecanismo de Produção de Energia Elétrica Através das Ondas do Mar”).

A matriz de restrição associada à ligação C, C_C , foi estabelecida através das coordenadas globais de translação do corpo 2 e do corpo 3, 2r_C e 3r_C respetivamente, e através dos eixos 3v_1 , 3v_2 e ${}^{23}h$.

$$C_C({}^2q, {}^3q) = \begin{bmatrix} {}^2r_C - {}^3r_C \\ {}^2v_1^T {}^3v \\ {}^2v_2^T {}^3v \end{bmatrix} = 0 \quad (19)$$

Para garantir a perpendicularidade do versor associado ao eixo ${}^{23}h$, isto é o versor do corpo 2 2h_C cujas coordenadas locais são as definidas em (21), a dois eixos distintos e ortogonais do corpo 3, cujos versores são ${}^3v_{C,1}$ e ${}^3v_{C,2}$ de coordenadas locais estabelecidas em (22), formularam-se as seguintes restrições de rotação:

$$\begin{cases} ({}^2A \cdot {}^2\bar{h}_c) \cdot ({}^3A \cdot {}^3\bar{v}_{C,1}) = 0 \\ ({}^2A \cdot {}^2\bar{h}_c) \cdot ({}^3A \cdot {}^3\bar{v}_{C,2}) = 0 \end{cases} \quad (20)$$

$${}^2\bar{h}_c = [0 \quad 1 \quad 0] \quad (21)$$

$$\begin{cases} {}^3\bar{v}_{C,1} = [1 \quad 0 \quad 0] \\ {}^3\bar{v}_{C,2} = [0 \quad 0 \quad 1] \end{cases} \quad (22)$$

A ligação D é uma ligação rígida (encastramento), que impede qualquer translação relativa entre o ponto D do corpo 3 e o ponto D do corpo 4, 3r_D e 4r_D , e qualquer rotação relativa entre o mesmo ponto D do corpo 3 e 4, ${}^3\theta_D$ e ${}^4\theta_D$. Assim, analogamente ao apresentado para a ligação A, a matriz de restrições associada a esta ligação é:

$$C_D({}^3q, {}^4q) = \begin{bmatrix} {}^3r_D - {}^4r_D - k_{rD} \\ {}^3\theta_D - {}^4\theta_D - k_{\theta D} \end{bmatrix} = 0 \quad (23)$$

A matriz de restrições global da estrutura, C , é dada pela junção de todas as restrições correspondentes a cada ligação, originando, assim, uma matriz de 21 linhas.

$$C = [C_A, C_B, C_C, C_D]^T \quad (24)$$

3.4.1 Matriz Jacobeana das Restrições

Na equação do sistema de equilíbrio, utiliza-se a matriz Jacobeana do vetor de restrições. Esta matriz tem 21 linhas isto é, 21 restrições, e 28 colunas, que corresponde ao número de coordenadas. Assim, no modelo adotado, cada termo (i,j) da matriz Jacobeana corresponde a uma restrição C_i em função da coordenada global q_j .

$${}^{i,j}C_q = \frac{\partial C_i}{\partial q_j} \quad (25)$$

3.5 Ação do mar

3.5.1 Considerações iniciais

O estudo da ação do mar é uma das matérias mais desafiantes da Hidráulica, sendo que a maioria dos trabalhos realizados neste âmbito consideram a modelação de ondas através de duas abordagens distintas: empírica e física. Os modelos empíricos são usados, por exemplo, para o *design* de jogos, sendo os modelos mais conhecidos o de Fournier e Reeves (1986), Peachey (1986), Ts'ó e Barsky (1987), Imamiya e Zhang (1995). Os modelos físicos são adotados nos estudos científicos, como o da presente dissertação, e adotam-se equações baseadas na dinâmica dos fluídos para representarem o movimento da água ao longo do tempo (Alex Salgado, Aura Conci e Esteban Clua).

Vários têm sido os modelos físicos formulados para a simulação do comportamento das ondas, desde os mais simples e baseados na teoria linear, tal como a primeira aproximação matemática realizada por Airy (1841) (que poderá ser usada nos casos de grande profundidade), até a aproximações mais complexas e não lineares, como é o caso das aproximações de Stokes (que são uma extensão da equação de Airy até a 5ª ordem, sendo que a aproximação de Stokes de 1ª ordem corresponde à aproximação de Airy). Neste trabalho irão ser abordadas e é justificado o recurso a aproximações de 1ª e de 2ª ordem de Stokes para descrever o movimento das ondas.

Existem três tipos de onda: i) as ondas geradas pelo vento ou ondas progressivas, que resultam da interação entre a superfície livre do mar e o vento, ii) as ondas de *tsunami*, que são originadas por movimentos verticais repentinos do fundo do mar, e iii) as ondas de maré, que resultam da interação gravítica entre a Terra, o Sol e a Lua. Uma vez que, na costa portuguesa o período de oscilação das ondas de maré é de aproximadamente 12.5 horas, e que os *tsunamis* possuem uma probabilidade de ocorrência muito inferior às dos restantes tipos de onda, considera-se que o corpo flutuante do sistema em desenvolvimento nesta Dissertação está sob a ação apenas das ondas progressivas devidas ao vento, estando, conseqüentemente, sujeito a ações de onda com períodos compreendidos entre 6 e 15 segundos (o que corresponde à situação mais comum). Pretende-se, também, que o sistema esteja posicionado onde o movimento das partículas é elíptico, ou seja, para profundidades de 15 a 25 metros. Desta forma, o eixo horizontal é maior do que o eixo vertical permitindo que a quantidade de energia extraída da componente horizontal da velocidade seja maior. Outra vantagem é o facto de o sistema permanecer em segurança, visto que se encontra suficientemente afastado da zona de rebentação das ondas ao mesmo tempo que não implica custos superiores de construção e de meios de transporte da energia gerada (uma vez que se encontra relativamente perto da costa). Interessa, também, instalar o sistema nesta zona de profundidades, de modo a aproveitar a orientação regular que as ondas aqui apresentam. Este facto resulta numa homogeneização do rumo da onda e, desta

forma, “as ondas têm uma orientação e um rumo regular, permitindo definir melhor as propriedades do gerador” (Silva, 2014).

3.5.2 Metodologia de cálculo da velocidade, aceleração, variação da superfície livre em relação à superfície livre em repouso e pressão total

Através do parâmetro da profundidade relativa, $\frac{h}{L}$, é possível caracterizar o comportamento de uma onda. Uma vez que o meio e as ondas consideradas no presente modelo apresentam um valor de $\frac{h}{L}$ compreendido entre 0.10 e 0.50, o movimento de uma onda pode ser razoavelmente descrito pela aproximação de Stokes de 2ª ordem (Antunes do Carmo, 2016). Como se demonstra em seguida, esta aproximação é uma extensão da teoria linear, ou aproximação de Stokes de 1ª ordem. Embora a teoria linear seja menos rigorosa para a descrição do comportamento da onda nas condições descritas, os correspondentes erros são de ordens de grandeza inferiores às incertezas associadas aos valores dos parâmetros da onda (amplitude, período e comprimento de onda). Por esta razão, a teoria linear (ou aproximação de 1ª ordem de Stokes) é frequentemente utilizada em estudos desta natureza.

As variáveis e o sistema de eixos necessários para caracterizar uma onda progressiva encontram-se representadas na Figura 15, sendo o eixo dos y a direção perpendicular ao plano da figura.

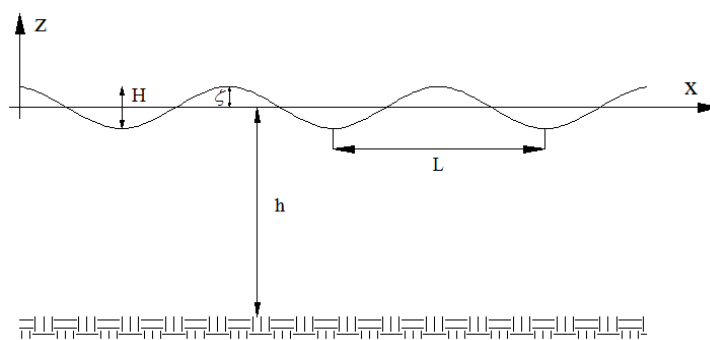


Figura 15 – Propriedades da onda progressiva (Silva, Jorge (2014) “Desenvolvimento de um Mecanismo de Produção de Energia Elétrica Através das Ondas do Mar”).

Atendendo ao anteriormente exposto, conhecendo a altura de onda, H , a profundidade do local, h , o comprimento de onda, L , o período de onda, T , a frequência angular, ω , e o ângulo que a normal da crista da onda faz com o eixo x (rumo da onda), α , o potencial de velocidades, ϕ , é definido da seguinte forma, em 1ª aproximação (ou aproximação de 1ª ordem de Stokes).

$$\varphi = \varphi(x, y, z, t) = -\frac{H L}{2 T} \frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \text{sen}(k_x x + k_y y - \omega t) \quad (26)$$

Derivando o potencial de velocidade φ em ordem ao espaço obtêm-se as seguintes componentes u , v e w da velocidade:

$$u = -\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{H k_x L}{2 T} \frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \cos(k_x x + k_y y - \omega t) \quad (27)$$

$$v = -\frac{\partial \varphi}{\partial y} = \frac{H k_y L}{2 T} \frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \cos(k_x x + k_y y - \omega t) \quad (28)$$

$$w = -\frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \text{sen}(k_x x + k_y y - \omega t) \quad (29)$$

Sendo a pressão total obtida a partir de $p = -\underbrace{\rho g z}_{\text{hidrostática}} - \underbrace{\rho \frac{\partial \varphi}{\partial t}}_{\text{dinâmica}}$, com a pressão dinâmica, $p_{\text{din.}}$, dada

por:

$$p_{\text{din.}} = \rho g \frac{H}{2} \frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \cos(k_x x + k_y y - \omega t) \quad (30)$$

Em 2ª aproximação (ou aproximação de 2ª ordem de Stokes) o potencial de velocidade é definido como se segue:

$$\begin{aligned} \varphi = \varphi(x, y, z, t) &= \frac{H L}{2 T} \frac{\cosh[k(h+z)]}{\sinh(kh)} \text{sen}(k_x x + k_y y - \omega t) \\ &+ \frac{3\pi H^2}{16T} \frac{\cosh[2k(h+z)]}{\sinh^4(kh)} \text{sen}[2(k_x x + k_y y - \omega t)] \end{aligned} \quad (31)$$

sendo que $k = 2\pi/L$, $k_x = 2\pi/L_x$, $k_y = 2\pi/L_y$, $L_x = L \cos(\alpha)$ e $L_y = L \sin(\alpha)$.

Derivando a expressão (30), determinam-se, igualmente em 2ª aproximação, as componentes de velocidade segundo a direção x , u , segundo a direção y , v , e segundo a direção z , w ,

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{H k_x L}{2T} \frac{\cosh[k(h+z)]}{\sinh(kh)} \cos[(k_x x + k_y y - \omega t)] + \frac{3 H^2 k_x \pi}{8 T} \frac{\cosh[2k(h+z)]}{\sinh^4(kh)} \cos[2(k_x x + k_y y - \omega t)] \quad (32)$$

$$v = \frac{\partial \varphi}{\partial y} = \frac{H k_y L}{2T} \frac{\cosh[k(h+z)]}{\sinh(kh)} \cos[(k_x x + k_y y - \omega t)] + \frac{3 H^2 k_y \pi}{8 T} \frac{\cosh[2k(h+z)]}{\sinh^4(kh)} \cos[2(k_x x + k_y y - \omega t)] \quad (33)$$

$$w = \frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh[k(h+z)]}{\sinh(kh)} \sin[(k_x x + k_y y - \omega t)] + \frac{3 (\pi H)^2}{4 T L} \frac{\sinh[2k(h+z)]}{\sinh^4(kh)} \sin[2(k_x x + k_y y - \omega t)] \quad (34)$$

As componentes de aceleração, \dot{u} , \dot{v} e \dot{w} , segundo as três direções, respetivamente, x, y e z, são obtidas derivando as expressões das componentes da velocidade em ordem ao tempo, isto é,

$$\dot{u}_w = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial t}; \dot{v} = \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y \partial t}; \dot{w} = \frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z \partial t} \quad (35)$$

O cálculo da variação da superfície livre em relação à superfície livre em repouso, ζ , é realizado através da seguinte expressão:

$$\zeta = \frac{H}{2} \cos(k_x x + k_y y - \omega t) + \frac{\pi H^2}{8L} \left[\frac{2 + \cosh(2kh)}{\sinh^3(kh)} \right] \cosh(kh) \cos[2(k_x x + k_y y - \omega t)] \quad (36)$$

Para o cálculo da pressão total, p , em qualquer ponto abaixo da superfície livre, obtém-se a seguinte equação, igualmente em 2ª aproximação:

$$\begin{aligned}
 p = & \rho g \frac{H}{2} \frac{\cosh[2\pi(h+z)/L]}{\cosh(2\pi h/L)} \cos(k_x x + k_y y - \omega t) - \rho g z \\
 & + \frac{3}{8} \rho g \frac{\pi H^2}{L} \frac{\tanh(2\pi h/L)}{\sinh^2(2\pi h/L)} \left\{ \frac{\cosh[4\pi(h+z)/L]}{\sinh^2(2\pi h/L)} - \frac{1}{3} \right\} \cos[2(k_x x + k_y y - \omega t)] \quad (37) \\
 & - \frac{1}{8} \rho g \frac{\pi H^2}{L} \frac{\tanh(2\pi h/L)}{\sinh^2(2\pi h/L)} \{ \cosh[4\pi(h+z)/L] - 1 \}
 \end{aligned}$$

Por conseguinte, para condições de profundidades intermédias já próximas da água profunda, com h/L da ordem de 0.4 a 0.5, os termos adicionais presentes nas aproximações de 2ª ordem são de ordens de grandeza bastante inferiores aos termos considerados nas aproximações de 1ª ordem.

3.5.3 Metodologia de cálculo da pressão no flutuador

Em geral, a menos que se trate de um corpo flutuante de grandes dimensões, a transmissão do movimento é de tal ordem que as forças dominantes são fundamentalmente de inércia, as quais estão relacionadas com as acelerações das partículas de fluido, em vez das forças de ‘arrasto’ que estão relacionados com a velocidade.

Considerando um corpo flutuante pequeno em comparação com o comprimento de onda, uma vez que este corpo se deslocará como uma massa de fluido com idêntico peso, é evidente que as forças que atuam sobre o corpo serão exatamente as mesmas que teriam ocorrido sobre o fluido ao deslocar-se e, portanto, o movimento do corpo vai ser idêntico ao que teria ocorrido com a massa de fluido. Este mesmo resultado também se aplica ao caso de um pequeno corpo flutuando situado em algum ponto na coluna média de água.

No movimento de um fluido real devido à ação de ondas atuando sobre um corpo de dimensões apreciáveis, a força total F_T é dada pela soma de duas componentes, isto é,

$$F_T = F_A + F_I \quad (38)$$

em que F_A é a força de ‘arrasto’, função da componente horizontal da velocidade da onda, e F_I é a força de inércia devida à aceleração do movimento da onda; por conseguinte:

$$F_T = \frac{1}{2} C_A \rho A u |u| + C_M \rho V \frac{du}{dt} \quad (39)$$

em que C_A e C_M são, respetivamente, coeficientes de ‘arrasto’ e de inércia, os quais, em rigor, variam ao longo do comprimento do corpo; C_A é função do número de Reynolds, sendo em geral ordem da unidade; C_M é em geral definido por $C_M = 1 + k_m$, o qual tem a seguinte interpretação: *o gradiente de pressão requerido para acelerar o fluido exerce sobre o corpo uma força de impulsão correspondente ao termo unitário contido naquela definição*. Em primeira aproximação, poderá tomar-se para k_m o valor da relação entre os semi-comprimentos horizontais menor e maior do corpo.

Seja a pressão devido à onda num meio não perturbado, que em primeira aproximação é dada por expressão (30) que aqui se reproduz,

$$p(x, y, z) = \rho g \frac{H}{2} \frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \cos(k_x x + k_y y - \omega t) \quad (40)$$

com $k = 2\pi/L$.

Para um pequeno corpo retangular, com dimensões l_x e l_y , situado na superfície livre e as ondas a propagarem-se com um ângulo θ relativamente ao eixo dos xx (medido no sentido anti-horário), resultam as seguintes expressões para as componentes da força F_x e F_y calculadas no centro do corpo (Dean e Dalrymple, 1984):

$$F_x = \int_{-l_y/2}^{l_y/2} \int_{-d}^0 P\left(-\frac{l_x}{2}, y, z\right) dz dy - \int_{-l_y/2}^{l_y/2} \int_{-d}^0 P\left(\frac{l_x}{2}, y, z\right) dz dy \quad (41)$$

$$F_y = \int_{-l_x/2}^{l_x/2} \int_{-d}^0 P\left(x, -\frac{l_y}{2}, z\right) dz dx - \int_{-l_x/2}^{l_x/2} \int_{-d}^0 P\left(x, \frac{l_y}{2}, z\right) dz dx \quad (42)$$

donde,

$$F_x = \frac{-4\rho g(H/2)}{k_y} \frac{\sinh(kh) - \sinh[k(h-d)]}{k \cosh(kh)} \sin\left(\frac{k_x l_x}{2}\right) \sin\left(\frac{k_y l_y}{2}\right) \sin(\omega t) \quad (43)$$

$$F_y = \frac{-4\rho g(H/2)}{k_x} \frac{\sinh(kh) - \sinh[k(h-d)]}{k \cosh(kh)} \sin\left(\frac{k_y l_y}{2}\right) \sin\left(\frac{k_x l_x}{2}\right) \sin(\omega t) \quad (44)$$

Estas expressões poderão ainda ser formuladas na seguinte forma:

$$F_x = -\rho g \frac{H}{2} d l_x l_y k_x \frac{\sinh(kh) - \sinh[k(h-d)]}{kd \cosh(kh)} \frac{\sin(k_x l_x / 2)}{k_x l_x / 2} \frac{\sin(k_y l_y / 2)}{k_y l_y / 2} \sin(\omega t) \quad (45)$$

$$F_y = -\rho g \frac{H}{2} d l_x l_y k_y \frac{\sinh(kh) - \sinh[k(h-d)]}{kd \cosh(kh)} \frac{\sin(k_x l_x / 2)}{k_x l_x / 2} \frac{\sin(k_y l_y / 2)}{k_y l_y / 2} \sin(\omega t) \quad (46)$$

em que $k_x = k \cos \theta$, $k_y = k \sin \theta$ e d representa a distância vertical entre a superfície livre e a base do corpo.

A componente vertical da força é calculada de igual modo, sendo dada pela espessura (dimensão vertical imersa) do corpo, l_z , pelo volume imerso do corpo, V , e pela dimensão do corpo segundo a direcção de propagação da onda, l .

$$F_z = \rho V \frac{\sinh(k l_z / 2)}{k l_z / 2} \frac{\sin(k l / 2)}{k l / 2} \frac{\partial w}{\partial t} \quad (47)$$

Considerando a superfície de contacto discretizada em j elementos e assumindo que a pressão total, p , é constante ao longo de cada um deles, o cálculo da força de impulsão poderá ser simplificado. Assim, em função das coordenadas do ponto médio de cada elemento, $^i x$, $^i y$ e $^i z$, e atendendo ao facto de que, por se tratar de uma força de pressão, a força de impulsão é sempre perpendicular à área de superfície do respetivo elemento, Ω_j , a força de impulsão no elemento j do corpo i , $^i F_{I,j}$, é dada por:

$$^i F_{I,j} = ^i \hat{v}_j ^i p_j ^i \Omega_j \Leftrightarrow \begin{Bmatrix} ^i F_{Ix,j} \\ ^i F_{Iy,j} \\ ^i F_{Iz,j} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} ^i \hat{v}_{x,j} \\ ^i \hat{v}_{y,j} \\ ^i \hat{v}_{z,j} \end{Bmatrix} ^i p_j ^i \Omega_j \quad (48)$$

A força de impulsão de cada corpo i , $^i F_I$, será, então, o somatório das forças de impulsão de cada elemento j , $^i F_{I,j}$:

$$^i F_x = \sum_{j=1}^n ^i F_{Ix,j} \quad (49)$$

$$^i F_y = \sum_{j=1}^n ^i F_{Iy,j} \quad (50)$$

$${}^i F_z = \sum_{j=1}^n {}^i F_{Iz,j} \quad (51)$$

3.6 Vetor das restantes forças

3.6.1 Considerações iniciais

Existem dois tipos de força a atuar no sistema estrutural: as forças centrífugas e as forças generalizadas exteriores. As forças centrífugas resultam da rotação dos corpos e provocam o seu afastamento do centro de rotação. As forças externas são aplicadas por agentes que não pertencem ao sistema, peso próprio, sistema mola-amortecedor-atuador e a ação descrita anteriormente, a ação do mar.

3.6.2 Vetor de forças centrífugas

Quando um corpo está sujeito a um movimento rotativo com uma velocidade angular, ${}^i \omega$, surge uma força de inércia. Esta força afasta o corpo do seu centro de rotação e denomina-se por força centrífuga. No modelo apresentado neste trabalho, a força centrífuga que atua em cada corpo i , cujo sistema de eixos coincide com o centro de gravidade, foi definida pelo vetor ${}^i Q_v$.

$${}^i Q_v = \begin{bmatrix} ({}^i Q_v)_R \\ ({}^i Q_v)_\theta \end{bmatrix} \quad (52)$$

$$({}^i Q_v)_R = 0 \quad (53)$$

$$({}^i Q_v)_\theta = -{}^i \bar{G}^T \left[{}^i \bar{\omega} \times ({}^i \bar{T}_{\theta\theta} {}^i \bar{\omega}) + {}^i \bar{T}_{\theta\theta} {}^i \bar{G} \dot{{}^i \theta} \right] \quad (54)$$

A matriz ${}^i \bar{G}$ foi definida anteriormente na equação (12), a matriz ${}^i \bar{T}_{\theta\theta}$ foi determinada de acordo com a expressão (13), o vetor das velocidades de rotação, ${}^i \dot{\theta}$, é dado pelo exposto em (55) e as coordenadas locais do vetor de velocidades angulares, ${}^i \bar{\omega}$, são dadas pela expressão (56).

$${}^i \dot{\theta} = \begin{bmatrix} {}^i \dot{\theta}_0 & {}^i \dot{\theta}_1 & {}^i \dot{\theta}_2 & {}^i \dot{\theta}_3 \end{bmatrix}^T \quad (55)$$

$${}^i \bar{\omega} = {}^i \bar{G} {}^i \dot{\theta} \quad (56)$$

$${}^i\dot{G} = 2\dot{E} \quad (57)$$

$${}^i\dot{E} = \begin{bmatrix} -{}^i\dot{\theta}_1 & {}^i\dot{\theta}_0 & {}^i\dot{\theta}_3 & -{}^i\dot{\theta}_2 \\ -{}^i\dot{\theta}_2 & -{}^i\dot{\theta}_3 & {}^i\dot{\theta}_0 & {}^i\dot{\theta}_1 \\ -{}^i\dot{\theta}_3 & {}^i\dot{\theta}_2 & -{}^i\dot{\theta}_1 & {}^i\dot{\theta}_0 \end{bmatrix} \quad (58)$$

O vetor total de forças centrífugas do sistema, Q_v , foi obtido pela assemblagem do vetor de forças centrífugas de cada corpo.

$$Q_v = [{}^1Q_v \quad {}^2Q_v \quad {}^3Q_v \quad {}^4Q_v]^T \quad (59)$$

3.6.3 Vetor de forças exteriores

As forças exteriores foram modeladas em duas parcelas: uma parcela associada às forças aplicadas segundo a direção dos eixos locais iX , iY e iZ , iQ_R , e outra correspondente aos momentos, ${}^iQ_\theta$. Assim, definiu-se o vetor das forças generalizadas exteriores, iQ_e , no seguinte modo:

$${}^iQ_e = \begin{bmatrix} {}^iQ_R \\ {}^iQ_\theta \end{bmatrix} \quad (60)$$

Conforme o indicado anteriormente, existem vários agentes a atuar sobre a estrutura: o peso próprio, a ação do mar e sistema mola-amortecedor-atuador. Para o caso da ação do peso próprio, o vetor iQ_e que lhe está associado tem sempre a direção do eixo global Z e depende da massa do corpo, im , e da aceleração da gravidade ($g = 9.8m/s^2$). Assim, este vetor foi modelado da seguinte forma:

$${}^iQ_e = \begin{bmatrix} {}^iQ_R \\ {}^iQ_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -{}^iPp \quad {}^iA^T [0,0,1] \\ 0 \end{bmatrix} \quad (61)$$

$${}^iPp = {}^im.g \quad (62)$$

A metodologia de descrição do movimento das ondas do mar foi apresentada na secção 3.5 deste capítulo. Atendendo às propriedades da onda, tais como a cota para um dado instante t , $z_{onda,j}$, discretizando o flutuador, corpo 4, em n elementos com área Ω_j muito inferior às dimensões do flutuador e assumindo que o centro de gravidade de cada elemento, cg_j , tem as coordenadas locais e globais definidas em (65) e (66) respetivamente, a força de impulsão no elemento j , ${}^iF_{I,j}$, foi modelada tendo em conta os seguintes critérios:

- i) se a cota do centro geométrico do elemento j for superior à cota da onda a força de pressão nesse ponto é nula:

$$cg_{j,zz} > z_{onda,j} \Rightarrow {}^iF_{I,j} = 0 \quad (63)$$

- ii) se a cota do centro geométrico do elemento j for inferior à cota da onda, a força de pressão é dada pelo integral definido em (64), ao longo da área do elemento j :

$$cg_{j,zz} \leq z_{onda,j} \Rightarrow {}^iF_{I,j} = \int_{\Omega_j} p_j d\Omega_j \approx p_j \cdot \Omega_j \quad (64)$$

$$\bar{g}_j = \begin{bmatrix} {}^i x_j & {}^i y_j & {}^i z_j \end{bmatrix}^T \quad (65)$$

$$g_j = {}^4r + {}^4A \bar{g}_j \quad (66)$$

$$z_{onda,j} = \zeta(CG_{j,xx}, CG_{j,yy}, t, h) \quad (67)$$

A força de impulsão total no flutuador é determinada através do somatório da força de pressão dos n elementos discretizados, conforme indicado em (48).

Para modelar o mecanismo de extração de energia, adotou-se a metodologia de análise do sistema mola-amortecedor-atuador. Admitindo que um corpo i está ligado a outro corpo j por meio de um sistema mola-amortecedor-atuador rotacional, determina-se o momento exercido nesses corpos, T^{ij} , sabendo que: a mola apresenta um coeficiente de rigidez, k , o amortecedor possui um coeficiente de amortecimento, c , e a força do atuador é T_a .

$$T^{ij} = (k^{ij}\theta + c^{ij}\dot{\theta} + T_a) \quad (68)$$

Nesta expressão, $^{ij}\theta$ corresponde à rotação relativa dos corpos e $^{ij}\dot{\theta}$ corresponde à velocidade angular dos corpos.

Desta forma, para cada ligação estabeleceu-se o sistema mola-atuador relativo a cada rotação possível. No caso da ligação B, conforme visto na secção 3.4 deste capítulo, existem duas rotações: uma em torno do eixo 1h do corpo 1, e uma em torno do eixo 2h do corpo 2. Relembrando que estes eixos são sempre perpendiculares, modelou-se o sistema mola-amortecedor para a ligação B em relação ao eixo 1h , $^{B1}T_{total,t_{n+1}}$, e o sistema mola-amortecedor para a ligação B em relação ao eixo 2h , $^{B2}T_{total,t_{n+1}}$, da seguinte forma:

$$^{B1}T_{total,t_{n+1}} = ^{B1}k(^{B1}\theta_{t_{n+1}} - ^{B1}\theta_{t_0} - ^{B1}\theta_{ref}) + ^{B1}c^{B1}\dot{\theta}_{t_{n+1}} + ^{B1}T_a \quad (69)$$

$$^{B2}T_{total,t_{n+1}} = ^{B2}k(^{B2}\theta_{t_{n+1}} - ^{B2}\theta_{t_0} - ^{B2}\theta_{ref}) + ^{B2}c^{B2}\dot{\theta}_{t_{n+1}} + ^{B2}T_a \quad (70)$$

Nestas expressões, $^{B1}\theta_{ref}$ e $^{B2}\theta_{ref}$ representam ângulos que são determinados através dos momentos nas molas, M_{B1} e M_{B2} respetivamente, no instante em que a estrutura inicia o seu movimento e através da rigidez da mola ^{B1}k associada ao eixo 1h , e através da rigidez da mola ^{B2}k associada ao eixo 2h .

$$^{B1}\theta_{ref} = \frac{M_{B1}}{^{B1}k} \quad \wedge \quad ^{B2}\theta_{ref} = \frac{M_{B2}}{^{B2}k} \quad (71)$$

De modo a determinar os ângulos observados no instante $t=0$, $^{B1}\theta_0$ e $^{B2}\theta_0$, os ângulos no instante t_n , $^{B1}\theta_{t_n}$ e $^{B2}\theta_{t_n}$, e os ângulos no instante t_{n+1} , $^{B1}\theta_{t_{n+1}}$ e $^{B2}\theta_{t_{n+1}}$, adotou-se a metodologia que se apresenta de seguida:

1. Definiram-se os versores associados aos eixos de rotação 1h e 2h em coordenadas locais.

$$\begin{cases} {}^1\bar{h}_B = [0 & 1 & 0]^T \\ {}^2\bar{h}_B = [0 & 0 & 1]^T \end{cases} \quad (72)$$

2. Definiram-se os versores associados aos eixos de rotação 1h e 2h em coordenadas globais.

$$\begin{cases} {}^1h_B = {}^1A {}^1\bar{h}_B \\ {}^2h_B = {}^2A {}^2\bar{h}_B \end{cases} \quad (73)$$

3. Determinaram-se os versores em coordenadas locais do eixo longitudinal do corpo 1, ${}^{B1}\bar{u}_{c1,xx}$, e do eixo perpendicular ao eixo longitudinal e ao eixo de rotação 1h_B , ${}^{B1}\bar{u}_{c1,zz}$.

$$\begin{cases} {}^{B1}\bar{u}_{c1,xx} = [1 \ 0 \ 0]^T \\ {}^{B1}\bar{u}_{c1,zz} = [0 \ 0 \ 1]^T \end{cases} \quad (74)$$

4. Determinaram-se os versores em coordenadas globais do eixo longitudinal do corpo 1, ${}^{B1}u_{c1,xx}$, e do eixo perpendicular ao eixo longitudinal e ao eixo de rotação 1h_B , ${}^{B1}u_{c1,zz}$.

$$\begin{cases} {}^{B1}u_{c1,xx} = {}^1A {}^{B1}\bar{u}_{c1,xx} \\ {}^{B1}u_{c1,zz} = {}^1A {}^{B1}\bar{u}_{c1,zz} \end{cases} \quad (75)$$

5. Procedeu-se analogamente à definição dos versores do eixo longitudinal do corpo 2, ${}^{B2}\bar{u}_{c2,xx}$, e do eixo perpendicular ao eixo longitudinal e ao eixo de rotação 2h_B , ${}^{B2}\bar{u}_{c1,yy}$.

$$\begin{cases} {}^{B2}\bar{u}_{c2,xx} = [1 \ 0 \ 0]^T \\ {}^{B2}\bar{u}_{c2,yy} = [0 \ 1 \ 0]^T \end{cases} \quad (76)$$

$$\begin{cases} {}^{B2}u_{c2,xx} = {}^2A {}^{B2}\bar{u}_{c2,xx} \\ {}^{B2}u_{c2,yy} = {}^2A {}^{B2}\bar{u}_{c2,yy} \end{cases} \quad (77)$$

6. Definiram-se as grandezas trigonométricas dos ângulos observados em qualquer instante j , ${}^{B1}\theta_j$ e ${}^{B2}\theta_j$.

$$\cos[{}^{B1}\theta_j] = {}^2h_B \cdot {}^{B1}u_{c1,xx} \quad (78)$$

$$\cos[{}^{B2}\theta_j] = {}^1h_B \cdot {}^{B2}u_{c1,xx} \quad (79)$$

$$\sin[{}^{B1}\theta_j] = {}^2h_B \cdot {}^{B1}u_{c1,zz} \quad (80)$$

$$\sin[{}^{B2}\theta_j] = {}^1h_B \cdot {}^{B2}u_{c1,yy} \quad (81)$$

7. Determinaram-se as variações de ângulo entre dois instantes consecutivos t_n e t_{n+1} , necessárias para proceder à integração no tempo.

$$\Delta {}^{B1}\theta_{t_{n+1}} = \arcsin(\sin({}^{B1}\theta_{t_{n+1}}) \cos({}^{B1}\theta_{t_n}) - \cos({}^{B1}\theta_{t_{n+1}}) \sin({}^{B1}\theta_{t_n})) \quad (82)$$

$$\Delta {}^{B2}\theta_{t_{n+1}} = \arcsin(\sin({}^{B2}\theta_{t_{n+1}}) \cos({}^{B2}\theta_{t_n}) - \cos({}^{B2}\theta_{t_{n+1}}) \sin({}^{B2}\theta_{t_n})) \quad (83)$$

8. Calcularam-se os ângulos para o instante t_{n+1} e as respetivas velocidades, ${}^{B1}\dot{\theta}_{t_{n+1}}$ e ${}^{B2}\dot{\theta}_{t_{n+1}}$, definidas pelas equações (85) e (86) (Haug 1989).

$${}^{B1}\theta_{t_{n+1}}(q_{n+1}) = {}^{B1}\theta_{t_n} + \Delta {}^{B1}\theta_{t_{n+1}}(q_{n+1}) \quad \wedge \quad {}^{B2}\theta_{t_{n+1}}(q_{n+1}) = {}^{B2}\theta_{t_n} + \Delta {}^{B2}\theta_{t_{n+1}}(q_{n+1}) \quad (84)$$

$${}^{B1}\dot{\theta}_{t_{n+1}}(q_{n+1}, \dot{q}_{n+1}) = {}^1h_B \cdot ({}^2\omega - {}^1\omega) \quad (85)$$

$${}^{B2}\dot{\theta}_{t_{n+1}}(q_{n+1}, \dot{q}_{n+1}) = {}^2h_B \cdot ({}^1\omega - {}^2\omega) \quad (86)$$

onde:

$$\begin{cases} {}^1\omega = {}^1G(q_{n+1}) {}^1\dot{\theta}(\dot{q}_{n+1}) \\ {}^2\omega = {}^2G(q_{n+1}) {}^2\dot{\theta}(\dot{q}_{n+1}) \end{cases} \quad (87)$$

$${}^iG = 2^iE = 2 \begin{bmatrix} -{}^i\theta_1 & {}^i\theta_0 & -{}^i\theta_3 & {}^i\theta_2 \\ -{}^i\theta_2 & {}^i\theta_3 & {}^i\theta_0 & -{}^i\theta_1 \\ -{}^i\theta_3 & -{}^i\theta_2 & -{}^i\theta_1 & -{}^i\theta_0 \end{bmatrix} \quad (88)$$

9. Determinaram-se as forças generalizadas do corpo 1 e 2, 1Q_e e 2Q_e , associadas à ligação B.

$${}^1Q_e = \begin{bmatrix} 0 \\ -{}^{B1}T_{total,t_{n+1}} {}^1G^T {}^1h_B - {}^{B2}T_{total,t_{n+1}} {}^1G^T {}^2h_B \end{bmatrix} \quad (89)$$

$${}^2Q_e = \begin{bmatrix} 0 \\ {}^{B1}T_{total,t_{n+1}} {}^2G^T {}^1h_B + {}^{B2}T_{total,t_{n+1}} {}^2G^T {}^2h_B \end{bmatrix} \quad (90)$$

A ligação C, conforme visto anteriormente, apresenta apenas uma rotação em torno do eixo ${}^{23}h$. Atendendo que a metodologia utilizada para formular o sistema mola-amortecedor desta ligação é análoga ao exposto para a ligação B, o procedimento de modelação foi o seguinte:

1. Definiu-se o momento total, ${}^cT_{total,t_{n+1}}$, devido ao sistema mola-amortecedor:

$${}^cT_{total,t_{n+1}} = {}^c k ({}^c\theta_{t_{n+1}} - {}^c\theta_{t_0} - {}^c\theta_{ref}) + {}^c c {}^c\dot{\theta}_{t_{n+1}} + {}^cT_a \quad (91)$$

$${}^c\theta_{ref} = \frac{M_c}{{}^c k} \quad (92)$$

2. Definiu-se o versor associado ao eixo de rotação ${}^{23}h$, o versor ${}^2\bar{h}_c$ do eixo y do corpo 2, em coordenadas locais:

$${}^2\bar{h}_c = [0 \ 1 \ 0]^T \quad (93)$$

3. Definiu-se o versor associado ao eixo de rotação 2h , o versor 2h_c do eixo y do corpo 2, em coordenadas globais:

$${}^2h_c = {}^2A {}^2\bar{h}_c \quad (94)$$

4. Determinaram-se os versores perpendiculares a 2h_c , o eixo longitudinal do corpo 2, ${}^2\bar{u}_{xx}$, o eixo longitudinal do corpo 3, ${}^3\bar{u}_{xx}$, o eixo ${}^2\bar{u}_{zz}$ e o eixo ${}^3\bar{u}_{zz}$ em coordenadas locais:

$$\begin{cases} {}^2\bar{u}_{xx} = [1 & 0 & 0]^T \\ {}^2\bar{u}_{zz} = [0 & 0 & 1]^T \end{cases} \wedge \begin{cases} {}^3\bar{u}_{xx} = [1 & 0 & 0]^T \\ {}^3\bar{u}_{zz} = [0 & 0 & 1]^T \end{cases} \quad (95)$$

5. Determinaram-se os versores perpendiculares a 2h_c , o eixo longitudinal do corpo 2, ${}^2\bar{u}_{xx}$, o eixo longitudinal do corpo 3, ${}^3\bar{u}_{xx}$, o eixo ${}^2\bar{u}_{zz}$ e o eixo ${}^3\bar{u}_{zz}$ em coordenadas globais:

$$\begin{cases} {}^2u_{xx} = {}^2A \cdot {}^2\bar{u}_{xx} \\ {}^2u_{zz} = {}^2A \cdot {}^2\bar{u}_{zz} \end{cases} \wedge \begin{cases} {}^3u_{xx} = {}^3A \cdot {}^3\bar{u}_{xx} \\ {}^3u_{zz} = {}^3A \cdot {}^3\bar{u}_{zz} \end{cases} \quad (96)$$

6. Definiram-se as grandezas trigonométricas do ângulo observado em qualquer instante j , ${}^c\theta_j$.

$$\cos({}^c\theta) = {}^2u_{xx} \cdot {}^3u_{xx} \quad (97)$$

$$\sin({}^c\theta) = {}^2u_{xx} \cdot {}^3u_{zz} \quad (98)$$

7. Determinou-se a variação de ângulo entre dois instantes consecutivos t_n e t_{n+1} , necessária para proceder à integração no tempo.

$$\Delta {}^c\theta_{t_{n+1}} = \arcsin(\sin({}^c\theta_{t_{n+1}}) \cos({}^c\theta_{t_n}) - \cos({}^c\theta_{t_{n+1}}) \sin({}^c\theta_{t_n})) \quad (99)$$

8. Calculou-se o ângulo para o instante t_{n+1} e a respetiva velocidade, ${}^C\dot{\theta}_{t_{n+1}}$, definida de forma análoga ao exposto para a ligação B.

$${}^C\theta_{t_{n+1}}(q_{n+1}) = {}^C\theta_{t_n} + \Delta {}^C\theta_{t_{n+1}}(q_{n+1}) \quad (100)$$

$${}^C\dot{\theta}_{t_{n+1}}(q_{n+1}, \dot{q}_{n+1}) = {}^2h_C \cdot ({}^2\omega - {}^1\omega) \quad (101)$$

3.7 Equação de equilíbrio

A equação de equilíbrio do movimento do modelo foi baseada na expressão que se apresenta em seguida (Shabana 2010, e 2013):

$$M(q)\ddot{q} + C_q^T \lambda = Q_v(t, q, \dot{q}) + Q_e(t, q, \dot{q}) = Q(t, q, \dot{q}) \quad (102)$$

Conforme visto anteriormente, a parcela correspondente às 21 restrições das forças de ligação, $C_q^T \lambda$, é nula e os parâmetros de Euler de cada corpo i estão sujeitos às condições de normalização.

$$C(q, t) = 0 \quad (103)$$

$$\sum_{j=4}^7 {}^i\theta_j^2 = 1 \quad (104)$$

A resolução deste sistema de equilíbrio requer um processo de integração no tempo cuja estratégia adotada será apresentada no próximo capítulo.

4 METODOLOGIA NUMÉRICA DE INTEGRACÃO NO TEMPO

4.1 Introdução

No âmbito da Dinâmica de Estruturas ou Multicorpo, a integração no tempo consiste na resolução das equações de equilíbrio dinâmico de um sistema estrutural, de modo a determinar o deslocamento, velocidade ou aceleração de qualquer ponto do sistema em qualquer instante de tempo, t_i , a partir das condições iniciais da estrutura (Silva, 2014).

A resolução do sistema de equilíbrio ao longo do tempo constitui a base do trabalho apresentado nesta dissertação, uma vez que a adoção de uma boa estratégia de integração no tempo possibilita o estudo de sensibilidade da capacidade de dissipação de energia do gerador, através da introdução e/ou alteração das propriedades fundamentais do mesmo, nomeadamente a forma do flutuador, propriedades geométricas do gerador e propriedades mecânicas do sistema mola-amortecedor das ligações B e C.

O sistema de equilíbrio da estrutura em estudo é bastante complexo, uma vez que contém variáveis algébricas (os multiplicadores de Lagrange) e variáveis diferenciais (as coordenadas associadas ao movimento do sistema multicorpo, os deslocamentos, e/ou as suas derivadas, as velocidades e acelerações). Para além do exposto, o sistema de equilíbrio é altamente não linear. A matriz de massa global depende de forma não linear das coordenadas de deslocamento dos corpos e a resolução do sistema de equilíbrio dinâmico está sujeita a restrições igualmente não lineares.

Outro aspeto que dificulta a resolução deste problema dinâmico é o facto de a ação da onda sobre o flutuador variar ao longo do tempo. Isto acontece porque, conforme apresentado anteriormente, a ação da onda depende de duas condicionantes que variam ao longo do tempo: a posição do flutuador e a cota da superfície livre do mar.

Assim, atendendo ao anteriormente exposto, serve o presente capítulo para desenvolver a estratégia de integração no tempo adotada neste sistema. Esta estratégia consiste num processo iterativo de duas etapas fundamentais: a primeira etapa diz respeito à determinação das equações dependentes do sistema; a segunda etapa requer a resolução do sistema de equilíbrio dinâmico, através da substituição das equações dependentes, determinadas na primeira fase, pela condição de normalização dos parâmetros de Euler.

Foram analisados dois métodos de resolução do sistema de equilíbrio. O primeiro método consiste na resolução do sistema de equações na sua forma canónica, sendo a integração ao

longo do tempo efetuada através da aplicação das fórmulas de Newmark. O segundo método foi desenvolvido em 2007 (e publicado em 2008) por Hussein, Negrut e Shabana, denominando-se por método HHT-I3.

4.2 Estratégia numérica de integração no tempo

4.2.1 Identificação das variáveis dependentes

De acordo com o apresentado anteriormente, o sistema de equilíbrio do movimento é composto por 28 equações de equilíbrio e está sujeito a 21 restrições. Desta forma, o sistema de equilíbrio total contém 49 incógnitas: 28 variáveis diferenciais associadas às coordenadas q e respetivas derivadas, \dot{q} e \ddot{q} ; 21 variáveis algébricas correspondentes aos multiplicadores de Lagrange, λ . Contudo, devido à utilização dos parâmetros de Euler, apenas 24 das 28 equações de equilíbrio existentes são linearmente independentes. Assim, de modo a identificar as 4 equações redundantes do sistema de equilíbrio dinâmico, isto é as 4 equações linearmente dependentes, determinaram-se os valores próprios e os correspondentes vetores próprios da matriz de massa global. Uma vez que esta matriz é dependente das coordenadas de cada corpo em cada instante de tempo, t , este processo requer que sejam conhecidas as coordenadas de movimento no instante t_n e requer, ainda, que seja repetido para o instante seguinte t_{n+1} .

Admitindo que as coordenadas iniciais da estrutura são conhecidas e que esta parte do repouso, isto é, supondo que para o instante $t=0$ cada corpo i do sistema tem coordenadas ${}^i q_0$ e velocidade, ${}^i \dot{q}_0$, nula, a matriz de massa global no instante inicial, M_0 , fica totalmente definida. Deste modo, é possível calcular os valores próprios da matriz M_0 e, através da análise dos vetores próprios, detetam-se as linhas associadas aos valores próprios nulos. Estas linhas correspondem às equações redundantes, pelo que deverão ser substituídas, no sistema de equilíbrio usado para determinar as acelerações no instante seguinte, t_{n+1} , pela condição de normalidade dos parâmetros de Euler. Uma vez resolvido o sistema resultante desta modificação, prossegue-se para o próximo instante.

4.2.2 Resolução do sistema de equilíbrio através da fórmula canónica

A equação do movimento de um corpo rígido no espaço pode ser escrita na forma das equações de Newton-Euler. Estas equações são deduzidas através do equilíbrio do volume elementar que, para um elemento de volume elementar P , é dado na seguinte forma (Haug, 1989):

$$\int_m (\delta r^p)^T \cdot \ddot{r}^p \cdot dm(P) - \int_m (\delta r^p)^T \cdot Q(P) \cdot dm(P) = 0 \quad (105)$$

$$\delta r^p = \delta r - A \cdot \tilde{s}^{p'} \cdot \delta \pi' \quad (106)$$

$$\ddot{r}^p = \ddot{r} + \ddot{A} \cdot s^{p'} = \ddot{r} + A \cdot \tilde{\omega}' \cdot s^{p'} + A \cdot \tilde{\omega}' \cdot \tilde{\omega}' \cdot s^{p'} \quad (107)$$

Para as acelerações, \ddot{r}^p , do elemento P, a massa por unidade de volume, $dm(P)$, e a força externa que atua em P, $Q(P)$, a expressão (105) terá de ser válida para qualquer deslocamento elementar virtual do ponto P, δr^p . Assim, substituindo δr^p e \ddot{r}^p na equação do sistema de equilíbrio, obtém-se a expressão apresentada em (108).

$$\int_m (\delta r^T + \delta \pi'^T \cdot \tilde{s}^{p'} \cdot A^T) \cdot (\ddot{r} + A \cdot \tilde{\omega}' \cdot s^{p'} + A \cdot \tilde{\omega}' \cdot \tilde{\omega}' \cdot s^{p'}) \cdot dm(P) - \int_m (\delta r^T + \delta \pi'^T \cdot \tilde{s}^{p'} \cdot A^T) \cdot Q(P) \cdot dm(P) = 0 \quad (108)$$

Recordando que a expressão dos trabalhos virtuais é válida para qualquer deslocamento virtual, seja este de translação, δr , ou de rotação, $\delta \pi'$, a equação de equilíbrio dinâmico pode ser formulada através da equação (109) para as coordenadas associadas a translações e através da equação (110) para as coordenadas associadas a rotações.

$$m \cdot \ddot{r} - Q = 0 \quad (109)$$

$$J' \cdot \dot{\omega}' + \tilde{\omega}' \cdot J' \cdot \omega' - n' = 0 \quad (110)$$

$$n' = \int_m \tilde{s}^{p'} \cdot Q'(P) \cdot dm(P) \quad (111)$$

Onde J' representa a matriz do momento de inércia e n' representa o momento das forças exteriores aplicadas em relação ao sistema de coordenadas locais.

De modo a garantir que os deslocamentos virtuais são consistentes com as restrições (cujas Jacobeanas são representadas por C_r^T e C_π^T), isto é, assegurando que δr e $\delta \pi'$ não produzem trabalho, a condição que se apresenta de seguida deverá ser cumprida.

$$C_r^T \cdot \delta r + C_\pi^T \cdot \delta \pi' = 0 \quad (112)$$

Sabendo que a equação dos trabalhos virtuais tem de ser válida para os deslocamentos virtuais que verificam a condição (112), sejam estes deslocamentos de translação ou de rotação, existe um vetor de multiplicadores de Lagrange, λ , que equilibra todo sistema.

$$\delta r \cdot (m \cdot \ddot{r} - Q + C_r^T \lambda) + \delta \pi' \cdot (J' \cdot \dot{\omega}' + \tilde{\omega}' \cdot J' \cdot \omega' - n' + C_\pi^T \lambda) = 0 \quad (113)$$

Assim, as equações de movimento do corpo rígido são expressas de acordo com o indicado em (114), para as coordenadas q associadas a translação, e (115), para as coordenadas q associadas aos parâmetros de Euler, estando o sistema de equações sujeito a restrições, $C(q, t)$, nulas.

$$M(q) \ddot{q} + C_q^T \lambda = Q_v(t, q, \dot{q}) + Q_e(t, q, \dot{q}) = Q(t, q, \dot{q}) \quad (114)$$

$$J' \cdot \dot{\omega}' + C_q^T \lambda = n' - \tilde{\omega}' \cdot J' \cdot \omega' \quad (115)$$

$$C(q, t) = 0 \quad (116)$$

Procedendo à transformação dos termos das equações do sistema de equilíbrio dependentes das rotações para termos dependentes dos parâmetros de Euler, obtém-se o sistema de equações (117). Neste sistema, a parcela $4 \cdot G^T \cdot J' \cdot G$ corresponde à matriz de massa, a parcela $\dot{G}^T \cdot J' \cdot \dot{G}$ diz respeito à matriz de rigidez, a parcela $2 \cdot G^T \cdot n'$ está associada aos momentos aplicados nos corpos e C_q^T é a matriz Jacobeanas de restrições.

$$4 \cdot G^T \cdot J' \cdot G \cdot \ddot{q} - 8 \cdot \dot{G}^T \cdot J' \cdot \dot{G} \cdot \dot{q} - 2 \cdot G^T \cdot n' + C_q^T \lambda = 0 \quad (117)$$

Assim, resolvendo este sistema de equações, sujeito a restrições nulas, obtém-se o valor das acelerações no instante t_{n+1} , \ddot{q}_{n+1} , e, aplicando o método de Newmark, determinam-se as coordenadas, q_{n+1} , e as velocidades, \dot{q}_{n+1} . As fórmulas propostas por Newmark, (120) e (121), estabelecem a relação entre as coordenadas de um corpo (e as suas derivadas) em dois instantes

consecutivos, espaçados de um intervalo de tempo Δt . Esta relação é feita através dos parâmetros β e γ (Hussein, Negrut e Shabama, 2008).

$$\gamma = \frac{1}{2} - \alpha \quad \wedge \quad \beta = \frac{(1-\alpha)^2}{4} \quad (118)$$

$$-0.30 \leq \alpha \leq 0 \quad (119)$$

Relembrando que o processo de integração no tempo adotado é um processo iterativo e que para o instante inicial, $t=0$, as coordenadas e respectivas derivadas são conhecidas, os valores destas grandezas para o instante t_n , q_n , \dot{q}_n e \ddot{q}_n , já estão calculadas.

$$q_{n+1} = q_n + \Delta t \dot{q}_n + \frac{\Delta t^2}{2} ((1-\beta)\ddot{q}_n + 2\beta\ddot{q}_{n+1}) \quad (120)$$

$$\dot{q}_{n+1} = \dot{q}_n + \Delta t ((1-\gamma)\ddot{q}_n + \gamma\ddot{q}_{n+1}) \quad (121)$$

4.2.3 Resolução do sistema de equilíbrio através do método HHT-I3

Em alternativa ao método apresentado anteriormente, o sistema de equilíbrio dinâmico pode ser calculado ao longo do tempo a partir dum método implícito, o método HHT-I3. Este método transforma as equações diferenciais do movimento de um sistema multicorpo num sistema de equações algébricas não lineares. As equações algébricas resultantes desta transformação podem ser resolvidas simultaneamente com as equações das restrições, também estas não lineares (Hussein, Negrut e Shabama, 2008).

A base do método HHT-I3 é o método de Newmark, que se encontra apresentado na seção anterior. Assim, a partir de uma expansão da série de Taylor no instante t_n , o método HHT-I3 é formulado através da seguinte expressão:

$$(M\ddot{q})_{n+1} + (1+\alpha)(C_q^T \lambda - Q)_{n+1} - \alpha(C_q^T \lambda - Q)_n = 0 \quad (122)$$

Este método revela ser uma melhoria em relação ao método de Newmark, uma vez que possui a capacidade de eliminar as oscilações que ocorrem frequentemente nos resultados obtidos pelo

método de Newmark. Para além disto, o método HHT-I3 é relativamente estável e convergente (Hussein, Negrut e Shabana, 2008).

Assim, atendendo ao anteriormente exposto e recordando que o método HHT-I3 é um processo de integração no tempo iterativo e que para o instante inicial, $t=0$, as coordenadas e respetivas derivadas são conhecidas, o valor das grandezas q_n , \dot{q}_n e \ddot{q}_n , no instante t_n , já estão calculadas. Assim, o sistema de equilíbrio dinâmico, sujeito a restrições nulas, é apenas dependente das acelerações no instante t_{n+1} , \ddot{q}_{n+1} .

$$(M\ddot{q})_{n+1} + (1 + \alpha)(C_q^T \lambda - Q)_{n+1} - \alpha(C_q^T \lambda - Q)_n = 0 \quad (123)$$

$$C(q_{n+1}, t_{n+1}) = 0 \quad (124)$$

5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO GERADOR

5.1 Introdução

Tendo como objetivo a determinação dos ângulos de rotação associados às molas dissipadoras da energia proveniente da ação marítima, é necessário caracterizar o movimento, em cada instante t_n , de um gerador, cujas propriedades geométricas e mecânicas são conhecidas. Para tal, é necessário proceder à modelação numérica do sistema multicorpo, através das fundamentações teóricas apresentadas anteriormente.

No presente trabalho, a modelação numérica do sistema multicorpo foi efetuada no programa Mathematica (Wolfram Corp., 2010) e o correspondente modelo numérico segue o exposto no Capítulo 3 e no Capítulo 4.

Assim, serve o presente capítulo para descrever os resultados obtidos e analisar as soluções determinadas através da simulação do gerador.

5.2 Resultados da modelação numérica

Admitindo que um gerador com as características que se apresentam na Tabela 4, constituído por peças prismáticas de perfil circular oco (CHS), está localizado no mar, numa zona de profundidade igual a 25 metros, em que as propriedades da onda atuante são as que se encontram na Tabela 6, simulou-se o gerador no modelo desenvolvido no programa Mathematica.

Propriedades dos corpos								
Corpo		L [m]	d_{ext} [m]	Espessura [mm]	d_{int} [m]	Massa/m [kg/m]	Massa total [kg]	Peso Próprio [N]
1	Torre	31	2,134	20,6	2,0928	1073,7	33283,6	326179,0
2	Braço 2	5	0,800	20,6	0,8412	384,72	1923,6	18851,3
3	Braço 3	5	0,800	20,6	0,8412	384,72	1923,6	18851,3
4	Flutuador	5	2,134	20,6	2,0928	1073,7	5368,32	52609,5

Tabela 4 - Propriedades geométricas do sistema estrutural adotado. (Adaptado de (Silva, Jorge (2014) “Desenvolvimento de um Mecanismo de Produção de Energia Elétrica Através das Ondas do Mar”))

Inércia de Rotação dos Corpos Rígidos				
Corpos		i_{xx} [kg.m ²]	i_{yy} [kg.m ²]	i_{zz} [kg.m ²]
1	Torre	724.518	2665820	2665820
2	Braço 2	15.0041	4015	4015
3	Braço 3	15.0041	4015	4015
4	Flutuador	11242.4	116.858	11242.4

Tabela 5 – Momentos de inércia dos corpos rígidos do sistema estrutural adotado. (Adaptado de (Silva, Jorge (2014) “Desenvolvimento de um Mecanismo de Produção de Energia Elétrica Através das Ondas do Mar”))

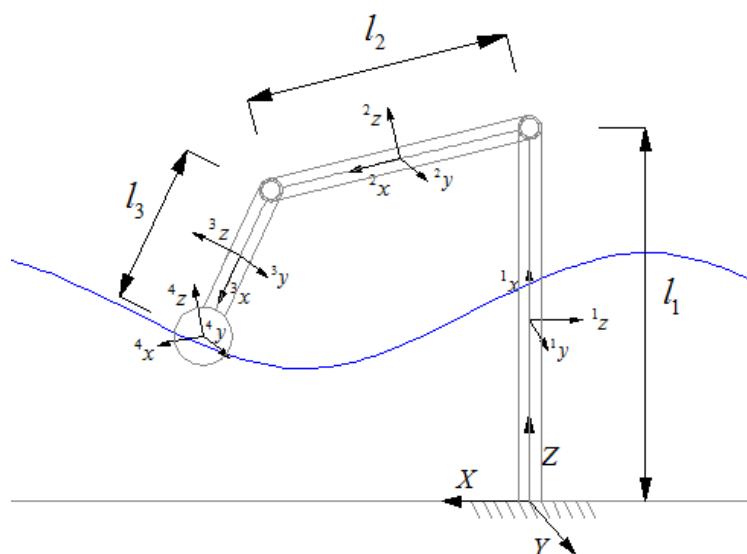


Figura 16 – Perfil do esquema estrutural adotado (Silva, Jorge (2014) “Desenvolvimento de um Mecanismo de Produção de Energia Elétrica Através das Ondas do Mar”).

Propriedades de onda				
Profundidade	Comprimento de onda	Amplitude de onda	Elevação da superfície livre	Período natural
$h = 25m$	$L = 70m$	$H = 3m$	$\zeta = 1.5m$	$T = 9s$

Tabela 6 – Propriedades da onda atuante no sistema estrutural adotado

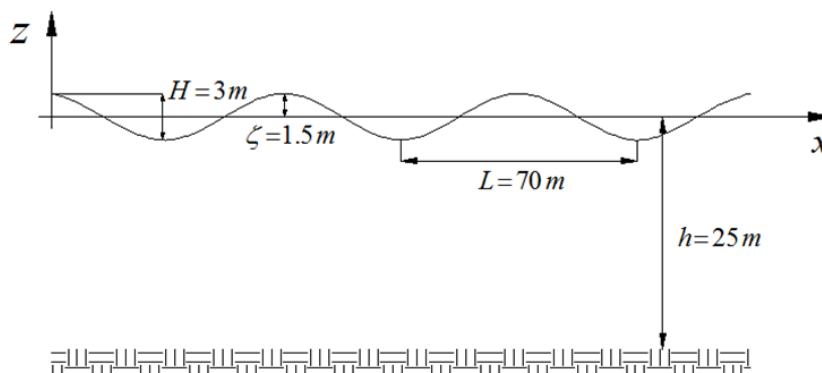


Figura 17 – Perfil da onda atuante no sistema estrutural adotado (Silva, Jorge (2014) “Desenvolvimento de um Mecanismo de Produção de Energia Elétrica Através das Ondas do Mar”).

5.2.1 Resolução do sistema de equilíbrio através da fórmula canónica

Os resultados obtidos pelo método de integração no tempo através da resolução do sistema de equilíbrio na fórmula canónica e, posteriormente, aplicação das fórmulas de Newmark são os que se apresentam de seguida.

Método da Fórmula Canónica			
Velocidades	$B^1_{t_{n+1}}$	$B^2_{t_{n+1}}$	$C_{t_{n+1}}$
Iniciais	0	0	0
Iteração 1	0.368218	0.427402	0.642068
Iteração 2	0.67288	0.968771	1.2295
Iteração 3	0.960285	1.81754	1.52966
Iteração 4	1.21982	2.13529	2.40082
Iteração 5	1.43961	2.83113	2.96784
Iteração 6	1.60595	3.68995	3.49848
Iteração 7	1.70285	2.13529	3.96157
Iteração 8	1.7115	3.68995	-0.331246
Iteração 9	1.60979	1.71764	1.54819
Iteração 10	1.37174	1.92576	1.55949
Iteração 11	0.967061	3.67863	0.652382
Iteração 12	0.360585	3.24312	2.23848
Iteração 13	0.488204	3.22976	2.75634
Iteração 14	1.6257	2.23547	1.11125
Iteração 15	1.43961	2.94538	2.65708
Iteração 16	3.60595	0.64724	4.46532
Iteração 17	3.70285	3.24165	4.63542
Iteração 18	3.49848	3.24165	3.79578
Iteração 19	2.96784	3.24165	3.16431
Iteração 20	2.23848	3.24165	2.64312
Iteração 21	1.2295	3.24165	4.25479
Iteração 22	3.2295	3.24165	4.25479
Iteração 23	3.10467	3.24165	4.25479
Iteração 24	3.10467	3.24165	4.25479
Iteração 25	3.10467	3.24165	4.25479

Tabela 7 - Velocidades dos ângulos de rotação associados às molas B1, B2 e C.

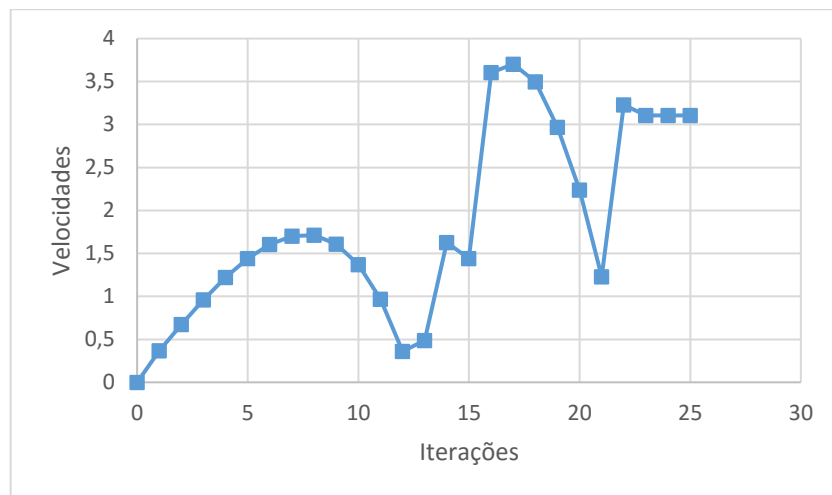


Gráfico 2 - Velocidades do ângulo de rotação associados à mola B1.

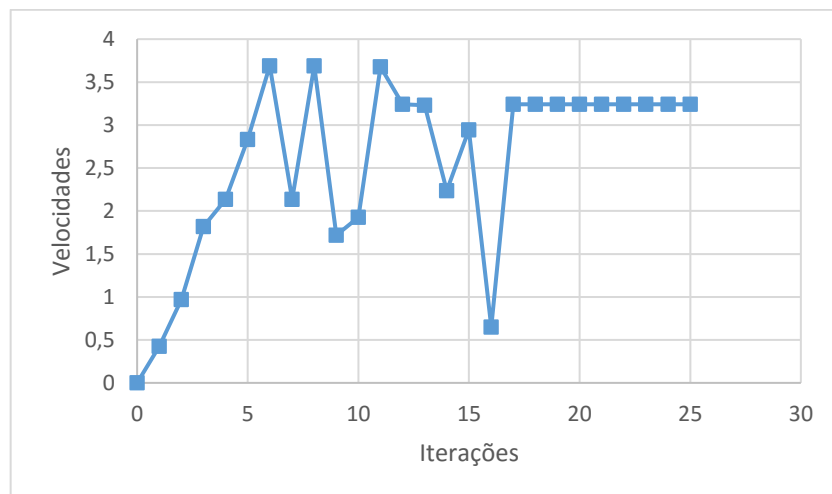


Gráfico 3 - Velocidades do ângulo de rotação associados à mola B2.

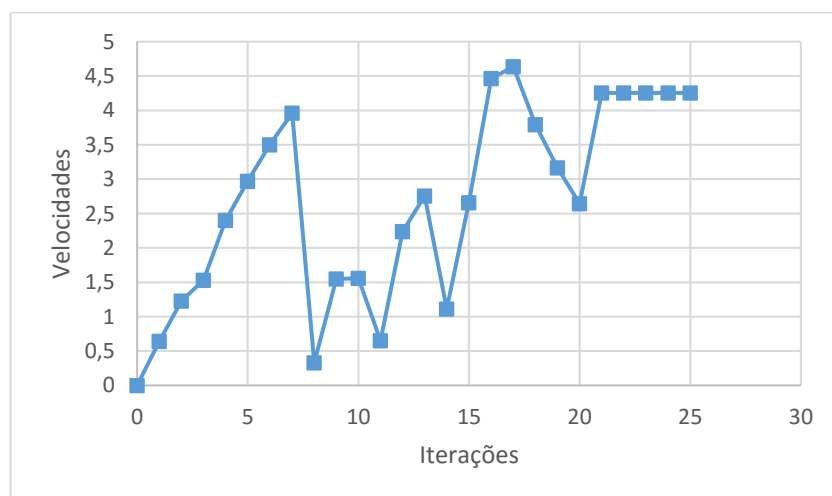


Gráfico 4 - Velocidades do ângulo de rotação associados à mola C.

5.2.2 Resolução do sistema de equilíbrio através do método HHT-I3

Os resultados obtidos pelo método HHT-I3 são os que se apresentam de seguida.

Método HHT-I3			
Velocidades	$B^1\theta_{tn+1}$	$B^2\theta_{tn+1}$	$C\theta_{tn+1}$
Iniciais	0	0	0
Iteração 1	0.414209	0.217718	0.494473
Iteração 2	0.779615	1.11125	0.726791
Iteração 3	1.13578	1.359786	2.05042
Iteração 4	1.47746	1.40581	2.63137
Iteração 5	1.7993	1.49849	3.10804
Iteração 6	2.09573	1.99263	3.42421
Iteração 7	2.36102	2.65708	3.50359
Iteração 8	2.58912	2.57763	3.50221
Iteração 9	2.77371	2.47347	3.50023
Iteração 10	2.90812	2.43092	3.50014
Iteração 11	2.98528	2.40272	3.50014
Iteração 12	2.99768	2.40134	3.50014
Iteração 13	2.93734	2.40123	3.50014
Iteração 14	2.79578	2.40123	3.50014
Iteração 15	2.56393	2.40123	3.50014
Iteração 16	2.39376	2.40123	3.50014
Iteração 17	2.30057	2.40123	3.50014
Iteração 18	2.30056	2.40123	3.50014
Iteração 19	2.30056	2.40123	3.50014
Iteração 20	2.30056	2.40123	3.50014
Iteração 21	2.30056	2.40123	3.50014
Iteração 22	2.30056	2.40123	3.50014
Iteração 23	2.30056	2.40123	3.50014
Iteração 24	2.30056	2.40123	3.50014
Iteração 25	2.30056	2.40123	3.50014

Tabela 8 - Velocidades dos ângulos de rotação associados às molas B1, B2 e C.

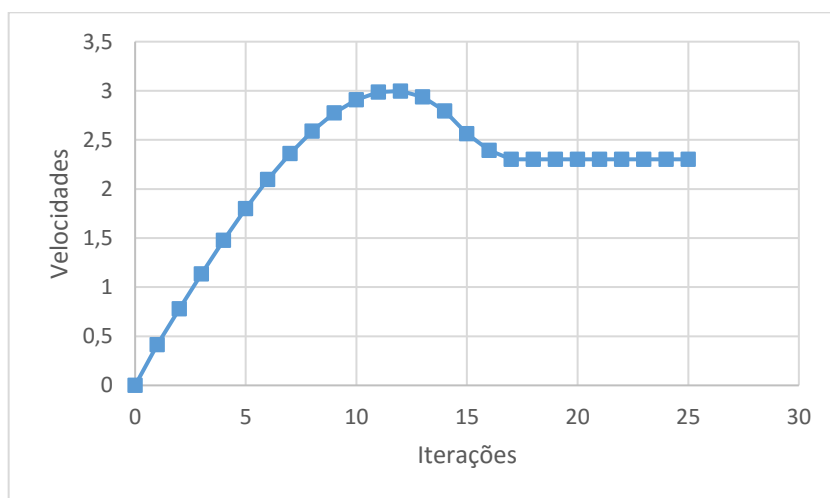


Gráfico 5 - Velocidades do ângulo de rotação associados à mola B1.

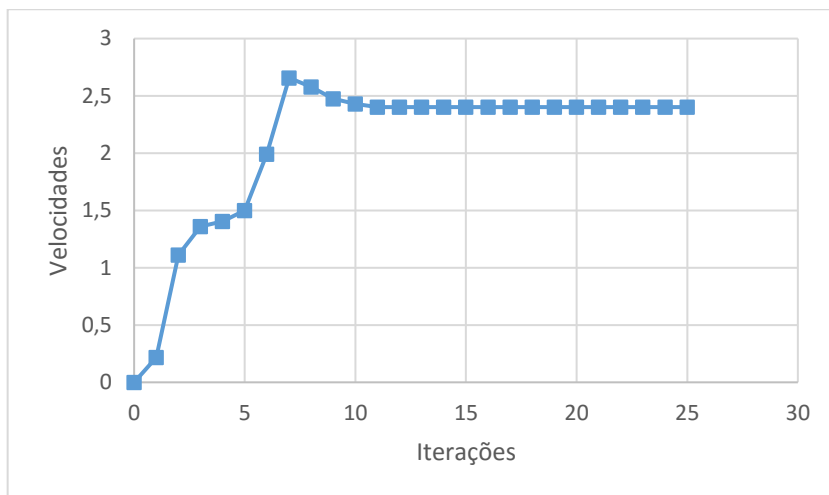


Gráfico 6 - Velocidades do ângulo de rotação associados à mola B2.

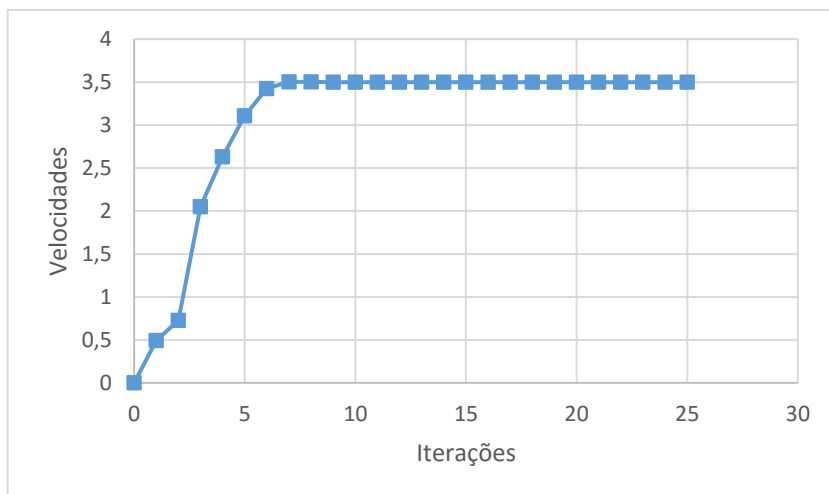


Gráfico 7 - Velocidades do ângulo de rotação associados à mola C.

5.3 Análise dos resultados obtidos

Os resultados obtidos para as velocidades dos ângulos de rotação associados às molas B1, B2 e B3 através do método HHT-I3, são bastante estáveis. No caso dos gráficos referentes às velocidades dos ângulos de rotação associados às molas B1, B2 e B3 obtidos pela resolução do sistema de equilíbrio pela forma canónica, existem oscilações. Este facto justifica-se pela aplicação do método de Newmark que, conforme indicado anteriormente, origina oscilações.

Contudo, as soluções obtidas, quer para o método de resolução do sistema pela forma canónica, quer para o método HHT-I3, convergem para um valor. Assim, fica comprovada a validade do modelo numérico desenvolvido nesta dissertação.

6 CONCLUSÃO

6.1 *Análise do trabalho realizado*

A presente dissertação abordou diversas matérias. Inicialmente, realizou-se um enquadramento contextual, quer a nível mundial quer a nível nacional, das energias renováveis, estudando a sustentabilidade económico-social, analisando alguns mecanismos de extração da energia da ação das ondas marítimas e realçando alguns mecanismos semelhantes ao gerador desenvolvido neste trabalho. De seguida, apresentaram-se várias fundamentações teóricas, baseadas em conceitos da Dinâmica Multicorpo e em conceitos da Engenharia Costeira. Assim, foi possível desenvolver um modelo numérico capaz de resolver um sistema de equilíbrio dinâmico complexo, de elevadas dimensões e altamente não linear, constituído por 28 variáveis diferenciais e 21 variáveis algébricas. A complexidade deste problema foi ultrapassada através da adoção duma estratégia de integração no tempo eficaz, que permitiu a simplificação do sistema de equilíbrio através da substituição das equações redundantes pela condição de normalidade dos parâmetros de Euler. Foi, ainda, possível verificar que tanto o método de resolução da fórmula canónica do sistema de equilíbrio como o método HHT-I3 originam bons resultados para caracterizar o movimento do sistema estrutural multicorpo. Contudo, o método HHT-I3 apresenta valores mais estáveis, como era expectável.

Para além do exposto, o trabalho realizado nesta dissertação permite que sejam desenvolvidos estudos de otimização de um gerador, nomeadamente, o cálculo do potencial máximo de produção de energia e a análise de sensibilidade do gerador.

6.2 *Sugestões para trabalhos futuros*

6.2.1 **Cálculo do Potencial de produção de energia**

Tendo o movimento do sistema multicorpo descrito ao longo do tempo, isto é, conhecendo todos os deslocamentos, velocidades e acelerações do gerador e, ainda, as forças de ligação associadas às restrições, é possível determinar a capacidade teórica de geração de energia elétrica a partir da ação das ondas do mar. A energia gerada será correspondente à energia dissipada nos amortecedores das ligações B1, B2 e C, que é dada pelo amortecimento da mola associada à ligação i (com $i = B1, B2$ e C), $^i c$, e pelas velocidades dos ângulos de rotação associados às molas i , $^i \dot{\theta}$, (Chopra 2001).

$${}^i E_D = \int_0^t {}^i c \cdot {}^i \dot{\theta} d\theta = \int_0^t {}^i c \cdot {}^i \dot{\theta}^2 dt \quad (125)$$

A eficiência energética do gerador é definida em função da sua potência, Π_n . Assim, para cada instante t_n , a potência associada à ligação i (com $i= B1, B2$ e C), ${}^i \Pi_n$, é calculada através da expressão (126).

$${}^i \Pi_n = {}^i c \cdot {}^i \dot{\theta}_n^2, \quad i= B1, B2 \text{ e } C \quad (126)$$

Assim, um dos trabalhos a desenvolver no futuro, passará pela determinação da potência máxima do gerador. A expressão (126) será a potência teórica máxima que é possível extrair, em cada instante t_n do gerador. A potência real será dependente da eficiência dos sistemas eletromecânicos adotados na estrutura, mas esse estudo está fora do âmbito da Engenharia Civil (Silva, 2014).

6.2.2 Análise de sensibilidade do gerador

Com o objetivo de avaliar a variação do comportamento dinâmico de um gerador com as suas propriedades fundamentais, isto é, de modo a caracterizar o movimento da estrutura e, posteriormente, otimizar não só as propriedades geométricas e mecânicas do gerador mas também as propriedades da onda, é necessário proceder à análise de sensibilidade do gerador. Assim, um dos projetos a desenvolver no futuro passa pela extensão do modelo numérico desenvolvido nesta dissertação, que permita incluir fenómenos mais incertos e de maior complexidade (como a fricção nas ligações, a deformabilidade dos elementos estruturais e a interação sólido-fluído).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aloterra@, (2015), <http://www.aloterra.com.br/page/17/>. Aloterra. Disponível: 27 de Junho de 2012. (Consultado 16 de Março de 2015).
- Antunes do Carmo J.S. (2016). “Processos físicos e métodos computacionais em Engenharia Costeira”. Imprensa da Universidade de Coimbra, no prelo.
- Apostol, T. (1967) “Calculus – Vol. 1”, 2nd Ed., NY: John Wiley & Sons.
- APREN@, (2015). <http://apren.pt/gca/?id=47>. Associação Portuguesa de Energias Renováveis. (página de internet oficial) (Consultado: 5 de Março de 2015).
- Bauchau, O. A., Bottasso, C. L., Trainelli, L. (2003) “Robust integraton schemes for flexible multibody systems”, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, v. 192, pp. 395-420.
- Blogunimed@, (2015). <http://www.blogunimed.com.br/regiao-mundoescocia-tera-usina-para-producao-de-energia-no-fundo-do-mar>. Blogunimed (página da internet oficial) (Consultado: 17 de Março de 2015).
- Breeze, Paul., Vieira da Rosa, Aldo., Doble, Mukesh., Gupta, Harsh., Kalogirou, Soteris., Maegaard, Preben., Pistoia, Gianfranco., Roy, Sukanta., Sorensen, Bent., Storvick, Truman., Yang, Shang-Tian e Kruthiventi, Anil Kumar. (2009). “Renewable Energy Focus Handbook” Primeira Edição
- Carnegie@, (2015). <http://www.carnegiewave.com/ceto-technology/what-is-ceto.html>. Wave Energy (Consultado: 17 de Março de 2015).
- Chopra, A. K. (2001) “Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering”, Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.
- CRSES@,(2015).<http://www.crses.sun.ac.za/files/technologies/ocean/WaveEnergyConvertors.pdf>. Centre for renewable and sustainable energy studies. (Consultado: 15 de Março de 2015).
- Cruz, João m.b.p. e Sarmiento, António j.n.a (2004). http://www.apambiente.pt/_zdata/Divulgacao/Publicacoes/Guias%20%20Manuais/ondas_lowres.pdf. “Energias das Ondas: Introdução aos Aspetos Tecnológicos Económicos e Ambientais” (Consultado: 6 de Março de 2015)
- Cunha, Jorge Fernandes e Onofrei, Roxana, (2010) http://www.marcaspatentes.pt/files/collections/pt_PT/1/300/302/Energia%20Oce%20C3%A2nica.pdf. “Marcas e patentes”. (Consultado: 6 de Março de 2015).
- Dean, Robert G. and Dalrymple, Robert A. (1984). Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists, Prentice-Hall, Inc., ISBN 0-13-946038-1.

- DGEG@ (2015a). <http://www.dgeg.pt/>. Direção Geral de Energia e Geologia. (página de internet oficial) (Consultado: 11 de Março de 2015).
- DGEG@ (2015b). <http://www.dgeg.pt/>. Renováveis-estatísticas rápidas. (Consultado: 16 de Março de 2015).
- EIA@ (2015). <http://www.eia.gov/forecasts/ieo/world.cfm>. U.S. Energy Information Administration. (Consultado: 18 de Março de 2015)
- Enerdata@ (2015), <https://yearbook.enerdata.net/> Global Energy Intelligence (Consultado: 18 de Março 2015)
- EC@ (2015), http://ec.europa.eu/research/energy/eu/index_en.cfm?pg=research-ocean European Commission (Consultado: 15 de Março 2015)
- Faltinsen, O. M., (1990). “Sea Loads On Ships and Offshore Structures”. Cambridge University Press.
- Faltinsen, O. M. (2005). “Hydrodynamic of High-Speed Marine Vehicles” Cambridge University Press.
- Fletcher, R. (2004), “Practical methods of optimization”, Chichester, UK: John Wiley & Sons.
- GCC@ (2015), <http://www.greencarcongress.com/2011/09/eia-20110920.html> Green Car Congress (Consultado: 15 de Março de 2015)
- Golub, G. H., Van Loan, C. F. (1996) “Matrix computations”, Baltimore: The John Hopkins University Press.
- Granho, F., (2012). “Aproveitamento da Energia das Ondas Marítimas – Estado da Técnica” Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Especialização de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.
- Haug, E. J. (1989) “Computer aided kinematics and dynamics of mechanical systems”, Boston: Allyn and Bacon.
- Hilber, H. M., Hughes, T. J. R., Taylor, R. L. (1977), “Improved numerical dissipation for time integration algorithms in structural dynamics, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, v. 5, pp. 283-292.
- Hussein, B., Negrut, D., Shabana, A. A. (2008). “Implicit and explicit integration in the solution of the absolute nodal coordinate differential/algebraic equations”. Nonlinear Dynamics, Vol. 54, pp. 283-296.
- IEA@ (2015). <http://www.iea.org/aboutus/faqs/renewableenergy/>. Internacional Energy Agency (pagina de internet oficial) (Consultado: 2 de Março de 2015).
- IMF (2013), Commodity market monthly (report released on June 12th), International Monetary Fund – Research Department, Commodities Team. Available at: www.imf.org/commodities (Consultado: 13 de Março de 2015).
-

- Journée, J.M.J and W.W. Massie. (2001). “Offshore Hidromechanics”. Delft, University of Technology.
- Lista de dispositivos de Aproveitamento de Energia das Ondas Marítimas. (LDAEOM) (2012) <http://inforestudante.uc.pt/nonio/cursos/listagemMateriaisApoio,do?method=listarMaterias>. Material de Apoio da Cadeira de Aproveitamentos Energéticos do ano lectivo 2011/2012 da Área de Especialização em Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente do Mestrado Integrado em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, Coimbra.
- Negrut, D., Rampali, R., Ottarsson, G., Sajdak, A. (2007) “On an implementation of the Hilber-Hughes-Taylor method in the context of index-3 differential-algebraic equations of multibody dynamics, ASME Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, v. 2, pp. 73-85.
- Neves, M., Vilchez, M., Clavero, M., Losada, M. (2012) “Determinação de forças actuantes em quebra-mares verticais e mistos”, Revista da Gestão Costeira Integrada, v.12, pp. 159-174.
- Newmark, N. M. (1952), “Computation of dynamic structural response in the range approaching failure”, Proceedings of the Symposium on Earthquake and Blast Effects on Structures, University of California, Los Angeles, June 1952, pp. 114-129.
- Newmark, N. M. (1959), “A method of computation for structural dynamics”, Journal of the Engineering Mechanics Division – Proceedings of the American Society for Civil Engineering (ASCE), vol. 85, n. EM 3, July, pp. 67-94.
- Nikravesh, P. E. (2008), “Planar Multibody Dynamics – Formulation, Programming and Applications”, Boca Raton, FL: CRC Press.
- Nikravesh, P. E., Ambrósio, J. A. C. (1991) “Systematic construction of equations of motion for rigid-flexible multibody systems containing open and closed kinematic loops”, International Journal for Numerical Methods in Engineering, v. 32, 1749-1766.
- Pelamiswave@ (2015). <http://www.pelamiswave.com/>. “Pelamis Wave” (Consultado: 13 de Março de 2015).
- Quintela, António de Carvalho (2009). “Hidráulica”, 11ª Ed, Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian
- Reneweconomy@, (2015). <http://reneweconomy.com.au/2014/ceto-wave-energy-machine-destroyed-cyclone-reports-say>. Renew Economy (Consultado: 17 de Março de 2015).
- Salgado, A., Conci, A., Clua, E. “Simulação Visual de Ondas Oceânicas em Tempo Real Usando a GPU”, Universidade Federal Fluminense, Niterói, Brasil
- Serván-Camas, B., García-Espinosa, J. (2013), “Accelerated 3D multibody seakeeping simulations using unstructured finite elements”, Journal of Computational Physics, v. 252, pp. 382-403.

- Shabana, A. A. (2010), “Computational Dynamics”, 3rd Ed., Chichester, UK: John Wiley & Sons
- Shabana, A. A. (2013), “Dynamics of Multibody Systems”, 4th Ed., NY: Cambridge University Press
- Silva, J. (2014) “Desenvolvimento de um Mecanismo de Produção de Energia Eléctrica Através das Ondas do Mar” Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Especialização de Mecânica Estrutural, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.
- SPPP@ (2015). <http://www.save-pico-powerplant.org/>. Save Pico Power Plant. (Consultado a: 13 de Março de 2015)
- TREIA@ (2015). <http://www.treia.org/renewable-energy-defined>. Texas Renewable Energy Industries Association. (página de internet oficial) (Consultado: 5 de Março de 2015).
- TribunadoCeara@ (2015). <http://tribunadoceara.uol.com.br/noticias/usina-de-ondas-do-ceara-deve-ficar-100-ate-o-fim-de-2013/>. “Tribuna do Ceara” (Consultado: 15 de Março de 2015).
- Tseng, F.-C., Ma, Z.-D., Hulbert, G. M. (2003) “Efficient numerical solution of constrained multibody dynamics systems”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 192, pp. 439-472.
- Umanovaalternativa@ (2015). <http://umanovaalternativa.com.sapo.pt/pelamis.html>. Uma Nova Alternativa. (Consultado: 15 de Março 2015)
- WaveEC@ (2015). <http://news.wavec.org/>. Centro de energias das ondas. (Consultado: 14 de Março de 2015).
- Wavestar@, (2015). <http://wavestarenergy.com/contact-us>. Wave Star Energy. (página da internet oficial) (Consultado: 17 de Março de 2015).
- Wolfram Corp. (2010), *Mathematica 8*, Il: Champaign.

