



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

Desenvolvimento de um Mecanismo de Produção de Energia Elétrica Através das Ondas do Mar

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

Autor

Jorge Daniel Rodrigues Silva

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 correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, 31 de Julho de 2014

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores Pedro Dias Simão e José Simão Antunes do Carmo, a inteira disponibilidade, apoio e confiança por me terem permitido abraçar este projeto juntamente com eles. Foi graças ao apoio incondicional de ambas as partes que a presente tese se tornou realidade, com grande sucesso. Três gerações distintas mas com a mesma visão de futuro. Um muito obrigado.

Aos meus pais Rosa Silva e Jorge Silva, por sempre terem acreditado em mim, pois foi graças à vossa insistência que permitiu ser a pessoa que sou hoje. Ao meu irmão André Silva pelas mensagens de apoio.

Um agradecimento ao António Branco, João Silva, Tânia Silva e Tiago Manco por todos os momentos passados ao longo deste último ano, desde as temporadas de trabalho intensivo até aos momentos de descontração. Aos demais colegas do Perfil de Mecânica Estrutural pelo apoio.

Ao Eng. Rui Miguel Soares Marques pelo apoio demonstrado e por a sua perspetiva da Engenharia Civil corresponder com a minha.

Aos meus grandes amigos, Anthony Mendes, Fábio Pereira, João Fernandes, João Gonçalves, Renato Tostão e Ruben Salgueiro que me acompanharam ao longo do curso e que fizeram de Coimbra uma cidade inesquecível.

À minha família pelo apoio e preocupação no decorrer da elaboração deste projeto.

Por fim, um agradecimento muito especial, à Mariana Ferreira Santana, pela paciência, pelo carinho, pelas chatices e principalmente pelo grande apoio ao longo destes últimos anos. Um muito obrigado.

RESUMO

Nas últimas décadas tem-se assistido a uma crescente necessidade de energia por parte da humanidade, refletindo-se esse facto no aumento do seu custo, do qual é exemplo o aumento da cotação dos combustíveis fósseis (IMF 2014). Como consequência, este aumento implica por sua vez o aumento da cotação de inúmeras outras matérias-primas, de que são exemplos vários metais, cujo processo de extração envolve o consumo de energia, e alguns cereais, por vezes usados para substituírem os combustíveis fósseis na produção de energia.

Por outro lado, as evidentes alterações climáticas, com os inerentes aumentos de temperatura média do ar e dos oceanos e aumento do nível do mar, tornam necessário a criação de fontes de energia alternativas aos combustíveis fósseis, com uma pegada ecológica tão reduzida quanto possível.

A presente tese tem como objetivo apresentar os fundamentos teóricos e uma modelação computacional para o desenvolvimento de um novo sistema de produção de energia elétrica através do movimento das ondas do mar. Este sistema é composto por um flutuador que oscila à superfície da água, fixo ao topo de uma torre por meio de um braço mecânico. A energia elétrica é extraída a partir dos movimentos de rotação das articulações do braço mecânico, sendo estas articulações modeladas por sistemas mola-amortecedor.

Com efeito, o presente trabalho cinge-se a três capítulos distintos. A primeira fase do projeto consiste numa caracterização teórica das ações hidrodinâmicas, desde o comportamento ondulatório do mar até à interação da onda-estrutura. Na segunda fase, procede-se ao estudo e elaboração de uma metodologia teórica baseada na Dinâmica Multicorpo (Shabana, 2010), implementando métodos de integração no tempo, designadamente o método de Newmark.

Palavras-chave: Energia das ondas, Energias Renováveis, Dinâmica Multicorpo, Estruturas Offshore.

ABSTRACT

During the last decades, a growing need of energy has been observed by humankind, and, as a consequence, the cost of energy has increased, in special the cost of fossil fuels (IMF 2014), which provokes an increase of the quotation of many other raw materials. Furthermore, the evident climate changes, with the consequent increase of the average temperatures of the oceans and of the atmosphere, the increasing frequency of catastrophic weather events, the rising sea levels and other severe consequences, make urgent the development of power resources alternative to fossil fuels, with carbon footprint as low as possible.

The present project proposes to develop a new wave energy converter system (WEC) that uses the vertical movement of the sea waves to move a float, which is connected to an arm supported, at the other end, at a rigid tower. The energy to be extracted is originated by the rotation movement of the arm, whose end connected to the tower moves a mechanical system: the electrical power can be directly generated, by a magnetic device.

Therefore, the present study has two distinct parts. The first part centred on a preliminary characterization of hydrodynamic actions since the oscillatory and wave motion to the interaction of wave-structure. In the second chapter, it is intended to formulate a simple model only, making resource to the traditional multibody dynamics concepts (Shabana 2010), by implementing the step by step method, based on Newmark Method.

Key word: Sea wave energy, renewable energy, multibody dynamics, nonlinear structural analysis, offshore structures

ÍNDICE

SIMBOLOGIA.....	vi
1 INTRODUÇÃO	9
2 O CONTEXTO DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	12
2.1 Introdução.....	12
2.2 Tipos de energia renováveis.....	12
2.2.1 Tipos de energias renováveis exceto a energia oceânica	12
2.2.2 Energias renováveis que têm como fonte o mar	14
2.3 Enquadramento em Portugal.....	16
2.4 Contexto económico e sustentabilidade.....	17
2.5 Tipo de métodos para a extração de energia a partir das ondas.....	18
2.6 Insucessos de alguns mecanismos	20
2.7 Sistemas de geração de energia usando estratégias similares ao proposto	23
3 A AÇÃO DAS ONDAS DO MAR	25
3.1 Introdução.....	25
3.2 Modelação da ação da onda	26
3.3 Fundamentação teórica	27
3.4 Metodologia do cálculo da força de pressão no flutuador.....	29
4 MODELAÇÃO TEÓRICA DO GERADOR	32
4.1 Introdução.....	32
4.2 Caracterização da posição e orientação da estrutura.....	33
4.3 Inércia da estrutura.....	38
4.4 Definição das restrições	39
4.4.1 Ligação A.....	39
4.4.2 Ligação B.....	40
4.4.3 Ligação C.....	41
4.4.4 Ligação D	42

4.5	Matriz Jacobeana das Restrições	42
4.6	Forças Aplicadas no Sistema	43
4.6.1	Forças Centrífugas.....	43
4.6.2	Forças Aplicadas Generalizadas	44
4.6.2.1	Ligação B	47
4.6.2.2	Ligação C.....	50
4.7	Equação de Equilíbrio.....	52
5	INTEGRAÇÃO NO TEMPO E A RESOLUÇÃO DO SISTEMA DE EQUILIBRIO	53
5.1	A estratégia de integração no tempo.....	53
5.2	A determinação das condições iniciais.....	56
5.3	A estratégia numérica de resolução do sistema de equações.....	56
5.4	A determinação do potencial de produção de energia do WEC.....	58
6	EXEMPLO ILUSTRATIVO.....	59
7	CONCLUSÕES.....	64
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

SIMBOLOGIA

iA	Matriz de transformação do corpo i
c_r	Coefficiente de amortecimento
C	Vetor das restrições (A,...,D)
C_q	Matriz Jacobeana das restrições
${}^iF_{l,j}$	Força de Impulsão da superfície j do corpo i
g	Aceleração da gravidade
${}^i\bar{G}$	Matriz de rotação em coordenadas locais do corpo i
iG	Matriz de rotação em coordenadas globais do corpo i
h	Profundidade local
ih	Eixo de rotação referente ao corpo i em coordenadas globais
${}^i\bar{h}_j$	Eixo de rotação referente ao corpo i em coordenadas locais do corpo j
H	Amplitude de onda
${}^i\bar{T}_{\theta\theta}$	Matriz de Inercia à rotação em coordenadas locais do corpo i
k	Rumo da onda
k_x	Rumo da onda na direção x
k_y	Rumo da onda na direção y
k_r	Rigidez da mola
L	Comprimento de onda
im	Massa do corpo i
iM	Matriz de massa do corpo i
n_c	Número de coordenadas

n_b	Número de corpos
n_r	Número de restrições
p	Pressão total, pressão hidrostática mais pressão hidrodinâmica
${}^i q$	Vetor de coordenadas de posição do corpo i
${}^i \dot{q}$	Vetor de coordenadas de velocidades do corpo i
${}^i \ddot{q}$	Vetor de coordenadas de aceleração do corpo i
Q_d	Vetor que contem os termos quadráticos da velocidade
${}^i Q_e$	Vetor das forças generalizadas do corpo i
${}^i Q_v$	Vetor das forças centrífugas do corpo i
${}^i r$	Coordenadas globais de um ponto arbitrário no corpo i
${}^i R$	Coordenadas globais da origem do referencial local ortonormado do corpo i
t	Tempo
T	Período da onda
T_a	Força do atuador
T^{ij}	Momento devido ao sistema mola-amortecedor
u, v e w	Velocidade da onda segundo as coordenadas cartesianas x, y e z respectivamente.
\dot{u}, \dot{v} e \dot{w}	Aceleração da onda segundo as coordenadas cartesianas x, y e z respectivamente.
${}^i \bar{u}$	Vetor coordenadas locais do corpo i de um ponto arbitrário do corpo i
${}^i \hat{v}_j$	Versor da superfície j do corpo i
V	Volume de água deslocado

α	Coeficiente de amortecimento numérico do método HH3
β	Parâmetro de Newmark
γ_w	Peso volúmico da água
Δt	Incremento de tempo
ζ	Elevação da superfície livre da onda
η	Rumo da onda
${}^i\theta$	Ângulo que o sistema de eixos ${}^iX {}^iY {}^iZ$ roda em relação ao eixo iX
${}^i\theta_0, {}^i\theta_1, {}^i\theta_2$ e ${}^i\theta_3$	Parâmetros de Euler do corpo i
${}^{ij}\theta$	Ângulo relativo entre o corpo i e j
${}^{ij}\dot{\theta}$	Velocidade relativa entre o corpo i e j
λ	Vetor dos multiplicadores de Lagrange
ρ	Massa volúmica da água
${}^i\phi$	Ângulo que o sistema de eixos ${}^iX {}^iY {}^iZ$ roda em relação ao eixo Z
φ	Potencial das velocidades
${}^i\psi$	Ângulo que o sistema de eixos ${}^iX {}^iY {}^iZ$ roda em relação ao eixo iZ
ω	Frequência angular
${}^i\Omega_j$	Área da superfície j do corpo i

1 INTRODUÇÃO

A evolução das sociedades, o aumento da qualidade de vida da humanidade e o crescimento populacional a nível mundial a que se tem assistido nos últimos anos, tem implicado necessariamente um aumento do consumo de energia. De acordo com informação cedida pela Energy Information Administration (EIA, 2014) dos Estados Unidos, o consumo de energia deverá crescer 53% entre 2008 e 2035 (GCC, 2014), devido ao forte crescimento económico dos países em desenvolvimento, com destaque para a China e a Índia. Esta procura elevada de energia implicou, um aumento do consumo das energias fósseis, traduzindo-se assim na subida das cotações do petróleo, as quais influenciam derivadamente a subida das cotações de outras matérias-primas, como metais e cereais. Por outro lado, com o aumento do consumo das energias fósseis, as consequências ambientais intensificaram-se, nomeadamente o aumento do nível médio do mar, o aumento do número de ocorrências climáticas catastróficas, como por exemplo a ocorrência de chuvas torrenciais ou períodos extensos de seca em algumas regiões do globo. Desta forma, torna-se necessário a criação de sistemas de aproveitamento energético alternativos aos combustíveis fósseis, com uma pegada ecológica tão reduzida quanto possível.

Hoje em dia, existem inúmeros sistemas alternativos para a geração de energia a partir de recursos renováveis, sustentáveis e não poluentes, o que os torna ecologicamente benéficos, sendo por isso entendidos como fontes de energia renovável. Por estes processos, a obtenção de energia pode ser feita de várias formas: através do vento usando pás giratórias que produzem energia elétrica ou mecânica, através do sol usando painéis fotovoltaicos, através da corrente de água dos rios, ou dos movimentos da água do mar para geração de energia elétrica ou mecânica, entre muitos outros. Com o desenvolvimento tecnológico e científico foram desenvolvidos alguns métodos de geração de energia que permitem, atualmente, a sua produção em grande escala, sendo exemplos a energia eólica, a energia hídrica e a energia fotovoltaica. No entanto, a energia proveniente do mar encontra-se ainda num estado inicial de desenvolvimento.

De entre as desvantagens da utilização de energias renováveis, em especial nas obtidas a partir do vento e do sol, realça-se o facto de não haver um fluxo contínuo destes elementos, e também o facto de ainda não ser possível o armazenamento eficiente de energia elétrica. Por isso, nos períodos em que não há vento, nem sol, a energia elétrica tem que ser proveniente das energias fósseis. Em oposição, o movimento ondulatório das ondas do mar e/ou das marés

é caracterizado por ser um movimento permanente, apesar de o movimento das ondas poder variar com as épocas do ano. Por isso, é de toda a conveniência tirar partido da grande quantidade de energia do mar e desenvolver sistemas de aproveitamento energético a partir do movimento da água do mar, em especial do movimento orbital das partículas de água associadas às ondas.

Portugal, segundo os dados da Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG 2013), apresenta um fluxo de energia de 40 quilowatts por metro de onda e, por isso e na opinião dos intervenientes deste projeto, seria rentável para Portugal o desenvolvimento de um sistema fiável com a capacidade de extrair o máximo da energia possível sem que comprometa a segurança da estrutura.

Desta forma, no presente trabalho pretende estudar-se e dar início ao desenvolvimento de um novo sistema de produção de energia, a partir do movimento ondulatório das ondas do mar. O sistema consiste num flutuador oscilante sobre a superfície da água, fixo ao topo de uma torre por um braço articulado. A energia extraída é originada pelo movimento de rotação das articulações do braço, sendo estas articulações modeladas por sistemas mola-amortecedor-atuador. Prevê-se que o presente sistema seja apropriado para ser colocado em águas com profundidades entre 25 a 35 metros, o que corresponde, em termos médios, a uma localização por volta de 2 a 4 km da costa, por forma a aproveitar a definição da orientação das ondas e o seu empolamento por efeito do fundo.

Há dois tipos de onda marítima com possível aproveitamento energético: as ondas eólicas e as ondas de maré. As ondas de maré são provenientes da interação gravítica entre a Terra, a Lua e o Sol e, na costa portuguesa, têm um período extremamente longo – acima das 12 horas, enquanto as ondas eólicas, provenientes da interação entre o vento e a superfície do mar ao longo de largas extensões da superfície oceânica, têm um período muitíssimo mais curto, da ordem de alguns segundos, sendo por isso as mais relevantes para a movimentação do flutuador. Dessa forma, restringiu-se o estudo da interação água-gerador ao movimento das ondas eólicas.

Com o presente trabalho pretende-se proceder à modelação computacional do sistema de geração de energia, baseados nos conceitos de Dinâmica Multicorpo, por forma a modelar os movimentos do braço articulado em função do movimento das ondas do mar. Por este processo determina-se um maximizante da energia que poderá ser gerada pelo sistema, através do cálculo da energia dissipada pelos amortecedores, e determina-se a configuração do modelo estrutural e as forças de ligação entre as diversas componentes do gerador.

O presente documento é constituído por 7 capítulos. Após o presente capítulo introdutório, no segundo capítulo procede-se à apresentação das várias fontes de energia renováveis em Portugal. Por fim, procede-se a uma análise dos diversos dispositivos existentes associados ao mar, realçando-se os sistemas “Pelamis”, o “Wave Star”, o “Usina de Ondas” e o “Pico

Plant”, realçando-se as semelhanças entre os sistemas “Wave Star” e “Usina de Ondas” e o sistema apresentado no presente trabalho. No terceiro capítulo, procede-se à caracterização das ações do movimento ondulatório da superfície do mar em função do tempo, assim como as correspondentes ações hidrodinâmicas, por forma a modelar as ações do mar sobre o sistema estrutural. No quarto capítulo estabelece-se a formulação teórica baseada nos conceitos da Dinâmica Multicorpo (Shabana 2014), para um modelo tridimensional, tendo-se optado por um modelo tridimensional para que o sistema gerador se possa adaptar às variações de rumo das ondas do mar. No quinto capítulo apresenta-se a estratégia de integração no tempo, realçando-se a necessidade de um método com elevado amortecimento numérico, por forma a dissipar numericamente os erros que vão sendo gerados em cada iteração, provenientes do facto de o sistema de equilíbrio dinâmico ser muito não linear, porque contempla rotações finitas de corpo rígido. No sexto capítulo apresenta-se um exemplo de aplicação, realçando os problemas de instabilidade numérica apresentando o resultado espectável. O sétimo capítulo encerra a presente dissertação, apresentando as conclusões gerais do estudo e as perspetivas de desenvolvimentos futuros.

Por fim, refere-se que se considera que o leitor está suficientemente familiarizado com os conceitos fundamentais da Dinâmica Multicorpo, pelo que apenas serão explicados os detalhes da formulação do sistema estrutural.

2 O CONTEXTO DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS

2.1 Introdução

Existem várias definições para o conceito de energia renovável. Segundo a Internacional Energy Agency (IEA), por energia renovável entende-se o processo de geração de energia usando processos naturais (i.e. sol e vento), em que a fonte é reabastecida a um ritmo mais rápido do que o consumido. São disto exemplos comuns as energias solar, eólica, geotérmica, hídrica e algumas formas de biomassa” (IEA, 2014). A Associação Portuguesa de Energias Renováveis (APREN) refere que, “As energias renováveis são fontes que se renovam constantemente, mesmo depois de serem usadas para gerar energia de um modo sustentável e não poluente. São o exemplo a água da chuva, o vento, a biomassa, o Sol, as ondas e o calor da Terra” (APREN, 2014). Da mesma forma a Texas Renewable Energy Industries Association (TREIA) enuncia que as energias renováveis “são quaisquer fontes de energia que regeneradas naturalmente numa escala de tempo curto e que derivam diretamente do sol, tais como térmica e fotovoltaicas), ou indiretamente do sol (tais como, vento, hidroelétrica e energia da biomassa). As energias renováveis não incluem os recursos energéticos derivados de combustíveis fósseis, resíduos de combustíveis fósseis ou resíduos de fontes inorgânicas” (TREIA, 2014).

Sendo assim, com base nas definições acima transcritas, pode-se concluir que uma energia renovável, como o próprio nome indica, é toda a fonte de energia associada a recursos naturais em que estes são constantemente restabelecidos, em que a energia existente na natureza é transformada numa energia útil ao homem – comumente essa energia será elétrica, térmica ou mecânica.

Pode ainda reforçar-se que uma energia renovável é considerada uma energia limpa, uma vez que, na produção de energia, o processo de transformação não emite para a atmosfera gases que contribuam para o aumento do efeito de estufa.

2.2 Tipos de energia renováveis

2.2.1 Tipos de energias renováveis exceto a energia oceânica

Existe várias fontes de energia renovável, e devido a isso, há uma variedade de formas de obter essa energia. Uma vez que o intuito da presente tese envolve a produção de energia

através da energia oceânica, optou-se por separar os vários tipos de energia em dois quadros (Quadro 2.1 e Quadro 2.2) ou seja, identificação das energias renováveis e identificação da energia oceânica, respetivamente. Sendo assim, apresenta-se de seguida no Quadro 2.1 um resumo das formas mais utilizadas, hoje em dia, com exceção da extração de energia oceânica.

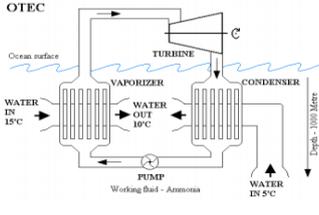
Energias Renováveis	Conversões	Tecnologia de conversão	Observações
Energia Eólica	Energia mecânica	Moinhos	Processo de transformação com recurso do vento par a produção de energia mecânica que é utilizada geralmente para a moagem de grãos ou bombear água.
	Energia elétrica	Aerogeradores	A energia proveniente 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>

Quadro 2.1 - Tabela resumo dos vários tipos de energia renovável exceto da energia oceânica (Realizado com base em: (APREN, 2014), (DGEG, 2014a) e (Breeze et al, 2009))

2.2.2 Energias renováveis que têm como fonte o mar

Conforme explicitado anteriormente, apresenta-se o Quadro 2.1 com as várias formas de extração de energia através do oceano.

Energias Oceânicas	Conversão da energia	Tecnologia de conversão	Ilustração	Observações
Energia das Mares	Energia Elétrica	Turbinas	 <p>Figura 2.1 – Energia das marés. (blogunimed, 2014)</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. (Wavestar, 2014)</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.</p>	Energia extraída da diferença de temperatura entre as águas superficiais e sub-superficiais através de um motor térmico. Através da água quente aquece-se um líquido com ponto de ebulição baixo, em que o vapor gerado aciona uma turbina produzindo energia elétrica.

Quadro 2.2 – Tipo de energia oceânica (Realizado com base. (APREN, 2014), (DGEG, 2014a), (Breeze et al, (2009)) e (Cunha e Onofrei, 2010))

2.3 Enquadramento em Portugal

Portugal tem sido um dos países da Europa que mais tem apostado no aproveitamento energético através das energias renováveis, nos últimos anos. A sua posição geográfica proporciona a Portugal uma das mais-valias para gerar energia através de fontes renováveis, uma vez que o clima e a geografia do país são bastante favoráveis nesse sentido. Portugal dentro do grupo de países pertencentes à Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE), é atualmente o 4º maior produtor de energia de fontes renováveis, com 35% da energia total do país, encontrando-se a Suécia em primeiro lugar, como seria de esperar. (DGEG, 2014b)

Em Portugal, mais de metade da energia produzida através e fontes renováveis é extraída através da energia eólica, estimando-se que cerca de 28% da energia é obtida por energia hídrica. Assim, verifica-se que por volta de 20% da produção de energia de Portugal é obtida por energias renováveis, em que dos 20% cerca de 15% é relativo a energia proveniente da biomassa e biogás e os restantes 5% são obtidos através de outras energias, nomeadamente, a geotérmica, a solar, as ondas e as marés. Sendo assim, é de todo importante começar a investir cada vez mais em energia extraída através das ondas do mar, uma vez que, segundo a Figura 2.4, não obstante Portugal ser um país com maior costa marítima e em que o mar tem maior potência energética, pouca relevância se tem dado a este tipo de energia e à capacidade de energia que poderá extrair, aumentando, assim, significativamente a percentagem de utilização de energias renováveis. Deste modo, é muito importante investir em equipamentos e mecanismos de extração de energia das ondas do mar, tornando-nos pioneiros e tecnologicamente mais avançados que a maioria dos países.

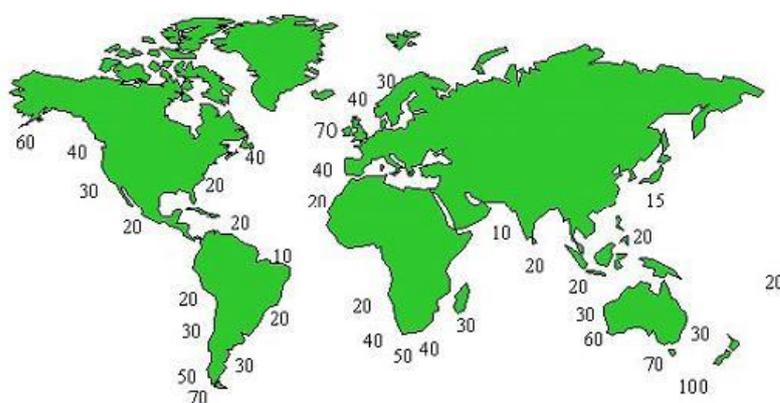


Figura 2.4 – Distribuição do fluxo médio de energia das ondas no mundo em kW/m ou MW/km. (DGEG, 2014a)

Assim, ao analisar-se o mapa-mundo, pode-se constatar que Portugal, mais propriamente a zona norte do país, é fortemente energética, uma vez que Portugal tem um fluxo médio de energia de ondas de 40 kW/m de onda. Sendo assim, torna-se interessante extrair essa energia, visto ser esta ser uma energia limpa, logo traz benefícios humanitários e ambientais, tornando-se sustentável.

2.4 Contexto económico e sustentabilidade

Nas últimas décadas tem-se assistido a uma crescente necessidade de energia por parte da humanidade, refletindo-se esse facto no aumento do custo de energia e, em especial no aumento da cotação dos combustíveis fósseis (IMF 2013) e no conseqüente aumento da cotação de inúmeras outras matérias-primas. Por isso, com a utilização de fontes renováveis para a produção de energia é possível combater a inflação do petróleo na economia mundial e permitir que a humanidade tenha uma boa qualidade de vida, sem que isso se acarreta elevados encargos económicos. Como se sabe, cada vez mais a grande preocupação da humanidade é melhorar a sua qualidade de vida (por exemplo a grande evolução em Angola, ou o crescimento exponencial da população chinesa), desenvolvendo esse que implica maiores necessidades energéticas, e para tal é necessário combatê-las. Torna-se imperioso o recurso a energias renováveis, dado que se torna mais fácil responder a estas necessidades de uma forma sustentável.

Por outro lado, as evidentes alterações climáticas, com os conseqüentes aumentos de temperatura média do ar e dos oceanos, aumento do nível médio do mar, aumento do número de ocorrências climáticas catastróficas (por exemplo, a ocorrência de chuvas torrenciais ou largos períodos de seca em inúmeras regiões do globo), o preocupante degelo das calotes polares e dos glaciares, com a correspondente diminuição das reservas de água doce, tornam premente a criação de fontes de energia alternativas aos combustíveis fósseis, com pegada ecológica tão reduzida quanto possível.

Com a utilização das fontes renováveis para produção de energia, independentemente da forma com é a extraída a energia e como é transformada, hoje em dia, deve-se ter um parâmetro extra na análise de viabilidade do sistema que é hoje em dia conhecido por sustentabilidade. A sustentabilidade consiste em suprimir as necessidades humanas atuais sem que se comprometa as necessidades humanas das gerações futuras. Assim, hoje em dia, qualquer inovação/criação/projeto, deve respeitar o que se traduz na Figura 2.5 havendo assim um equilíbrio entre, o ambiente, o social, e a economia.



Figura 2.5 – Sustentabilidade (Aloterra, 2014)

Assim, qualquer projeto hoje em dia deve verificar o exposto na Figura 2.5, em que ao mesmo tempo um sistema deve ser benéfico para a sociedade (por exemplo, a extração de energia através das ondas permite fornecer eletricidade as pessoas), ser economicamente sustentável (por exemplo, no caso em estudo, a quantidade de energia gasta na produção e manutenção do sistema deve ser inferior à energia que o mecanismo no seu tempo de vida útil consegue fornecer á sociedade) e não ser prejudicial ao ambiente, (por exemplo, um sistema de extração de energia através de uma fonte renovável tem uma pegada ecológica nula). Concluindo assim, que o futuro da humanidade cada vez mais depende da sustentabilidade.

2.5 Tipo de métodos para a extração de energia a partir das ondas

Com a elevada investigação em sistemas de extração de energia através das ondas do mar, tem surgidos inúmeros sistemas para o aproveitamento energético, por isso, apresenta-se de seguida um resumo em forma de quadro (Quadro 2.3) com alguns dispositivos e seu estado atual.

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.carnegiwave.com	Austrália	Offshore	Testar em Oceano
Drakoo	http://www.hann-ocean.com	Singapura	Nearshore & Offshore	Instalado
Floaring 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/lureg/group_research/wave_energy_research/wraspa.php	Reino Unido	Nearshore	Testado em Laboratório
Yeti	http://aviium.com.tr	Turquia	Offshore	Protótipo instalado no Oceano

Quadro 2.3 – Resumo de alguns mecanismos de extração de energia das ondas (Realizado com base: (LDAEOM, 2012) e (CRSES, 2014).

2.6 Insucessos de alguns mecanismos

Portugal, mais propriamente o mar português, tem sido um dos locais mais procurados a nível mundial para a realização de vários testes em sistemas de extração de energia através das ondas do mar. Nos últimos anos foram testados alguns sistemas, nomeadamente o projeto “Pico Plant”, nos Açores (Ilha do Pico) e “Pelamis” na Póvoa do Varzim.

O projeto “Pico Plant” na ilha do Pico encontra-se atualmente inativo. Este projeto iniciou-se em 1992 e a sua construção só terminou em 1999, o qual após esta data teve suspenso devido à falta de financiamento. Só em 2004 o projeto de energias das ondas-WacEC, com apoio de algumas instituições, conseguiu algum financiamento e, em 2006 a WacEC começou a exploração energética durante mais de 2350 horas. Este mecanismo, como referiu-se anteriormente, encontra-se atualmente inativo devido há deterioração do betão pelas forças da

água do mar, enfrentando um risco enorme de colapso. As fundações enfrentam mesmo problema devido às erosões do leito marinho. Neste momento, a WacEC continua a lutar pelo projeto, aguardando financiamento para a recuperação do mesmo. (SPPP, 2014)



Figura 2.6 – Pico Plant, Estado de deterioração do sistema. (WavEC, 2014)

O processo de extração de energia baseia-se na teoria da coluna de água oscilante. Para tal o princípio de funcionamento consiste numa estrutura de betão armado oca que forma uma câmara pneumática no seu interior. Para que haja variação de ar na câmara pneumática, o sistema contém uma abertura submersa que com a oscilação das ondas faz variar a altura de água no interior da camara. Com essa variação de altura, um fluxo de ar em sentidos alternados é gerado e aciona uma turbina de ar que por sua vez esta aciona um gerador elétrico. (SPPP, 2014)



Figura 2.7 - - Modelo da coluna de água oscilante utilizado no projeto “Pico Plant”. (SPPP, 2014)

Para além deste sistema, Portugal foi também pioneiro nos testes do “Pelamis”. Este sistema é constituído por uma estrutura articulada semi-submersa composta por vários módulos cilíndricos que se encontram ligados por ligações flexíveis. O movimento das ondas ao incidir sobre a estrutura provoca a oscilação dos vários cilíndricos em torno das ligações e dessa forma obtém-se a energia através de macacos hidráulicos. (Cruz e Sarmiento, 2004) Este dispositivo incorpora-se nos dispositivos de conservação de energia progressivos, uma vez que estes são sistemas alongados com um comprimento longitudinal da mesma ordem de grandeza do comprimento da onda. Deve ser disposto no sentido de propagação das ondas “de modo a gerarem um efeito de bombeamento progressivo, associado à passagem da onda, por ação de um elemento flexível em contacto com a água. (Cruz e Sarmiento, 2004) Foi criado em 1998 por uma empresa escocesa e o seu primeiro protótipo foi testado em 2004, no Cento Europeu de Energia Marinha (EMEC). Após o sucesso dos ensaios nos tanques, procederam à fabricação de três protótipos à escala real e em 2008 iniciaram os seus testes em Póvoa de varzim mais propriamente em Aguçadoura. (Pelamiswave, 2014)



Figura 2.8 – Pelamis instalado em Aguçadoura, na Póvoa de varzim. (Wikimedia, 2014)

Passado alguns meses de os três equipamentos estarem em testes no mar português, estes foram retirados do mar devido à queda financeira da empresa e por consequência os dispositivos acabaram por ser retirados do mar antes do tempo planeado (Pelamiswave, 2014).

Apesar disso, o Pelamis foram encontrados dois problemas técnicos. O primeiro deve-se ao facto da flutuabilidade do sistema, em que a espuma que permitia a flutuação não era adequada. O segundo deve-se a um problema de ligações em que o desgaste dos rolamentos cilíndricos foi de maior rapidez do que se estava previsto. (Pelamiswave, 2014).

Mais tarde surge o Pelamis P2, caracterizada por uma segunda versão do Pelamis, que foi vendido posteriormente a empresas públicas, em que este sistema já apresenta grandes melhorias face ao Pelamis. (Pelamiswave, 2014).

2.7 Sistemas de geração de energia usando estratégias similares ao proposto

Ao longo dos anos, com o desenvolvimento da investigação na energia extraída através das ondas do mar, têm surgido inúmeros sistemas para a sua extração (

Quadro 2.3 – Resumo de alguns mecanismos de extração de energia das ondas (Realizado com base: (LDAEOM, 2012) e (CRSES, 2014)).). Sendo assim, como o intuito da presente tese é o estudo de um mecanismo para a extração de energia através das ondas do mar, torna-se interessante referir alguns mecanismos com determinadas semelhanças com o mecanismo em estudar, de modo a se verificar o comportamento dos mesmos e a avaliar os sucessos e insucessos de cada um de modo a poder pôr em prática no sistema em estudo, de maneira a que este sistema seja o mais eficiente possível na extração da energia. Posto isto isso, com a



Figura 2.9 - Wave Star, projeto dinamarquês.
(wavestar, 2014)

Figura 2.10 - Usina de Ondas instalada no
Ceará no Brasil. (TribunadoCeara, 2014)

pesquisa realizada sobre este tema, encontrou-se dois sistemas com semelhanças ao sistema proposto, nomeadamente o “Wave Star” e o “Usina de ondas”.

Estes dois mecanismos têm muitas semelhanças entre eles e o sistema a estudar, realçando assim de seguida através de uma lista os aspetos mais relevantes, que de alguma forma, tornam-se uteis para a projeto proposto: (lista realizada com base em: (wavestar, 2014) e (TribunadoCeara, 2014))

Ambos os sistemas são destinados à produção de energia elétrica.

Os sistemas para gerarem energia aproveitam unicamente o movimento vertical da superfície livre do mar, desprezando o efeito elíptico das partículas que se traduz em movimentos na componente horizontal.

O movimento do sistema é um simples arco de circunferência, em que os extremos do movimento ocorrem quando o flutuador se encontra na crista ou na cava da onda.

O movimento do flutuador ao longo do tempo descreve uma função sinusoidal, com amplitudes idênticas às da onda.

O sistema de funcionamento de ambos os sistemas consiste num flutuador na superfície da água, sendo este composto por um material leve e parcialmente submerso em água, que será acoplado a uma estrutura através de um braço rígido e robusto. Essa estrutura de apoio é diferente para os dois sistemas, em que para o “Wave Star” será uma plataforma instalada em offshore ou nearshore, em relação ao “Usina de ondas” este é fixo em estruturas marítimas onshore, nomeadamente, molhos ou cais.

O flutuador ao descrever o movimento das ondas, provoca movimentações no macaco hidráulico, em que este, através da energia mecânica faz gerar uma turbina que converte essa energia em energia elétrica.

As partes móveis do sistema estão fora de água, ou seja, todas as componentes de articulação, nomeadamente, as ligações do sistema que permitem o movimento do sistema. E por isso, permite dar ao sistema uma maior robustez e durabilidade, tendo ainda um índice de sobrevivência ao oceano elevado.

Apesar das inúmeras semelhanças dos vários sistemas é importante que referi que ambos foram concebidos para comportamentos oceânicos distintos, uma vez que o Wave Star é dinamarquês, este foi pensado para resistir a mares fortíssimos devido ao facto de que o Atlântico Norte é extremamente energético. Ao contrário da Usina de ondas que foi construído para agitações marítimas muito baixas e perto da costa, nomeadamente o mar da costa leste do Brasil.

O sistema Wave Star tem a vantagem face ao Usina de ondas em que a plataforma é ajustável, ou seja, com a variação das marés, esta permite ajustar a altura da plataforma mantendo sempre a mesma distância entre a plataforma e o nível médio do mar. Este também permite recolher o flutuador do mar e interromper a produção (quando as condições marítimas são extremas de modo a manter a integridade da máquina). Este processo de recolha e ajuste é feito remotamente. Por outro lado, o Usina de ondas, já se torna mais restrito face ao exposto sobre o Wave star, uma vez que este não é ajustável com a variação das marés mas pode ser recolhido remotamente.

3 A AÇÃO DAS ONDAS DO MAR

3.1 Introdução

No presente capítulo pretende-se, de uma forma simplificada, determinar a ação das ondas do mar num corpo flutuante com amarração. Esta é uma das matérias mais complexas da Hidrodinâmica, sendo presentemente objeto de intensa investigação por várias instituições mundiais. Há diversos estudos relativos corpos flutuantes com movimento pré-definido (por ex. navios) e em estruturas completamente fixas (por ex. estruturas offshore). No caso da presente dissertação o corpo flutuante está parcialmente fixo e a pesquisa realizada neste âmbito não encontrou uma solução completamente satisfatória para a interação fluido-estrutura. Por outro lado, vários autores, tais como, (Faltinsen, 1990; Journeé e Massie, 2001; Antunes do Carmo, 2014) definiram a interação fluido-estrutura através do cálculo da pressão hidrodinâmica da água no flutuador. Esta última abordagem contém várias simplificações, no entanto é muito utilizada por diversos investigadores e gera resultados bastante satisfatórios quando confrontada com a realidade

Em Engenharia Costeira distinguem-se essencialmente três tipos de ondas: ondas geradas pelo vento ou ondas progressivas, ondas de maré e ondas de *tsunami*. As ondas progressivas formam-se em consequência da interação entre o vento e a superfície livre do oceano. Desta interação resulta uma transferência de parte de energia contida no vento para o oceano através das tensões de atrito, gerando correntes e oscilações na superfície. Devido às variações cíclicas entre as forças de pressão e forças gravíticas resulta a propagação da onda, movendo-se da sua zona de geração em direção à costa, porventura situada a milhares de quilómetros. A onda de maré é gerada por ação dos astros, envolvendo fundamentalmente o Sol, a Terra e a Lua. Contrariamente à onda gerada pelo vento, que em águas profundas e até próximo da costa apenas transporta energia, a onda de maré envolve variação e transporte de massa de água. Esta variação ocorre, na costa portuguesa, com um período de oscilação muito elevado, de aproximadamente 12 horas e 20 minutos, isto é, predominam as componentes semidiurnas. Os *tsunamis* resultam, fundamentalmente, de descargas de energia ocorridas na crosta terrestre, no fundo oceânico, energia esta que é, posteriormente, transformada em energia potencial ao longo da coluna de água situada acima da área fonte e convertida na propagação horizontal de perturbação assim gerada na superfície livre do oceano. Estas ondas têm, tipicamente, comprimentos da ordem das centenas de quilómetros e ocorrem muito raramente na costa portuguesa.

Pelas razões apontadas, na continuação do presente capítulo é unicamente apresentada a formulação relativa às ondas de vento ou progressivas. Como estas apresentam tipicamente períodos entre 6 e 15 segundos, com predominância de valores entre os 8 e os 9 segundos, a frequência de ocorrência das ondas geradas pelo vento é muito superior à das marés e incomparavelmente superior à dos *tsunamis* (onde nem sequer é apropriado falar-se em frequência, por se tratar de uma ocorrência isolada); por conseguinte, as ondas progressivas têm um potencial de aproveitamento energético muito superior quando comparado com o das restantes ondas.

3.2 Modelação da ação da onda

A caracterização de um qualquer efeito de uma onda num determinado ponto do oceano é sempre dependente do parâmetro h/L , onde h designa a profundidade do local e L representa o comprimento de onda. Para profundidades em que $h/L \leq 0.10$, o que, em geral, corresponde a valores de $h \leq 10\text{m}$ até à zona de rebentação, o movimento de uma onda é descrito pela teoria da onda em condições de água pouco profunda, de que são exemplos as aproximações de Boussinesq e Serre (Antunes do Carmo, 2014). Para profundidades que verificam a condição $h/L \geq 0.50$, o que geralmente socorre para valores de $h > 30\text{m}$, o movimento de uma onda é razoavelmente descrito pela teoria linear, ou aproximação de Stokes de 1ª ordem. Para valores de h/L superiores a 0.10 e inferiores a 0.50, o que geralmente acontece para profundidades situadas entre os 10 a 15m e os 25 a 30m, o movimento das ondas é razoavelmente descrito pela teoria de Stokes de 2ª ordem.

Para o sistema desenvolvido no presente trabalho, a melhor localização deverá corresponder a profundidades da ordem dos 15 a 25 metros. Pondo de parte um quarto fator, do qual se falará de seguida, a escolha da localização do gerador foi baseada em três fatores:

- i) Interessa colocar o sistema fora da zona de rebentação, uma vez que o movimento das ondas varia bruscamente, pondo em causa a segurança da estrutura; por este facto, interessa salvaguardar um afastamento mínimo entre o gerador e a costa;
- ii) Essa zona corresponde à zona onde o movimento das partículas é elíptico, ou seja, para profundidades de 15 a 25 metros a partícula de água na superfície do mar descreve uma órbita elíptica, para o qual o eixo horizontal é substancialmente maior do que o eixo vertical, ao contrário de que acontece para valores superiores a cerca de 25 a 30 metros em que o movimento da partícula é sensivelmente circular, conforme a Figura 3.1 - Trajetória de uma partícula de água em grandes profundidades ($h > 25$). e Figura 3.2; por isso, o percurso orbital das partículas é superior na direção horizontal e inferior no vertical, o que traz vantagens para a

colocação do sistema, por forma a tirar partido da componente horizontal da velocidade, extraindo maiores quantidades de energia;

- iii) por uma razão de contenção de custos, quanto maior for a profundidade maior será a distância da costa, implicando custos elevados da construção da estrutura e dos meios de transporte da energia gerada pelo sistema para a zona costeira; este facto faz com que interesse minimizar a distância entre o gerador e a costa.

A configuração do fundo é também uma das justificações para a implementação do sistema na gama de profundidades entre os 15 e os 25 metros. A profundidade do oceano diminui com a aproximação à costa influenciado por isso a orientação das ondas, ou seja, devido à ação dos ventos que lhes deram origem, as ondas em alto mar têm orientações muito diversas.

Por “empolamento” entende-se o crescimento da crista da onda (aumento da energia potencial) em consequência da redução da velocidade devido ao atrito no fundo (redução da energia cinética), garantindo assim o princípio de conservação da energia. O fenómeno de refração manifesta-se em consequência da redução da celeridade da onda, quando a mesma se propaga de águas profundas para zonas de menor profundidade, com incidência oblíqua, assumindo, em consequência, uma orientação tendencialmente paralela às curvas batimétricas. Por este quarto fator, interessa então colocar nesta zona de profundidades, por forma a aproveitar desta orientação regular das ondas, o que se traduz numa homogeneização do seu rumo – desta forma, além do empolamento, as ondas têm uma orientação e um rumo regular, permitindo definir melhor as propriedades do gerador.

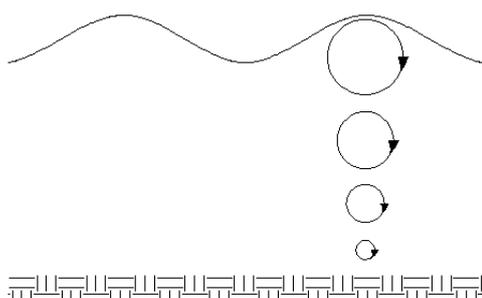


Figura 3.1 - Trajetória de uma partícula de água em grandes profundidades ($h > 25$).

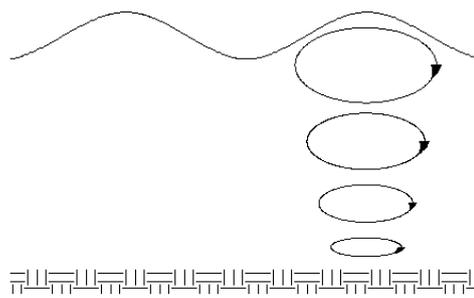


Figura 3.2 - Trajetória de uma partícula de águas intermédias ($10\text{m} < h < 25\text{ m}$).

3.3 Fundamentação teórica

Na Figura 3.3, estão apresentadas as variáveis e o sistema de eixos necessários para caracterizar uma onda marítima, sendo o eixo dos y a direção perpendicular ao plano da figura.

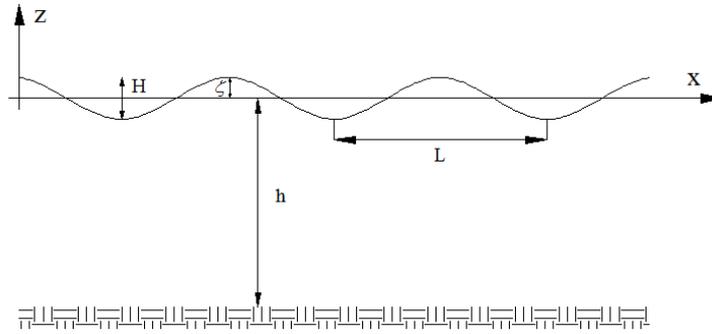


Figura 3.3 - Propriedades da onda progressiva

Por forma a determinar as equações da velocidade, amplitude de onda e pressão pela Teoria de Stokes de 2ª Ordem, primeiro define-se o potencial de velocidades na forma seguinte (Antunes do Carmo, 2014):

$$\begin{aligned} \varphi = \varphi(x, y, z, t) = & \frac{H}{2} \frac{L}{T} \frac{\cosh[k(h+z)]}{\sinh(kh)} \text{sen}(k_x x + k_y y - \omega t) \\ & + \frac{3\pi H^2}{16T} \frac{\cosh[2k(h+z)]}{\sinh^4(kh)} \text{sen}[2(k_x x + k_y y - \omega t)] \end{aligned} \quad (1)$$

Onde $k = 2\pi/L$, $k_x = 2\pi/L_x$ e $k_y = 2\pi/L_y$, em que $L_x = L \cos(\alpha)$ e $L_y = L \sin(\alpha)$, sendo α o rumo da onda, ou seja, o ângulo que a normal à crista da onda faz com o eixo do x.

As componentes da velocidade das partículas de água nas três direções são obtidas derivando a expressão do potencial de velocidades em ordem a x, y e z, respetivamente, obtendo-se as equações seguintes:

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

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

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

Através da segunda derivada do potencial da velocidade em ordem às três coordenadas cartesianas são determinadas as acelerações das partículas de água na forma:

$$\dot{u}_w = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial t}; \quad \dot{v} = \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y \partial t}; \quad \dot{w} = \frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z \partial t} \quad (5)$$

A variação da superfície livre em relação ao plano da superfície livre em repouso é dada por:

$$\zeta = \frac{H}{2} \cos(k_x x + k_y y - \omega t) + \frac{\pi H^2}{8L} \left[\frac{2 + \cosh(2kh)}{\sinh^3(kh)} \right] \cosh(kh) \cos[2(k_x x + k_y y - \omega t)] \quad (6)$$

Por fim, a pressão total, ou seja, a soma da pressão hidrostática e da pressão hidrodinâmica, define-se para qualquer ponto abaixo da superfície livre por:

$$p = \rho g \frac{H}{2} \frac{\cosh[2\pi(h+z)/L]}{\cosh(2\pi h/L)} \cos(k_x x + k_y y - \omega t) - \rho g z + \frac{3}{8} \rho g \frac{\pi H^2}{L} \frac{\tanh(2\pi h/L)}{\sinh^2(2\pi h/L)} \left\{ \frac{\cosh[4\pi(h+z)/L]}{\sinh^2(2\pi h/L)} - \frac{1}{3} \right\} \cos[2(k_x x + k_y y - \omega t)] - \frac{1}{8} \rho g \frac{\pi H^2}{L} \frac{\tanh(2\pi h/L)}{\sinh^2(2\pi h/L)} \{ \cosh[4\pi(h+z)/L] - 1 \} \quad (7)$$

3.4 Metodologia do cálculo da força de pressão no flutuador.

No domínio da hidrostática, o princípio de Arquimedes determina que a força de impulsão de um corpo submerso é igual ao peso do volume de água deslocado pelo corpo, dada pela equação (8). (Quintela, 2009)

$$F_I = \gamma V = \rho g V \quad (8)$$

Onde V é o volume de água deslocado, γ é o peso volúmico da água, ρ é a massa volúmica e g a aceleração da gravidade.

Como o objetivo é caracterizar a força de impulsão de um corpo flutuante numa onda progressiva, para além da força de impulsão hidrostática, tem que se adicionar a componente devido à pressão hidrodinâmica. Desta forma, a força de impulsão expressa na equação (8) passa a ser determinada pela equação seguinte:

$$F_I = \int_{\Omega} p \, d\Omega \quad (9)$$

Em que p é a pressão determinada pela equação (7) e Ω é a superfície de contacto entre o corpo e a água.

Por forma a simplificar o cálculo da força de impulsão, e uma vez que esta força tem que ser determinada várias vezes em cada incremento de tempo, no processo de integração no tempo referido à frente optou-se por discretizar a superfície de contacto entre o fluido e o flutuador em vários elementos, conforme apresentado na Figura 3.4 . Desta forma, a pressão será dada pelo produto da área do elemento de discretização pela pressão p , assumida como constante ao longo do elemento e calculada em função das coordenadas do ponto médio desse mesmo elemento da superfície do corpo.

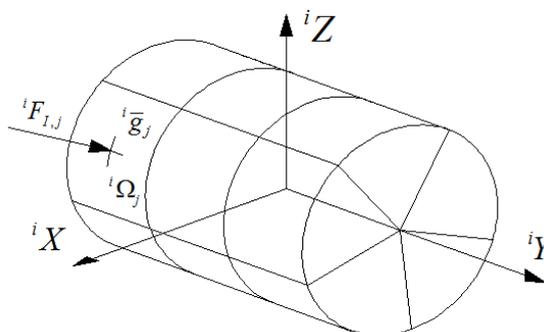


Figura 3.4 - Discretização do flutuador para o cálculo da força de impulsão num elemento i .

Como se trata de uma força de pressão, esta é sempre perpendicular à superfície de contato. Para tal, definiu-se um vetor para cada elemento perpendicular à respetiva superfície. Ao multiplicar a força de impulsão pelo vetor define-se a força de cada elemento nas componentes ix , iy e iz , conforme a equação seguinte:

$${}^i F_{l,j} = {}^i \hat{v}_j {}^i p_j {}^i \Omega_j \Leftrightarrow \left\{ \begin{matrix} {}^i F_{lx,j} \\ {}^i F_{ly,j} \\ {}^i F_{lz,j} \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} {}^i \hat{v}_{x,j} \\ {}^i \hat{v}_{y,j} \\ {}^i \hat{v}_{z,j} \end{matrix} \right\} {}^i p_j {}^i \Omega_j \quad (10)$$

A força de pressão, em coordenadas locais do corpo i , ${}^i x$, ${}^i y$ e ${}^i z$, é igual ao somatório das forças dos vários elementos, ou seja:

$${}^i F_x = \sum_{j=1}^n {}^i F_{lx,j},$$

$${}^i F_y = \sum_{j=1}^n {}^i F_{ly,j} \quad (11, a-c)$$

$${}^i F_z = \sum_{j=1}^n {}^i F_{lz,j}$$

4 MODELAÇÃO TEÓRICA DO GERADOR

4.1 Introdução

Atualmente, a grande maioria dos objetos utilizados na vida quotidiana do Homem são concretizados por meios tecnológicos de ponta, nomeadamente, por robots. Estas “estruturas” têm um comportamento diferente do comportamento da grande maioria das estruturas de Engenharia Civil, tendo em conta o seu comportamento essencialmente estático. Em contraposição, as estruturas de engenharia Mecânica, das quais os robots são um exemplo, são estruturas dinâmicas que apresentam grandes translações e rotações. Como os robots foram criados para efetuar trabalhos minuciosos e rigorosos, foram desenvolvidas metodologias que permitem caracterizar o movimento geral dos corpos, estabelecendo para tal o respetivo equilíbrio dinâmico. A Engenharia Mecânica foi pioneira nos estudos do comportamento deste tipo de estruturas. A metodologia mais conhecida para o estudo do comportamento dinâmico das estruturas é a Dinâmica Multicorpo (Shabana 2013).

A dinâmica multicorpo analisa o equilíbrio dinâmico de um corpo sólido para grandes translações e rotações, e divide-se em dois grandes capítulos: a análise do movimento de corpo rígido e a análise do movimento do corpo deformável, sendo esta análise formulada no plano ou no espaço. Na modelação apresentada de seguida, apenas se utiliza a análise do movimento do corpo rígido no espaço tridimensional, por forma a preparar o modelo para a inevitável variação do rumo das ondas. Optou-se, nesta fase, pela análise de corpo rígido, sendo, portanto, a estrutura modelada como um conjunto de corpos rígidos ligados entre si por ligações. Esta opção deve-se ao facto de, no presente trabalho, se assumir, por hipótese, que a estrutura é suficientemente resistente a todas as ações aplicadas. Como se pretende avaliar o desempenho energético do gerador em condições normais de funcionamento e dado que, para essas condições as tensões instaladas têm que ser bastante baixas, em virtude da necessidade de resistir a inevitáveis fenómenos de fadiga, por exemplo, as deformações são de ordem de grandeza muito baixa e é, portanto, legítimo caracterizar o comportamento do modelo estrutural em função apenas dos movimentos de corpo rígido dos seus elementos (Nikravesh 2008).

No “flowchart” apresentado de seguida pretende-se, de uma forma resumida, expor a sequência pelo qual devem-se obter as equações de equilíbrio do sistema. Cada tópico do “flowchart” corresponderá a um subcapítulo deste capítulo com a explicação detalhada de cada parâmetro.

1. Caracterização do gerador
2. Matriz de massa global, M
3. Vetor das restrições, C
4. Matriz Jacobiana das restrições, C_q
5. Vetor das forças centrífugas, Q_v
6. Vetor das forças aplicadas, Q_e
 - Peso próprio
 - Pressão hidrodinâmica
 - Forças do sistema mola-amortecedor
7. Vetor Q_d (para determinação das coordenadas iniciais do sistema)
8. Sistema de equilíbrio, ${}^i M {}^i \ddot{q} + C_q^T \lambda = {}^i Q_e + {}^i Q_v$

4.2 Caracterização da posição e orientação da estrutura

O gerador de energia é modelado de acordo com a configuração apresentada na Figura 4.1, sendo constituído por quatro corpos rígidos, assumidos por hipótese como prismáticos de seção circular oca, ligados por várias ligações nos pontos A, B, C e D. O primeiro corpo é uma torre que representa a estrutura de suporte do sistema, estando-lhe associada um sistema de eixos local $x_1 y_1 z_1$. Os segundo e terceiro corpos constituem o sistema articulado que compõem o braço do gerador e que ligam a torre de suporte ao flutuador, definido pelo corpo 4 e cuja função é captar as forças de pressão da água, transmitindo assim essa energia para o resto do sistema. Estes quatro corpos rígidos estão ligados entre si por vários tipos de ligações. A ligação A é uma ligação rígida entre a torre e o fundo do mar (também designado por “bedrock”, usando a expressão inglesa), sendo usualmente denominado por “encastramento”. Esta ligação impede todas as translações e todas as rotações relativas entre o bedrock e o ponto A do corpo 1 associado à ligação. A ligação B, entre a torre e o corpo 2, é uma ligação universal, impedindo todas as translações relativas e as rotações relativas entre

apenas um par de eixos perpendiculares, um pertencente ao corpo 1 e o outro ao corpo 2, que se intersectam no ponto B. A ligação C é uma ligação revolutiva, que impede, para o ponto C do corpo 2 em relação ao corpo 3, todas as transações relativas e permite apenas uma rotação relativa ente estes dois corpos segundo um eixo localmente fixo. Finalmente, a ligação D é uma ligação rígida, que impede qualquer translação e qualquer rotação relativas entre o ponto D do corpo 3 e o ponto D do corpo 4.

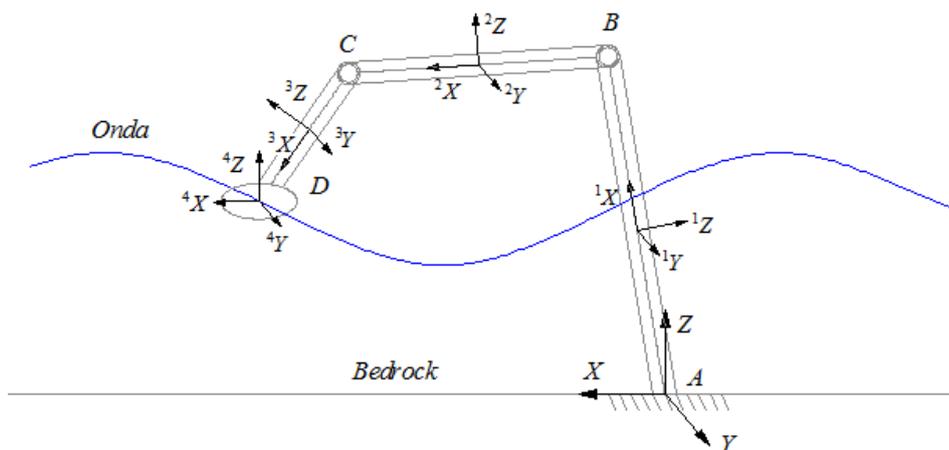


Figura 4.1 - Esquema estrutural

Em geral, o movimento de um corpo rígido é definido através de seis coordenadas independentes: três coordenadas definem a translação do ponto de referência do corpo e outras três definem a sua orientação. O número de coordenadas independentes do sistema é, portanto, dado pela equação seguinte:

$$n_c = n_b \times 6 \quad (12)$$

Em que n corresponde ao número de coordenadas independentes do sistema e n_b corresponde ao número total de corpos rígidos do sistema (Shabana 2013). Na metodologia geral da Dinâmica Multicorpo recorre-se a dois tipos de sistemas de coordenadas cartesianas e ortonormadas: um sistema local, associado a cada corpo e no qual qualquer ponto desse corpo rígido tem coordenadas constantes, e um sistema global. Como adiante se justificará, optou-se por fazer coincidir a origem do sistema local de cada corpo com o respetivo centro de gravidade e determinou-se que o eixo local x coincide com o eixo longitudinal do corpo. Desta forma, os vários sistemas de eixos têm a configuração apresentada na Figura 3.1. As coordenadas de um qualquer ponto iP no respetivo sistema local podem ser relacionadas com as suas coordenadas no sistema global pela fórmula:

$${}^i r = {}^i R + {}^i A \cdot {}^i \bar{u} \quad (13)$$

Onde iR é o vetor posição, em coordenadas globais, da origem do referencial local ${}^iX {}^iY {}^iZ$ no referencial global XYZ , a matriz iA é uma matriz de transformação das coordenadas locais em coordenadas globais, e ${}^i\bar{u}$ é o vetor das coordenadas locais do ponto iP .

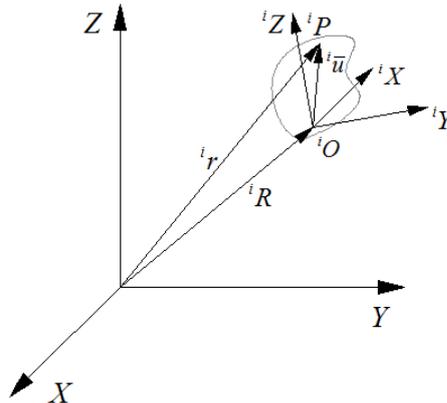


Figura 4.2 - Sistema de coordenadas (adaptado (Shabana, 2010))

A posição do ponto iP é, portanto, definida pelas coordenadas da origem do referencial local e também pela matriz iA do corpo rígido, que depende das coordenadas de orientação desse corpo em relação ao sistema de eixos global. Existem várias metodologias para definir esta matriz, estando na Figura 3.3 ilustrada a metodologia associada aos ângulos de Euler, ${}^i\phi$, ${}^i\theta$ e ${}^i\psi$, sendo definidos da seguinte forma, e por esta ordem:

- i) ${}^i\phi$ É o ângulo que o sistema de eixos ${}^iX {}^iY {}^iZ$ roda em relação ao eixo Z ;
- ii) ${}^i\theta$ É o ângulo que o sistema de eixos ${}^iX {}^iY {}^iZ$ roda em relação ao eixo iX ;
- iii) ${}^i\psi$ É o ângulo que o sistema de eixos ${}^iX {}^iY {}^iZ$ roda em relação ao eixo iZ .

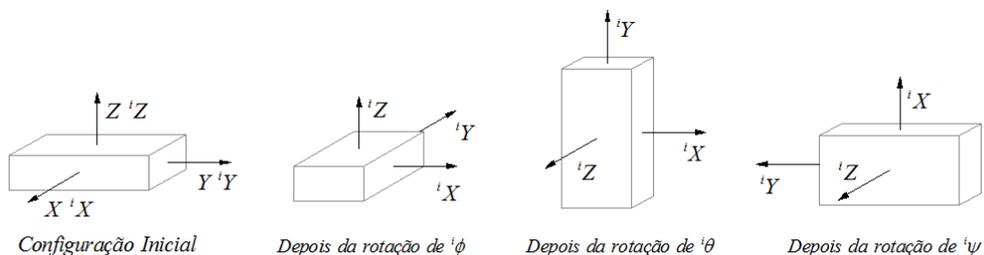


Figura 4.3 - Definição dos ângulos de Euler (adaptado (Shabana, 2010))

Sabendo-se que as rotações no espaço tridimensional não são comutativas, interessa referir que estes ângulos dependem da sua ordem de rotação. A ordem ilustrada na Figura 3.3 é a mais usada na Engenharia, associada à sequência $Z-X-Z$, sendo portanto a adotada no presente trabalho. No entanto, importa referir que existem sequências alternativas que também são

utilizadas em algumas aplicações de engenharia. Entre outras alternativas, a orientação do corpo pode também ser definida através dos Parâmetros de Euler, relacionados com os Ângulos de Euler pelas expressões seguintes:

iv) Passagem dos parâmetros de Euler para os Ângulos de Euler:

$$\left. \begin{aligned} {}^i\theta_0 &= \cos \frac{{}^i\theta}{2} \cos \frac{{}^i\psi + {}^i\phi}{2} & {}^i\theta_1 &= \sin \frac{{}^i\theta}{2} \cos \frac{{}^i\phi - {}^i\psi}{2} \\ {}^i\theta_2 &= \sin \frac{{}^i\theta}{2} \sin \frac{{}^i\phi - {}^i\psi}{2} & {}^i\theta_3 &= \cos \frac{{}^i\theta}{2} \sin \frac{{}^i\phi + {}^i\psi}{2} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

v) Passagem dos Ângulos de Euler para os Parâmetros de Euler:

$$\left. \begin{aligned} {}^i\theta &= \cos^{-1} \left[2 \left[({}^i\theta_0)^2 + ({}^i\theta_3)^2 \right] - 1 \right] & {}^i\phi &= \cos^{-1} \left[\frac{-2({}^i\theta_2 {}^i\theta_3 - {}^i\theta_0 {}^i\theta_1)}{\sin {}^i\theta} \right] \\ {}^i\psi &= \cos^{-1} \left[\frac{2({}^i\theta_2 {}^i\theta_3 + {}^i\theta_0 {}^i\theta_1)}{\sin {}^i\theta} \right] \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Os Parâmetros de Euler, em relação aos Ângulos de Euler, têm como desvantagens o facto de a orientação do corpo não poder ser diretamente definida a partir destes valores e, não obstante os parâmetros serem quatro, apenas três são linearmente independentes, daí ser necessário introduzir uma condição de normalidade entre estes parâmetros para cada corpo – norma do vetor dos Parâmetros de Euler igual a 1. A vantagem dos Parâmetros de Euler consiste no facto de esta metodologia não apresentar singularidades na definição da matriz iA para qualquer rotação que o corpo possa sofrer, em oposição aos Ângulos de Euler – observando-se a expressão 14, regista-se que quando ${}^i\theta$ é igual a $n\pi$, torna-se impossível definir os ângulos ${}^i\phi$ e ${}^i\psi$. Desta forma, vários autores aconselham a utilização dos Parâmetros de Euler para definir as coordenadas de orientação de um corpo rígido (Shabana, 2013, Haug, 1989).

Desta forma, a matriz de transformação do corpo rígido $i - {}^iA$ - é definida a partir dos quatro parâmetros de Euler através da expressão seguinte:

$${}^iA = \begin{bmatrix} 2 \left[({}^i\theta_0)^2 + ({}^i\theta_1)^2 \right] - 1 & 2({}^i\theta_1 {}^i\theta_2 - {}^i\theta_0 {}^i\theta_3) & 2({}^i\theta_1 {}^i\theta_3 + {}^i\theta_0 {}^i\theta_2) \\ 2({}^i\theta_1 {}^i\theta_2 + {}^i\theta_0 {}^i\theta_3) & 2 \left[({}^i\theta_0)^2 + ({}^i\theta_2)^2 \right] - 1 & 2({}^i\theta_2 {}^i\theta_3 - {}^i\theta_0 {}^i\theta_1) \\ 2({}^i\theta_1 {}^i\theta_3 - {}^i\theta_0 {}^i\theta_2) & 2({}^i\theta_2 {}^i\theta_3 + {}^i\theta_0 {}^i\theta_1) & 2 \left[({}^i\theta_0)^2 + ({}^i\theta_3)^2 \right] - 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

No entanto, é preciso assegurar que, para qualquer corpo i , os correspondentes Parâmetros de Euler satisfazem a seguinte condição:

$$\sum_{k=0}^3 ({}^i\theta_k)^2 = {}^i\theta^T {}^i\theta = 1 \quad (17)$$

Em conclusão, a adoção dos Ângulos de Euler leva a que a caracterização da posição de um corpo rígido no espaço seja feita por seis quantidades independentes, agrupadas no vetor seguinte:

$${}^i\mathbf{q} = [{}^iR_x \quad {}^iR_y \quad {}^iR_z \quad {}^i\phi \quad {}^i\theta \quad {}^i\psi]^T \quad (18)$$

Sendo possível dividir este vetor nas suas componentes translacionais e rotacionais na forma:

$${}^i\mathbf{r} = [{}^iR_x \quad {}^iR_y \quad {}^iR_z]^T \quad (19)$$

$${}^i\boldsymbol{\theta} = [{}^i\phi \quad {}^i\theta \quad {}^i\psi]^T \quad (20)$$

A utilização dos Parâmetros de Euler necessita de sete parâmetros, na forma:

$${}^i\mathbf{q} = [{}^iR_x \quad {}^iR_y \quad {}^iR_z \quad {}^i\theta_0 \quad {}^i\theta_1 \quad {}^i\theta_2 \quad {}^i\theta_3]^T \quad (21)$$

Sendo que, apenas três dos quatro últimos termos deste vetor são linearmente independentes. Analogicamente ao caso anterior é possível dividir este vetor nas suas componentes translacionais e rotacionais na forma seguinte:

$${}^i\mathbf{r} = [{}^iR_x \quad {}^iR_y \quad {}^iR_z]^T \quad (22)$$

$${}^i\boldsymbol{\theta} = [{}^i\theta_0 \quad {}^i\theta_1 \quad {}^i\theta_2 \quad {}^i\theta_3]^T \quad (23)$$

Como no presente trabalho se adotou a formulação do problema usando os Parâmetros de Euler, o vetor das coordenadas dos corpos terá 28 variáveis.

Nas formulações apresentadas nos capítulos seguintes as matrizes, E e \bar{E} são duas matrizes pelas quais muitos dos parâmetros dependem destas, em que ambas dependem dos Parâmetros de Euler. A matriz E define-se para coordenadas globais e a \bar{E} para coordenadas locais da seguinte forma:

$${}^i E = \begin{bmatrix} -{}^i\theta_1 & {}^i\theta_0 & -{}^i\theta_3 & {}^i\theta_2 \\ -{}^i\theta_2 & {}^i\theta_3 & {}^i\theta_0 & -{}^i\theta_1 \\ -{}^i\theta_3 & -{}^i\theta_2 & {}^i\theta_1 & {}^i\theta_0 \end{bmatrix}, {}^i \bar{E} = \begin{bmatrix} -{}^i\theta_1 & {}^i\theta_0 & {}^i\theta_3 & -{}^i\theta_2 \\ -{}^i\theta_2 & -{}^i\theta_3 & {}^i\theta_0 & {}^i\theta_1 \\ -{}^i\theta_3 & {}^i\theta_2 & -{}^i\theta_1 & {}^i\theta_0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

A Matriz de transformação ${}^i A$ expressa na equação (16), de forma simplificada, pode-se reescrever da seguinte forma:

$${}^i A = {}^i E {}^i \bar{E}^T \quad (25)$$

4.3 Inércia da estrutura

Para definir a equação de equilíbrio dinâmico de um corpo rígido no espaço tridimensional é necessário conhecer as suas propriedades mecânicas, nomeadamente a sua massa e a sua inércia em relação aos três eixos locais ${}^i X$, ${}^i Y$ e ${}^i Z$, que dependem da geometria do corpo e da forma como a massa está distribuída ao longo dessa geometria. A partir dessas propriedades, a matriz de massa do corpo é definida através da equação seguinte, para um sistema de eixos locais cuja origem passe pelo centro de gravidade:

$${}^i M = \begin{bmatrix} {}^i m_{RR} & 0 \\ 0 & {}^i m_{\theta\theta} \end{bmatrix} \quad (26)$$

Onde:

$${}^i m_{RR} = \begin{bmatrix} {}^i m & 0 & 0 \\ 0 & {}^i m & 0 \\ 0 & 0 & {}^i m \end{bmatrix} \quad (27)$$

$${}^i m_{\theta\theta} = {}^i \bar{G}^T \cdot {}^i \bar{I}_{\theta\theta} \cdot {}^i \bar{G} \quad (28)$$

Em que,

$${}^i \bar{G} = 2 {}^i \bar{E} \quad (29)$$

$${}^i \bar{I}_{\theta\theta} = \begin{bmatrix} {}^i i_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & {}^i i_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & {}^i i_{zz} \end{bmatrix} \quad (30)$$

Onde ${}^i m$ é a massa total do corpo e ${}^i i_{xx}$, ${}^i i_{yy}$ e ${}^i i_{zz}$ são as inércias de rotação do corpo em relação aos seus eixos locais, que podem ser determinadas, para sólidos com formas simples, em tabelas existentes na bibliografia, sendo genericamente definidas por (Shabana, 2010):

$$\begin{cases} {}^i i_{xx} = \int_{iV} {}^i \rho \left[({}^i \bar{y})^2 + ({}^i \bar{z})^2 \right] d^i V \\ {}^i i_{yy} = \int_{iV} {}^i \rho \left[({}^i \bar{x})^2 + ({}^i \bar{z})^2 \right] d^i V \\ {}^i i_{zz} = \int_{iV} {}^i \rho \left[({}^i \bar{x})^2 + ({}^i \bar{y})^2 \right] d^i V \end{cases} \quad (31)$$

Assembla-se para $i=1, \dots, 4$ obtêm-se a matriz de massa total, M , dada da seguinte forma. Esta matriz tem a dimensão de 28 linhas por 28 colunas.

$$M = \begin{bmatrix} {}^1 M & 0 & 0 & 0 \\ 0 & {}^2 M & 0 & 0 \\ 0 & 0 & {}^3 M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & {}^4 M \end{bmatrix} \quad (32)$$

4.4 Definição das restrições

4.4.1 Ligação A

Como se referiu acima, a ligação A liga rigidamente o corpo 1 no ponto A local, ao “bedrock”, sendo comumente designada por encastramento. Esta configuração caracteriza-se pelo facto de as translações e as rotações relativas no ponto de ligação entre os corpos serem nulas. As correspondentes equações de restrição ficam então função das coordenadas do corpo 1 e são dadas por:

$$C_A({}^1 q) = \begin{bmatrix} {}^1 r_A - k_{rA} \\ {}^1 \theta_A - k_{\theta A} \end{bmatrix} = 0 \quad (33)$$

Onde ${}^1 r_A$ e ${}^1 \theta_A$ são, respetivamente, as coordenadas globais de translação e de rotação, na ligação A em relação ao corpo 1. O vetor ${}^1 r_A$ é obtido através da (13), e k_r e k_θ são dois vetores constantes que representam a posição relativa entre os eixos do corpo 1 e do “bedrock”.

4.4.2 Ligação B

A ligação adotada para o ponto B, entre os corpos 1 e 2, é do tipo universal e está representada na Figura 4.4. Esta ligação tem dois graus de liberdade, associados a duas rotações em torno do eixo 1h , do corpo 1, e do eixo 2h , pertencente ao corpo 2.

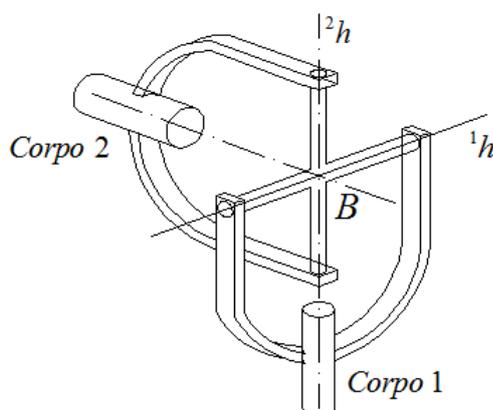


Figura 4.4 - Ligação B universal

As condições de restrição desta ligação são estabelecidas através da equação seguinte:

$$C_B({}^1q, {}^2q) = \begin{bmatrix} {}^1r_B - {}^2r_B \\ {}^1h^T {}^2h \end{bmatrix} = 0 \quad (34)$$

No primeiro grupo de condições, impõe-se que os deslocamentos relativos entre o ponto B do corpo 2 e o ponto B do corpo 1 sejam nulos, sendo 1r_B e 2r_B os vetores, em coordenadas globais, do ponto B para os corpos 1 e 2, determinados pela equação (13) a partir das coordenadas locais de B para o corpo 1 e para o corpo 2, respetivamente. No segundo grupo, constituído apenas por uma condição, impõe-se a perpendicularidade entre os eixos 1h e 2h , quaisquer que sejam as posições que os corpos 1 e 2 possam assumir: obtém-se esta condição impondo que o produto escalar dos versores dos eixos seja nulo, para qualquer orientação dos corpos A e B. No sistema estrutural adotado, definiu-se estes versores na seguinte forma, em coordenadas locais:

$$\begin{cases} {}^1\bar{h}_B = [0 & 1 & 0] \\ {}^2\bar{h}_B = [0 & 0 & 1] \end{cases} \quad (35)$$

E a correspondente restrição vem, então, dada por:

$${}^1A^1\bar{h}_B \cdot {}^2A^2\bar{h}_B = 0 \quad (36)$$

4.4.3 Ligação C

A ligação C é uma ligação revolutiva, permitindo a rotação relativa entre os corpos 2 e 3 apenas em torno de um eixo, com versor fixo no sistema de coordenadas locais. As restrições associadas a esta ligação são obtidas de forma análoga à ligação B descrita acima. A única diferença reside no facto de a ligação rotulada permitir apenas uma rotação em torno de um eixo, conforme a Figura 4.5.

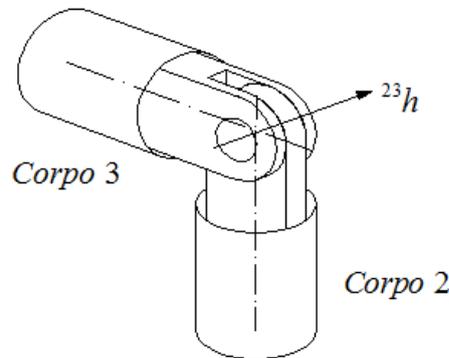


Figura 4.5 - Ligação rotulada ou revolutiva

Para esta ligação, as equações de restrição estão definidas pela equação seguinte:

$$C_C({}^2q, {}^3q) = \begin{bmatrix} {}^2r_C - {}^2r_C \\ {}^2v_1^T {}^3v \\ {}^2v_2^T {}^3v \end{bmatrix} = 0 \quad (37)$$

Sendo o primeiro grupo análogo às restrições de translação das ligações A e B. As duas últimas restrições são obtidas de forma semelhante à restrição de rotação da ligação B. Se se definir o eixo de rotação, por exemplo, no sistema associado ao corpo 2, na forma seguinte:

$${}^2\bar{h}_C = [0 \ 1 \ 0] \quad (38)$$

Esta ligação impõe que este versor seja sempre perpendicular a dois eixos ortogonais e distintos do corpo 3. Os eixos adotados são:

$$\begin{cases} {}^3\bar{v}_{C,1} = [1 \ 0 \ 0] \\ {}^3\bar{v}_{C,2} = [0 \ 0 \ 1] \end{cases} \quad (39)$$

E as correspondentes restrições de rotação vêm dadas por:

$$\begin{cases} \left({}^2A \cdot {}^2\bar{h}_C \right) \cdot \left({}^3A \cdot {}^3\bar{v}_{C,1} \right) = 0 \\ \left({}^2A \cdot {}^2\bar{h}_C \right) \cdot \left({}^3A \cdot {}^3\bar{v}_{C,2} \right) = 0 \end{cases} \quad (40)$$

4.4.4 Ligação D

A ligação D, conforme apresentado na Figura 4.1, é uma ligação rígida, uma vez que se impede qualquer movimento relativo entre o flutuador (corpo 4) e o corpo 3. Por isso, a ligação rígida entre dois corpos impõe que as coordenadas de translação e de rotação sejam restringidas, e as restrições associadas à ligação D tomam a forma seguinte:

$$C_D({}^3q, {}^4q) = \begin{bmatrix} {}^3r_D - {}^4r_D - k_{rD} \\ {}^3\theta_D - {}^4\theta_D - k_{\theta D} \end{bmatrix} \quad (41)$$

Onde 3r_D , ${}^3\theta_D$, 4r_D e ${}^4\theta_D$ correspondem às coordenadas globais do ponto D em relação ao corpo 3 e 4.

Com base nas restrições estabelecidas para as várias ligações, o vetor das restrições é obtido simplesmente a partir da junção das várias equações, obtendo-se então um vetor com 21 equações na forma:

$$C = [C_A, C_B, C_C, C_D]^T \quad (42)$$

4.5 Matriz Jacobeana das Restrições

Para a definição da equação de equilíbrio do sistema, como se verá adiante, é necessária a determinação da matriz Jacobeana do vetor das restrições (Shabana 2013 e 2010). Esta matriz é obtida derivando cada restrição em relação às coordenadas do problema. Se C_i definir a restrição i , o termo genérico (i,j) da Jacobeana das restrições é dado por:

$${}^{i,j}C_q = \frac{\partial C_i}{\partial {}^j q}$$

No presente problema, obtém-se uma matriz com 21 linhas, igual ao número de restrições n_r , e com 28 colunas, igual ao número de coordenadas n_c .

4.6 Forças Aplicadas no Sistema

As forças aplicadas no sistema dividem-se em duas componentes: as forças centrífugas, geradas pelo movimento de rotação dos corpos que são agrupadas no vetor iQ_v , e as forças exteriores aplicadas, que serão agrupadas no vetor iQ_e . As forças exteriores aplicadas no sistema contêm o peso próprio dos corpos, as forças geradas pelos sistemas mola-amortecedor-atuador, e a pressão hidrodinâmica no flutuador.

4.6.1 Forças Centrífugas

As forças centrífugas ocorrem quando um determinado corpo é submetido a movimentos de rotação em torno de um ponto do espaço. As forças centrífugas de um corpo cuja origem do sistema de eixos coincide com o centro de gravidade do corpo são dadas pelo vetor (Shabana 2010):

$${}^iQ_v = \begin{bmatrix} ({}^iQ_v)_R \\ ({}^iQ_v)_\theta \end{bmatrix} \quad (43)$$

onde $({}^iQ_v)_R$ e $({}^iQ_v)_\theta$ são definidos por,

$$({}^iQ_v)_R = 0 \quad (44)$$

$$({}^iQ_v)_\theta = -{}^i\bar{G}^T \left[{}^i\bar{\omega} \times ({}^i\bar{I}_{\theta\theta} {}^i\bar{\omega}) + {}^i\bar{I}_{\theta\theta} {}^i\dot{\bar{G}} {}^i\dot{\theta} \right] \quad (45)$$

Nesta expressão, ${}^i\bar{G}$ é a matriz definida na equação (29), ${}^i\bar{I}_{\theta\theta}$ é definido na equação (30), e ${}^i\dot{\theta}$ é o vetor das velocidades de rotação dado por

$${}^i\dot{\theta} = [{}^i\dot{\theta}_0 \quad {}^i\dot{\theta}_1 \quad {}^i\dot{\theta}_2 \quad {}^i\dot{\theta}_3]^T \quad (46)$$

As velocidades rotacionais em coordenadas locais são dadas por

$${}^i\bar{\omega} = {}^i\bar{G} {}^i\dot{\theta} \quad (47)$$

e as restantes matrizes são obtidas a partir da derivada em ordem ao tempo dos parâmetros de Euler na forma seguinte:

$${}^i\dot{\bar{G}} = 2\dot{E} \quad (48)$$

$${}^i\ddot{\vec{E}} = \begin{bmatrix} -{}^i\dot{\theta}_1 & {}^i\dot{\theta}_0 & {}^i\dot{\theta}_3 & -{}^i\dot{\theta}_2 \\ -{}^i\dot{\theta}_2 & -{}^i\dot{\theta}_3 & {}^i\dot{\theta}_0 & {}^i\dot{\theta}_1 \\ -{}^i\dot{\theta}_3 & {}^i\dot{\theta}_2 & -{}^i\dot{\theta}_1 & {}^i\dot{\theta}_0 \end{bmatrix} \quad (49)$$

O vetor total das forças centrífugas total Q_V é dado pela assemblagem do vetor definido em (35) para todos os corpos do mecanismo:

$$Q_V = [{}^1Q_V \quad {}^2Q_V \quad {}^3Q_V \quad {}^4Q_V]^T \quad (50)$$

4.6.2 Forças Aplicadas Generalizadas

Em termos genéricos, uma força exterior genérica é modelada por duas parcelas: uma parcela relativa às forças aplicadas na direção do sistema de eixos, iX , iY e iZ , e uma segunda parcela corresponde aos momentos relativamente aos eixos locais do corpo. Desta forma, o vetor das forças generalizadas de um determinado corpo i definido na forma seguinte:

$${}^iQ_e = \begin{bmatrix} {}^iQ_R \\ {}^iQ_\theta \end{bmatrix} \quad (51)$$

A ação do peso próprio correspondente a cada corpo é determinada multiplicado a massa do corpo pela aceleração da gravidade ($g = 9.8m/s^2$), conforme equação seguinte.

$${}^iPp = {}^im.g \quad (52)$$

E aponta sempre na direção do eixo z global. Desta forma, o vetor iQ_e associado ao peso próprio de cada corpo em coordenadas locais é dado por:

$${}^iQ_e = \begin{bmatrix} {}^iQ_R \\ {}^iQ_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -{}^iPp \quad {}^iA^T [0,0,1] \\ 0 \end{bmatrix} \quad (53)$$

Passa-se agora para a determinação da força de impulsão no flutuador, apresentado na figura 4.6.

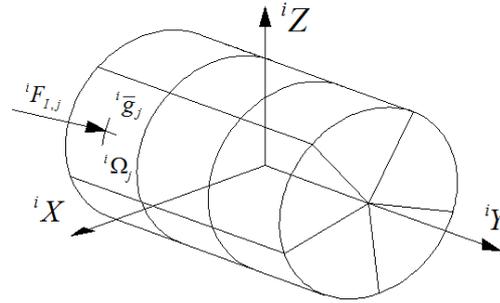


Figura 4.6 - Discretização do flutuador para o cálculo da força de impulsão num elemento i .

A superfície exterior do flutuador foi dividida em pequenas porções de área, tendo-se definido as coordenadas locais do centro geométrico de cada elemento de área \bar{g}_j , dadas por:

$$\bar{g}_j = \begin{bmatrix} {}^i x_j & {}^i y_j & {}^i z_j \end{bmatrix}^T \quad (54)$$

Através da equação (13) determina-se as coordenadas globais desses pontos, obtendo-se:

$$g_j = {}^4 r + {}^4 A \bar{g}_j \quad (55)$$

Com base nos centros geométricos das superfícies e das características geométricas do flutuador, determina-se o versor da força, que aponta sempre na direção perpendicular à superfície:

$${}^i \hat{v}_j = -\frac{\bar{g}_j}{\|\bar{g}_j\|} \quad (56)$$

De seguida, para um dado instante, determina-se as cotas da onda usando a equação (6), obtendo-se.

$$z_{onda,j} = \zeta(cg_{j,xx}, cg_{j,yy}, t, h) \quad (57)$$

O processo de cálculo da força de pressão em cada ponto é determinada da seguinte forma:

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

$$cg_{j,zz} > z_{onda,j} \Rightarrow {}^i F_{I,j} = 0$$

- ii) se a cota do centro geométrico dor inferior à cota da onda, a força de pressão é dada pelo integral ao longo da área do elemento da pressão definida na equação (7):

$$cg_{j,zz} \leq z_{onda,j} \Rightarrow {}^i F_{I,j} = \int_{\Omega_j} p_j d\Omega_j \approx p_j \cdot \Omega_j \quad (58)$$

A aproximação dada pela expressão anterior, em que a força de pressão é dada pelo produto da pressão considerada homogénea pela área do elemento, é legítima se o elemento de área tiver dimensões muito inferiores às dimensões do flutuador. A força de impulsão total é finalmente dada então pela soma de todas as forças dos elementos em que se discretizou a área exterior do flutuador.

O sistema mola-amortecedor-atuador é o modelo estrutural que melhor permite modelar mecanismos de dissipação de energia com base no movimento de corpos sólidos. Este sistema é aplicado em vários ramos da engenharia, desde o ramo automóvel até estruturas de Engenharia Civil, de que é um célebre exemplo os sistemas adicionados à *Millennium Bridge*, após as obras de reabilitação de que foi alvo por forma a controlar fenómenos de ressonância. No presente trabalho, utiliza-se este modelo estrutural à rotação para modelar o mecanismo de extração de energia, conforme se apresenta na Figura 4.7.

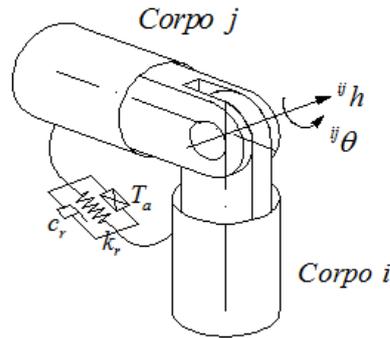


Figura 4.7 - Sistema mola-amortecedor-atuador

Considerando-se então que um corpo i está ligado a outro corpo j por meio de um sistema mola-amortecedor-atuador rotacional, o momento exercido num qualquer desses corpos é dado na forma seguinte.

$$T^{ij} = (k^{ij}\theta + c^{ij}\dot{\theta} + T_a) \quad (59)$$

Onde k e c são, respetivamente, o coeficiente de rigidez da mola e o coeficiente de amortecimento. T_a é a força do atuador e $\dot{\theta}$ e $\ddot{\theta}$ correspondem, respetivamente, à rotação e velocidade angular relativa dos corpos.

De seguida, pormenoriza-se a formulação destes mecanismos para as Ligações B e C.

4.6.2.1 Ligação B

A ligação B, conforme a Figura 4.88, é uma ligação universal e tem dois graus de liberdade: uma rotação em torno do eixo 1h , do corpo 1, e uma rotação em torno do eixo 2h , do corpo 2 e sempre perpendicular ao eixo associado a 1h , em virtude da restrição associada a este elemento. Desta forma, considerou-se um sistema mola-amortecedor associado a cada rotação possível.

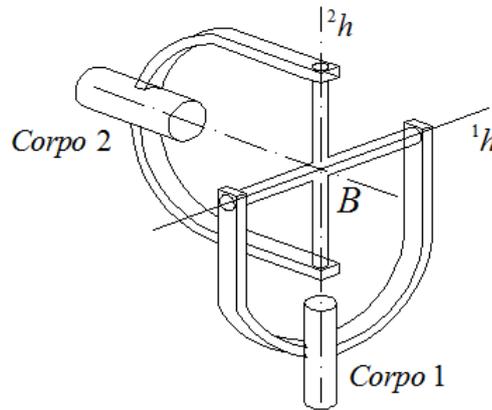


Figura 4.8 - Ligação B universal

O momento total devido ao sistema mola-amortecedor para a ligação B em relação ao eixo 1, doravante denominada por $B1$, é dado por:

$${}^{B1}T_{total,t_{n+1}} = {}^{B1}k({}^{B1}\theta_{t_{n+1}} - {}^{B1}\theta_{t_0} - {}^{B1}\theta_{ref}) + {}^{B1}c {}^{B1}\dot{\theta}_{t_{n+1}} + {}^{B1}T_a \quad (60)$$

E para a ligação B em relação ao eixo 2, doravante denominada por $B2$:

$${}^{B2}T_{total,t_{n+1}} = {}^{B2}k({}^{B2}\theta_{t_{n+1}} - {}^{B2}\theta_{t_0} - {}^{B2}\theta_{ref}) + {}^{B2}c {}^{B2}\dot{\theta}_{t_{n+1}} + {}^{B2}T_a \quad (61)$$

Nestas expressões, ${}^{B1}\theta_{ref}$ e ${}^{B2}\theta_{ref}$ são determinadas a partir dos momentos nas molas no instante em que a estrutura inicia o seu movimento. O valor destes ângulos é determinado da seguinte forma:

$${}^{B1}\theta_{ref} = \frac{M_{B1}}{B1k} \quad \wedge \quad {}^{B2}\theta_{ref} = \frac{M_{B2}}{B2k} \quad (62)$$

Onde ${}^{B1}k$ e ${}^{B2}k$ são a rigidez das molas para a ligação B1 e B2, respetivamente. M_{B1} e M_{B2} são os momentos aplicados nos eixos de rotação 1h e 2h , respetivamente, no instante inicial.

O ângulo ${}^{B1}\theta_0$ e o ${}^{B2}\theta_0$ são os ângulos observados no instante $t=0$, os quais definem-se através das coordenadas de orientação do corpo no instante inicial. Porém, também podem ser definidos da mesma forma que os ângulos no instante t_n e t_{n+1} , ou seja, pelo procedimento apresentado de seguida.

Em primeiro lugar define-se, em coordenadas locais, os versores dos eixos de rotação, ou seja,

$$\begin{cases} {}^1\bar{h}_B = [0 & 1 & 0]^T \\ {}^2\bar{h}_B = [0 & 0 & 1]^T \end{cases} \quad (63)$$

Em coordenadas globais,

$$\begin{cases} {}^1h_B = {}^1A {}^1\bar{h}_B \\ {}^2h_B = {}^2A {}^2\bar{h}_B \end{cases} \quad (64)$$

De seguida para a B1, obtém-se os versores em coordenadas locais do eixo longitudinal do corpo 1, ${}^{B1}\bar{u}_{c1,xx}$, e do eixo perpendicular aos eixos longitudinal e de rotação 1h_B , ${}^{B1}\bar{u}_{c1,zz}$.

$$\begin{cases} {}^{B1}\bar{u}_{c1,xx} = [1 & 0 & 0]^T \\ {}^{B1}\bar{u}_{c1,zz} = [0 & 0 & 1]^T \end{cases} \quad (65)$$

Em coordenadas globais são dados por:

$$\begin{cases} {}^{B1}u_{c1,xx} = {}^1A {}^{B1}\bar{u}_{c1,xx} \\ {}^{B1}u_{c1,zz} = {}^1A {}^{B1}\bar{u}_{c1,zz} \end{cases} \quad (66)$$

Analogicamente, para B2, define-se os versores, em coordenadas locais, do eixo longitudinal do corpo 2, ${}^{B2}\bar{u}_{c2,xx}$, e do eixo perpendicular aos eixos longitudinal e de rotação 2h_B , ${}^{B2}\bar{u}_{c2,yy}$:

$$\begin{cases} {}^{B2}\bar{u}_{c2,xx} = [1 & 0 & 0]^T \\ {}^{B2}\bar{u}_{c2,yy} = [0 & 1 & 0]^T \end{cases} \quad (67)$$

Em coordenadas globais estes são dados por:

$$\begin{cases} {}^{B2}u_{c2,xx} = {}^2A {}^{B2}\bar{u}_{c2,xx} \\ {}^{B2}u_{c2,yy} = {}^2A {}^{B2}\bar{u}_{c2,yy} \end{cases} \quad (68)$$

Desta forma, os cossenos dos ângulos ${}^{B1}\theta_j$ e ${}^{B2}\theta_j$ são definidos, num qualquer instante j , por:

$$\cos[{}^{B1}\theta_j] = {}^2h_B \cdot {}^{B1}u_{c1,xx} \quad (69)$$

$$\cos[{}^{B2}\theta_j] = {}^1h_B \cdot {}^{B2}u_{c1,xx} \quad (70)$$

Ficando estas grandezas trigonométricas definidas a partir das coordenadas generalizadas do corpo, a partir da matriz iA . Procedendo de forma análoga para a determinação dos senos desses mesmos ângulos, obtém-se:

$$\sin[{}^{B1}\theta_j] = {}^2h_B \cdot {}^{B1}u_{c1,zz} \quad (71)$$

$$\sin[{}^{B2}\theta_j] = {}^1h_B \cdot {}^{B2}u_{c1,yy} \quad (72)$$

Para a aplicação num processo de integração no tempo, do qual se falará adiante, as variações de ângulo entre dois instantes consecutivos t_n e t_{n+1} , para as ligações $B1$ e $B2$, podem ser determinadas a partir das coordenadas dos corpos da ligação por (Apostol, 1967)

$$\Delta {}^{B1}\theta_{t_{n+1}} = \arcsin(\sin({}^{B1}\theta_{t_{n+1}})\cos({}^{B1}\theta_{t_n}) - \cos({}^{B1}\theta_{t_{n+1}})\sin({}^{B1}\theta_{t_n})) \quad (73)$$

$$\Delta {}^{B2}\theta_{t_{n+1}} = \arcsin(\sin({}^{B2}\theta_{t_{n+1}})\cos({}^{B2}\theta_{t_n}) - \cos({}^{B2}\theta_{t_{n+1}})\sin({}^{B2}\theta_{t_n})) \quad (74)$$

Sendo, no instante t_n , as coordenadas de posição, velocidade e aceleração dos corpos conhecidas, os ângulos ${}^{B1}\theta_{t_n}$ e ${}^{B2}\theta_{t_n}$ ficam completamente determinados. No instante t_{n+1} , as coordenadas são ainda desconhecidas e, desta forma, ${}^{B1}\theta_{t_{n+1}}$ e ${}^{B2}\theta_{t_{n+1}}$ ficam dependentes das coordenadas. Esta estratégia limita a variação dos ângulos $\Delta {}^{B1}\theta_{t_{n+1}}$ e $\Delta {}^{B2}\theta_{t_{n+1}}$ a valores entre $-\pi/2$ e $\pi/2$ em cada iteração, devido às propriedades da função \arcsin . No entanto, esta é a solução aconselhável por a função $\arcsin(\theta)$ ser simétrica na vizinhança de $\Delta\theta=0$, resultando da equação (73) e (74) diretamente o sinal da variação de ângulo entre duas iterações consecutivas. Isto torna desnecessário a contagem do número de voltas, ao invés do que acontece noutras metodologias (Haug, 1989), porque os ângulos serão dados cumulativamente, na forma:

$${}^{B1}\theta_{t_{n+1}}(q_{n+1}) = {}^{B1}\theta_{t_n} + \Delta {}^{B1}\theta_{t_{n+1}}(q_{n+1}) \quad \wedge \quad {}^{B2}\theta_{t_{n+1}}(q_{n+1}) = {}^{B2}\theta_{t_n} + \Delta {}^{B2}\theta_{t_{n+1}}(q_{n+1}) \quad (75)$$

As velocidades no instante t_{n+1} , ou seja, ${}^{B1}\dot{\theta}_{t_{n+1}}$ e ${}^{B2}\dot{\theta}_{t_{n+1}}$, que serão dependentes das coordenadas de posição e velocidade, são definidas através das seguintes equações (Haug 1989):

$${}^{B1}\dot{\theta}_{t_{n+1}}(q_{n+1}, \dot{q}_{n+1}) = {}^1h_B \cdot ({}^2\omega - {}^1\omega) \quad (76)$$

$${}^{B2}\dot{\theta}_{t_{n+1}}(q_{n+1}, \dot{q}_{n+1}) = {}^2h_B \cdot ({}^1\omega - {}^2\omega) \quad (77)$$

onde:

$$\begin{cases} {}^1\omega = {}^1G(q_{n+1}) {}^1\dot{\theta}(\dot{q}_{n+1}) \\ {}^2\omega = {}^2G(q_{n+1}) {}^2\dot{\theta}(\dot{q}_{n+1}) \end{cases} \quad (78)$$

e

$${}^iG = 2^iE = 2 \begin{bmatrix} -{}^i\theta_1 & {}^i\theta_0 & -{}^i\theta_3 & {}^i\theta_2 \\ -{}^i\theta_2 & {}^i\theta_3 & {}^i\theta_0 & -{}^i\theta_1 \\ -{}^i\theta_3 & -{}^i\theta_2 & -{}^i\theta_1 & -{}^i\theta_0 \end{bmatrix} \quad (79)$$

Por fim, as forças generalizadas do corpo 1 e 2, ou seja, 1Q_e e 2Q_e , referentes à ligação B, são definidas da seguinte forma:

$${}^1Q_e = \begin{bmatrix} 0 \\ -{}^{B1}T_{total,t_{n+1}} {}^1G^T {}^1h_B - {}^{B2}T_{total,t_{n+1}} {}^1G^T {}^2h_B \end{bmatrix} \quad (80)$$

$${}^2Q_e = \begin{bmatrix} 0 \\ {}^{B1}T_{total,t_{n+1}} {}^2G^T {}^1h_B + {}^{B2}T_{total,t_{n+1}} {}^2G^T {}^2h_B \end{bmatrix} \quad (81)$$

4.6.2.2 Ligação C

A ligação C, conforme se apresenta na Figura 4.9, apenas tem um grau de liberdade, que é a rotação em torno do eixo ${}^{23}h$. De seguida apresenta-se a formulação para o cálculo das forças do sistema mola-amortecedor da ligação C, que segue uma metodologia análoga à adoptada para a ligação B.

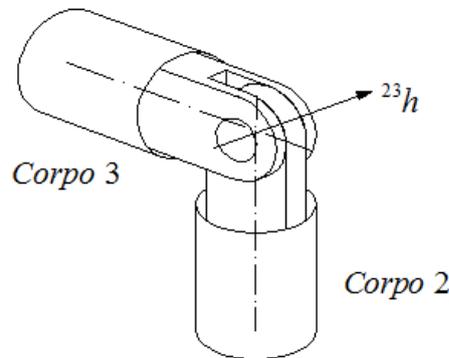


Figura 4.9 - Ligação rotulada ou revolutiva

Assim, o momento total devido ao sistema mola-amortecedor da ligação C é dado por:

$${}^c T_{total,t_{n+1}} = {}^c k ({}^c \theta_{t_{n+1}} - {}^c \theta_{t_0} - {}^c \theta_{ref}) + {}^c c {}^c \dot{\theta}_{t_{n+1}} + {}^c T_a \quad (82)$$

no qual, ${}^c \theta_{ref}$ é dado por,

$${}^c \theta_{ref} = \frac{M_c}{c_k} \quad (83)$$

Adoptando-se como versor do eixo de rotação o versor do eixo yy do corpo 2, em coordenadas locais este vem dado por:

$${}^2 \bar{h}_c = [0 \ 1 \ 0]^T \quad (84)$$

tomando a forma seguinte quando se passa para coordenadas globais:

$${}^2 h_c = {}^2 A {}^2 \bar{h}_c \quad (85)$$

As restrições associadas a esta ligação asseguram que este versor é sempre perpendicular aos versores dos eixos x e z locais do corpo 3. Os versores dos eixos x e z dos corpos 2 e 3 são dados em coordenadas locais por:

$$\begin{cases} {}^2 \bar{u}_{xx} = [1 \ 0 \ 0]^T \\ {}^2 \bar{u}_{zz} = [0 \ 0 \ 1]^T \end{cases} \wedge \begin{cases} {}^3 \bar{u}_{xx} = [1 \ 0 \ 0]^T \\ {}^3 \bar{u}_{zz} = [0 \ 0 \ 1]^T \end{cases} \quad (86)$$

e, em coordenadas globais, por:

$$\begin{cases} {}^2 u_{xx} = {}^2 A \cdot {}^2 \bar{u}_{xx} \\ {}^2 u_{zz} = {}^2 A \cdot {}^2 \bar{u}_{zz} \end{cases} \wedge \begin{cases} {}^3 u_{xx} = {}^3 A \cdot {}^3 \bar{u}_{xx} \\ {}^3 u_{zz} = {}^3 A \cdot {}^3 \bar{u}_{zz} \end{cases} \quad (87)$$

O cosseno do ângulo ${}^c \theta$ vem dado por:

$$\cos({}^c \theta) = {}^2 u_{xx} \cdot {}^3 u_{xx} \quad (88)$$

e o seu seno por:

$$\sin({}^c \theta) = {}^2 u_{xx} \cdot {}^3 u_{zz} \quad (89)$$

Tendo em consideração, mais uma vez, que o objetivo é aplicar esta formulação a um processo de integração no tempo, uma variação de ângulo entre o instante t_n e o instante t_{n+1}

pode ser dada diretamente em função das coordenadas do corpo nos instantes t_n e t_{n+1} através da expressão seguinte:

$$\Delta {}^c\theta_{t_{n+1}} = \arcsin(\sin({}^c\theta_{t_{n+1}}) \cos({}^c\theta_{t_n}) - \cos({}^c\theta_{t_{n+1}}) \sin({}^c\theta_{t_n})) \quad (90)$$

Sendo, no instante t_n , todas as coordenadas de posição, velocidade e aceleração conhecidas, o ângulo ${}^c\theta_{t_n}$ fica determinado. No instante t_{n+1} as coordenadas ainda são desconhecidas, mas por este processo a variação de ângulo fica apenas dependente das coordenadas generalizadas do problema.

O cálculo das velocidades de rotação ${}^c\dot{\theta}_{t_{n+1}}$ segue exatamente a mesma metodologia usada para a ligação B.

4.7 Equação de Equilíbrio

Como apresentado no “flow-chart” do capítulo 4, o sistema de equações de equilíbrio do movimento para um determinado corpo i é dado pela seguinte equação (Shabana 2010, e 2013):

$$M(q)\ddot{q} + C_q^T \lambda = Q_v(t, q, \dot{q}) + Q_e(t, q, \dot{q}) = Q(t, q, \dot{q}) \quad (91)$$

A parcela $C_q^T \lambda$ traduz fisicamente o efeito das forças da ligação entre os corpos do sistema, que estão associados às restrições das forças de ligação da respectiva restrição.

sujeito então às restrições associadas às ligações

$$C(q, t) = 0 \quad (92)$$

a que se deve adicionar também, para cada corpo i , as condições de normalização dos Parâmetros de Euler:

$$\sum_{j=4}^7 {}^i\theta_j^2 = 1 \quad (93)$$

Após a obtenção de todas as matrizes do sistema de equilíbrio, a sua resolução, para a determinação das coordenadas de posição de cada ponto, será realizada por um processo de integração no tempo, que será apresentado no capítulo seguinte.

5 INTEGRAÇÃO NO TEMPO E A RESOLUÇÃO DO SISTEMA DE EQUILIBRIO

5.1 A estratégia de integração no tempo

No contexto da Dinâmica de Estruturas ou Multicorpo, entende-se como processo de integração no tempo todo o método de resolução das equações de equilíbrio dinâmico de um sistema estrutural que permita determinar qualquer deslocamento, velocidade ou aceleração de um qualquer ponto do corpo num qualquer instante t_i a partir das condições iniciais da estrutura, isto é, da posição e da velocidade no instante t_0 num qualquer ponto da estrutura, que definem as condições iniciais do problema. Esta estratégia torna-se especialmente adequada nos casos em que outros métodos alternativos da Dinâmica de Estruturas não são, pura e simplesmente, aplicáveis. Estão dentro destes casos as estruturas com comportamento geométrico e/ou materialmente não linear, e sistemas estruturais sujeitos a ações que dependem da própria configuração da estrutura no instante t do cálculo do equilíbrio, não se podendo, portanto, definir de início a acção sobre a estrutura para qualquer instante.

Recordando que o sistema de equilíbrio dinâmico do problema em análise é dado por:

$$M(q)\ddot{q} + C_q^T \lambda = Q_v(t, q, \dot{q}) + Q_e(t, q, \dot{q}) = Q(t, q, \dot{q}) \quad (94)$$

Onde as várias matrizes estão definidas no capítulo anterior, este sistema de equações diferenciais de equilíbrio está sujeito às restrições associadas às ligações:

$$C(q, t) = 0 \quad (95)$$

E também, para cada corpo i , sujeito às condições de normalização dos seus Parâmetros de Euler:

$$\sum_{j=4}^7 {}^i\theta_j^2 = 1 \quad (96)$$

Constata-se então que se trata de um sistema misto, por conter simultaneamente equações algébricas e equações diferenciais, e a sua resolução requer um método de integração no tempo, devido aos seguintes fatores:

- i) Tomando como exemplo a matriz de massa global M , esta é altamente não linear, porque depende não linearmente das coordenadas de orientação de cada corpo no espaço tridimensional; observando-se também as restantes matrizes e vetores, constata-se que o problema a resolver consiste na resolução de um sistema de equações diferenciais de equilíbrio dinâmico não lineares, sujeitas a restrições também altamente não lineares, e onde as incógnitas têm natureza diversa: as coordenadas q representam a posição e orientação dos corpos rígidos, enquanto os Multiplicadores de Lagrange λ representam a magnitude das forças de contacto entre corpos associadas às restrições C de ligação entre corpos.
- ii) A acção da água sobre o flutuador, dada pela integração da pressão hidrodinâmica ao longo da superfície de contacto entre o flutuador e a água, como foi atrás descrito, depende, no instante de cálculo t , da posição do flutuador, que varia, e da cota da superfície livre do mar, que também varia devido ao seu movimento ondulatório.

Existe uma grande diversidade de métodos para a integração do tempo de sistemas dinâmicos. Para sistemas de equilíbrio não lineares sujeitos a restrições, os métodos mais usados são baseados nas fórmulas de Newmark (Newmark 1952 e 1959), dadas por:

$$q_{n+1} = q_n + \Delta t \dot{q}_n + \frac{\Delta t^2}{2} ((1-\beta)\ddot{q}_n + 2\beta\ddot{q}_{n+1}) \quad (97)$$

$$\dot{q}_{n+1} = \dot{q}_n + \Delta t ((1-\gamma)\ddot{q}_n + \gamma\ddot{q}_{n+1}) \quad (98)$$

Onde os índices n e $n+1$ se referem às grandezas relativas a dois instantes consecutivos t_n e t_{n+1} , e onde β e γ são os parâmetros de Newmark, apesar de o Método de Newmark ter sido desenvolvido para sistemas lineares. Estas expressões estabelecem uma correspondência entre as coordenadas e as suas primeiras e segundas derivadas associadas ao instante t_n , já calculadas, e as coordenadas e suas primeiras derivadas associadas ao instante t_{n+1} , por determinar, assim como com as segundas derivadas no instante t_{n+1} , restando como incógnitas apenas as acelerações no instante t_{n+1} .

Os processos de integração no tempo em Dinâmica Multicorpo, por serem problemas extremamente não lineares, são muito suscetíveis a fenómenos de instabilidade numérica (Nikraves e Ambrósio 1991). O Método de Newmark é incondicionalmente estável, para análise linear, quando se adota os seguintes valores para os seus coeficientes (Chopra, 2001):

$$\beta = \frac{1}{4} \quad \wedge \quad \gamma = \frac{1}{2} \quad (99)$$

De acordo com Hussein, Negrut e Shabana (2008), e por o Método de Newmark não ser dissipativo, este não assegura a estabilidade numérica para problemas não lineares. Por isso, o método mais aconselhado é o método HHT (Hilber, Hughes e Taylor, 1977), que foi adotado no presente trabalho. Neste método, a equação de equilíbrio (91 ou 94) pode ser reescrita na forma seguinte:

$$M\ddot{q} = H \quad (100)$$

Onde H é a matriz dada por:

$$H = Q - C_q^T \lambda \quad (101)$$

A equação (100) toma a forma seguinte, para o instante t_{n+1} :

$$(M\ddot{q})_{n+1} = H(t_{n+1}) \quad (102)$$

Tomando por base uma expansão em série de Taylor a partir do instante t_n , o método HHT propõe que esta expressão seja substituída por:

$$(M\ddot{q})_{n+1} = (1 + \alpha)H(t_{n+1}) - \alpha H(t_n) \quad (103)$$

Ou, equivalentemente, por

$$(M\ddot{q})_{n+1} = H(\tau_{n+1}) \quad (104)$$

Onde

$$\tau_{n+1} = t_n + (1 + \alpha)\Delta t_n \quad (105)$$

E

$$\Delta t_{n+1} = t_{n+1} - t_n \quad (106)$$

E onde α é um parâmetro pré-definido do método. Como no instante t_{n+1} as restrições têm que ser respeitadas, o problema toma então a forma, em adição à condição de normalidade (93 ou 96):

$$(M\ddot{q})_{n+1} + (1 + \alpha)(C_q^T \lambda - Q)_{n+1} - \alpha(C_q^T \lambda - Q)_n = 0 \quad (107)$$

$$C(q_{n+1}, t_{n+1}) = 0 \quad (108)$$

Que depende apenas de q_{n+1} , \dot{q}_{n+1} , \ddot{q}_{n+1} e de λ_{n+1} . Aplicando as equações de Newmark (97) e (98), as equações (94) e (95) transformam-se num sistema algébrico apenas dependente de \ddot{q}_{n+1} e λ_{n+1} . O parâmetro α definido na equação (54) pode variar entre -0.3 e 0 (Hilber, Hughes

e Taylor, 1977), e Hussein, Negrut e Shabana (2008) propõem a seguinte relação entre este parâmetro e os parâmetros de Newmark:

$$\gamma = \frac{1}{2} - \alpha \quad \wedge \quad \beta = \frac{(1-\alpha)^2}{4} \quad (109)$$

Quando $\alpha=0$, o método fica reduzido ao Método de Newmark. No final, sendo conhecidas as coordenadas e respectivas primeiras e segundas derivadas no instante t_n , pela aplicação do sistema (107) determina-se as acelerações no instante t_{n+1} ; de seguida, aplicando as fórmulas (97) e (98), determina-se os valores das coordenadas e das velocidades nesse mesmo instante, e pode então passar-se à análise do instante seguinte.

5.2 A determinação das condições iniciais

Supondo conhecidas as condições iniciais do problema, definidas pelos valores das coordenadas ${}^i q$ e das velocidades ${}^i \dot{q}$ no instante $t=0$, o início do processo de integração no tempo requer o cálculo das acelerações nesse instante. A matriz Q_d foi definida atrás na forma seguinte:

$$Q_d = -(C_q \dot{q})_q \dot{q} = C_q \ddot{q} \quad (110)$$

E o sistema de equilíbrio, no instante inicial, pode ser escrito por:

$$\begin{cases} M_0 \cdot \ddot{q}_0 + C_{q,0}^T \cdot \lambda = Q_{e,0} + Q_{v,0} \\ C_{q,0}^T \cdot \ddot{q}_0 = Q_{d,0} \end{cases} \quad (111)$$

Onde o índice o indica que a matriz ou o vetor estão associados ao instante inicial. Sendo dados os valores de ${}^i q_0$ e ${}^i \dot{q}_0$, as matrizes M_0 e $C_{q,0}$ e os vetores $Q_{e,0}$, $Q_{v,0}$ e $Q_{d,0}$ ficam então completamente determinados, observando-se que o vetor $Q_{d,0}$ se torna no vetor nulo para condições iniciais associadas a velocidades nulas. Este sistema torna-se apenas dependente das acelerações ${}^i \ddot{q}_0$ e do vetor dos multiplicadores de Lagrange ${}^i \lambda_0$, pelo que estes podem ser determinados.

5.3 A estratégia numérica de resolução do sistema de equações

Após a determinação dos valores iniciais das acelerações ${}^i \ddot{q}_0$ e dos multiplicadores de Lagrange ${}^i \lambda_0$, é necessário resolver o sistema algébrico de equilíbrio dado pelas expressões (94), (95) e (96) no instante t_{n+1} . Recorde-se que, no caso do presente trabalho, esse sistema é composto por 28 equações de equilíbrio dinâmico, 21 equações de restrição e 4 equações de

normalização dos parâmetros de Euler. O subsistema dado apenas pelas 28 equações de (94) e 21 equações de (95) é indeterminado, por (96) definir, para cada corpo, quatro equações de equilíbrio de rotação, sendo que apenas três dessas equações são linearmente independentes. Além disso, é um sistema extremamente não linear. Por isso, é aconselhável o recurso a um método de resolução que dispense a inversão de matrizes, e sabe-se que os métodos de otimização de funções são bastante mais estáveis numericamente (Fletcher, 2004).

Para tal, lembrando que ${}^i\theta$ é o vetor que contém as coordenadas de rotação – Parâmetros de Euler – do corpo i , e com base no sistema de equilíbrio escrito na forma seguinte:

$$e_{eq} = (M\ddot{q})_{n+1} + (1 + \alpha)(C_q^T \lambda - Q)_{n+1} - \alpha(C_q^T \lambda - Q)_n \quad (112)$$

$$e_{restr} = C(q_{n+1}, t_{n+1}) \quad (113)$$

$${}^i e_{norm} = {}^i\theta^T \times {}^i\theta - 1, i = 1, \dots, 4 \quad (114)$$

Pode construir-se a função:

$$F_{n+1} = \sum_{i=1}^{28} {}^i e_{eq}^2 + \sum_{i=1}^{21} {}^i e_{restr}^2 + \sum_{i=1}^4 {}^i e_{norm}^2 \quad (115)$$

Onde o índice i correspondente à linha i do respetivo conjunto de equações. Na solução correta no instante t_{n+1} , esta função assume um valor mínimo igual a zero, o que implica a satisfação de todas as equações de equilíbrio e de normalização do problema. Logo, em cada instante t_{n+1} , a solução pode ser determinada através do problema de minimização de F_{n+1} :

$$\min(F_{n+1}) \quad (116)$$

Esta formulação pode assumir várias alternativas, caso seja possível proceder à minimização de uma função objetivo com restrições, minimizando-se, desta forma, a não linearidade do problema. Uma possível estratégia passa por definir a função objetivo na forma:

$$F_{n+1}^* = \sum_{i=1}^{28} {}^i e_{eq}^2 \quad (117)$$

E proceder à minimização do problema:

$$\begin{aligned} &\min(F_{n+1}^*) \\ &s. a : \\ &C(q_{n+1}, t_{n+1}) = 0 \\ &{}^i\theta^T \times {}^i\theta - 1, i = 1, \dots, 4 \end{aligned} \quad (118)$$

5.4 A determinação do potencial de produção de energia do WEC

Após a apresentação dos conceitos fundamentais da modelação estrutural do gerador, obtém-se o registo de todos os deslocamentos, velocidades e acelerações de todos os pontos do sistema, e também todas as forças de ligação entre os corpos associadas às restrições, cuja magnitude é igual aos correspondentes multiplicadores de Lagrange. Recorde-se que o objetivo do presente trabalho é a quantificação da capacidade teórica de geração de energia elétrica do sistema estrutural proposto. Esta energia será sempre proveniente da energia dissipada nos amortecedores das ligações B1, B2 e C, na forma (Chopra 2001):

$${}^i E_D = \int_0^t {}^i c \cdot {}^i \dot{\theta} d\theta = \int_0^t {}^i c \cdot {}^i \dot{\theta}^2 dt, \quad i = B1, B2 \text{ e } C \quad (119)$$

Como a eficiência energética de um gerador é definida em função da sua potência, esta é determinada no instante t_n por:

$${}^i \Pi_n = {}^i c \cdot {}^i \dot{\theta}_n^2, \quad i = B1, B2 \text{ e } C \quad (120)$$

Esta será então a potência teórica máxima que é possível extrair, em cada instante do gerador. A potência real será dependente da eficiência dos sistemas eletromecânicos adotados, mas esse estudo está, evidentemente, fora do âmbito deste trabalho.

6 EXEMPLO ILUSTRATIVO

A programação de toda a estratégia mencionada nos capítulos anteriores efetuou-se em ambiente Mathematica (Wolfram Corp., 2010), por forma a explorar todas as capacidades da programação simbólica. Para tal, o programa segue a seguinte estratégia:

1. Definição das propriedades da onda;
2. Definição das propriedades da estrutura-gerador;
3. Determinação das condições iniciais da estrutura ($q_0, \dot{q}_0, \ddot{q}_0$ e λ_0);
4. Processo de integração no tempo:

Para $j=1$, isto é, para o primeiro incremento de tempo (Δt)

- a. Determina-se a força de impulsão no instante t_n
- b. Resolve-se a equação (115) e determina-se as coordenadas de acelerações no instante t_{n+1} , ou seja, \ddot{q}_{n+1}^*
- c. Através das equações de Newmark (97) e (98) determina-se as coordenadas de velocidade e posição no instante t_{n+1} , isto é, \dot{q}_{n+1}^* e q_{n+1}^*
- d. Com as novas coordenadas volta-se ao ponto A e atualiza-se a força de impulsão. Quando o valor da diferença da força de impulsão no t_{n+1} em relação ao instante t_n foi inferior a uma tolerância pré-estabelecida, passa-se para o incremento de tempo seguinte.

Por forma a realizar um exemplo ilustrativo do programa, adotou-se uma onda com as seguintes características, ilustrada na Figura 6.1:

- profundidade $h = 25m$;
- comprimento de onda $L = 70m$;
- amplitude de onda $H = 3m$;
- elevação da superfície livre $\zeta = 1.5m$;
- período natural $T = 9s$.

Relativamente ao esquema estrutural, os elementos do sistema são constituídos por peças prismáticas, tendo-se adotado perfis circulares ocios (CHS). A Figura 6.2 representa a configuração inicial do gerador, a qual constitui ponto de partida para a integração no tempo. Nas Tabelas 6.1 e 6.2 estão as propriedades geométricas e mecânicas dos quatro elementos distintos do gerador – estas propriedades são meramente para ilustrar o programa desenvolvido, não se pretendendo, por agora, que satisfaçam as condições de segurança aplicáveis.

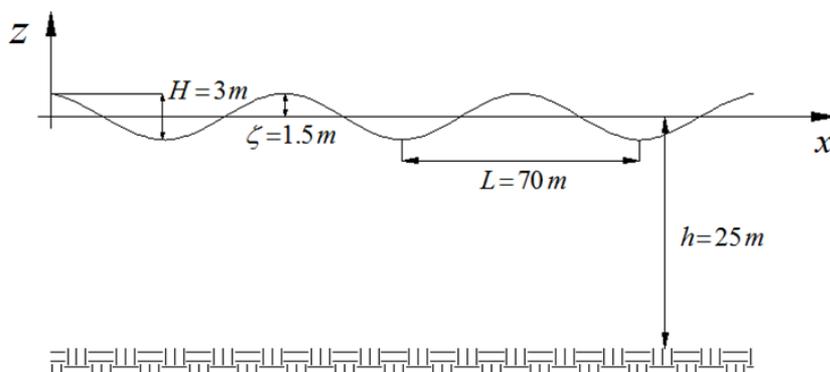


Figura 6.1 - Perfil de Onda

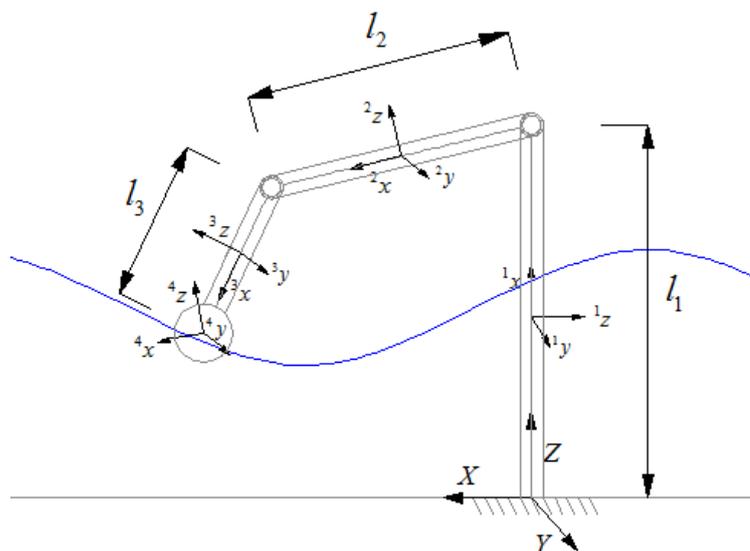


Figura 6.2 - Esquema estrutural

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
2	Braço 2	5	0,8	20,6	0,8412	384,72	1923,6	18851,3
3	Braço 3	5	0,8	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 6.1 - Propriedades Geométricas dos Corpos

Corpos		Inércia de Rotação dos Corpos Rígidos		
		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 6.2 - Inércia de Rotação dos Corpos

Iniciou-se o processo de integração do tempo, e este deu resultados nas primeiras iterações. No entanto, e devido à grande não linearidade do problema, o processo de cálculo foi afetado fortemente após algumas iterações verificou-se que o cálculo foi afetado por fenómenos de instabilidade numérica, como se pode constatar nas tabelas 6.3 e 6.4. Nesta tabela constata-se que que, nas primeiras 16 iterações, o modelo converge, ocorrendo a instabilidade numérica apenas a partir deste momento – este facto pode ser constatado pelo brutal aumento dos deslocamentos em apenas uma ou duas iterações, resultante da propagação dos inevitáveis erros numéricos – note-se que um computador não lida com números exatos, mas sim com números com um número máximo de casas decimais (Golub e Van Loan 1996). A primeira tabela corresponde aos ângulos nas molas ${}^{B1}\theta_{m+1}$, ${}^{B2}\theta_{m+1}$ e ${}^C\theta_{m+1}$, enquanto a segunda tabela apresenta as velocidades dos amortecedores ${}^{B1}\dot{\theta}_{m+1}$, ${}^{B2}\dot{\theta}_{m+1}$ e ${}^C\dot{\theta}_{m+1}$, sendo estes os valores necessários para o cálculo da potência máxima teórica.

Ângulos	Iteração 1	Iteração 2	Iteração 3	Iteração 4	Iteração 5
$B^1\theta_{tn+1}$	-0.349066	-0.337007	-0.304247	-0.352183	-0.30732
$B^2\theta_{tn+1}$	1.5708	1.5708	1.57076	1.57072	1.57051
$C\theta_{tn+1}$	-0.698132	-0.686052	-0.709516	-0.668072	-0.698246
Iteração 6	Iteração 7	Iteração 8	Iteração 9	Iteração 10	Iteração 11
-0.340562	-0.329091	-0.313771	0.324266	-0.348971	-0.3374
1.56734	1.57768	1.56271	1.58305	1.56216	1.58085
-0.684266	-0.70032	-0.723547	-0.711869	-0.668936	-0.646835
Iteração 12	Iteração 13	Iteração 14	Iteração 15	Iteração 16	Iteração 17
-0.3374	-0.305539	-0.344749	-0.36583	-0.355092	303736
1.58085	1.4858	1.63715	1.49882	1.66219	3.38938*10 ⁶
-0.646835	-0.649612	-0.651101	-0.696551	-0.790045	-1.07918*10 ⁶

Tabela 6.3 - Ângulos das molas

Velocidades	Iteração 1	Iteração 2	Iteração 3	Iteração 4	Iteração 5
$B^1\dot{\theta}_{tn+1}$	0	0.1376106	-0.338661	0.331669	-0.248564
$B^2\dot{\theta}_{tn+1}$	0	0	0.000458232	0.00105042	0.00494193
$C\dot{\theta}_{tn+1}$	0	-0.0836322	0.337946	-0.408153	0.134969
Iteração 6	Iteração 7	Iteração 8	Iteração 9	Iteração 10	Iteração 11
0.152299	0.0650167	-0.213233	-0.0799735	0.338518	0.212362
0.0569757	-0.108834	0.133822	-0.206326	0.144992	-0.166758
-0.116996	0.172239	0.590262	0.382	-0.391706	-0.790266
Iteração 12	Iteração 13	Iteração 14	Iteração 15	Iteração 16	Iteração 17
-0.0577513	-0.360749	0.214708	0.636736	0.506489	-1.18635*10 ¹²
-0.69111	1.48515	-1.17253	1.20593	-1.4803	-4.93768*10 ⁸
-1.05962	-0.743506	-0.724917	0.0967557	1.78729	-6.47925*10 ⁷

Tabela 6.4 - Cálculos das velocidades do sistema mola-amortecedor

Além das possíveis causas atrás referidas – propagação de erros de arredondamento - esta instabilidade pode resultar de outros fatores, entre os quais algum erro no código do programa, ou a possibilidade de se ter adotado uma estratégia de integração no tempo não adequada. Sendo o sistema bastante amortecido, é espectável que, no regime permanente, o gerador apresente oscilações na mesma frequência da onda, com o flutuador a realizar movimentos verticais de amplitude bastante inferior, como se apresenta no Gráfico 6.1: nesta figura, a linha azul representa o perfil de ondas adotado, e a linha vermelha representa a o movimento vertical do flutuador.

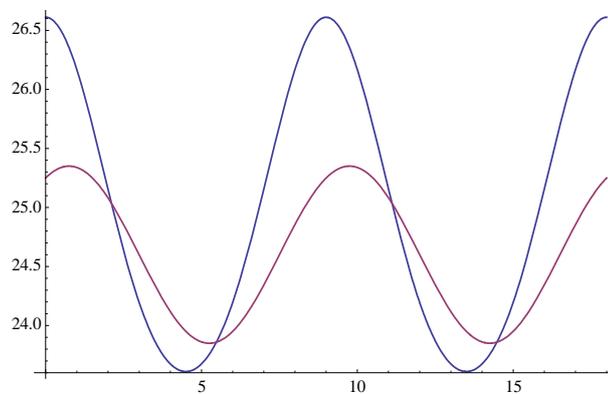


Gráfico 6.1 - Resultados expectáveis do movimento do flutuador

7 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como primeiro objetivo a realização de uma formulação analítica do comportamento de um gerador de energia a partir do movimento orbital das partículas das ondas do mar, baseada numa simbiose entre os conceitos da Engenharia Costeira e da Dinâmica Multicorpo.

Após um capítulo inicial de apresentação geral do trabalho, apresentou-se uma breve revisão do contexto das energias renováveis e da sua necessidade futura, por forma a assegurar a sustentabilidade económica e social das sociedades contemporâneas. Realçou-se o potencial energético da costa portuguesa, assim como alguns casos de insucesso e as estratégias próximas do modelo proposto: o WaveStar e a “Usina de Ondas”. Posteriormente, procedeu-se à caracterização genérica de uma onda do mar, e da ação que a água exerce em corpos parcialmente imersos. No núcleo central do presente trabalho, concretizou-se uma formulação matemática extremamente sólida do gerador, ligando os conceitos de Engenharia Costeira e de Dinâmica Multicorpo. A partir desta formulação, foi implementado um programa computacional, em ambiente Mathematica, por forma a tirar todo o partido possível das enormes vantagens da programação simbólica na manipulação de expressões muito complexas. A formulação teórica foi concluída com largo sucesso, apresentando uma sólida fundamentação matemática, sendo, por isso, de prever que a correspondente implementação computacional, assim que estiverem resolvidos os problemas numéricos já referidos, permita a avaliação quantitativa do potencial energético do gerador proposto, assim como a realização de estudos paramétricos que permitam otimizar, para uma onda de propriedades pré-definidas, assim que estiverem resolvidos os problemas computacionais referidos no capítulo anterior.

Como desenvolvimentos futuros, para além dos já referidos, propõe-se os seguintes:

- i) A análise hidrodinâmica entre um corpo sólido, parcialmente submerso e com um movimento conhecido, e a água também em movimento, carece ainda de bastantes desenvolvimentos teóricos, por forma a fornecer dados suficientes para a caracterização das ações entre o corpo sólido e o fluido.
- ii) Apesar do método proposto permitir calcular todas as forças que atuam num determinado corpo sólido, deve desenvolver-se, num futuro próximo, uma estratégia de Dinâmica Multicorpo com corpos deformáveis, apesar da elevada

complexidade, para ser possível uma rigorosa determinação das deformações e das tensões num qualquer ponto da estrutura.

- iii) A estratégia adotada no presente trabalho poderá ser aplicada na modelação computacional de outros mecanismos de geração de energia, por forma a caracterizar o respetivo potencial energético e as tensões a que estão sujeitos. Constatou-se, na realização do presente trabalho, que, muito frequentemente, os mecanismos são implementados na prática apenas com base empírica, o que implica a grosseira caracterização dos esforços internos a que estão sujeitos, observando-se também que não adotam uma estratégia adequada ao movimento das partículas do mar. Deve ter-se então em conta que a energia que não for extraída do mar servirá, também, para aplicar esforços muito consideráveis no próprio sistema estrutural do gerador de energia, podendo causar a sua ruína.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aloterra@, (2014), <http://www.aloterra.com.br/page/17/>. Aloterra. Disponível: 27 de Junho de 2012. (Consultado 6 de Março de 2014).
- Antunes do Carmo J.S. (2014). “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@ (2014). <http://apren.pt/gca/?id=47>. Associação Portuguesa de Energias Renováveis. (página de internet oficial) (Consultado: 25 de Fevereiro de 2014).
- 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@ (2014). <http://www.blogunimed.com.br/regiao-mundoescocia-tera-usina-para-producao-de-energia-no-fundo-do-mar>. Bloguinmed (página da internet oficial) (Consultado: 7 de Março de 2014).
- 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
- Chopra, A. K. (2001) “Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering”, Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.
- CRSES@,(2014).
<http://www.crses.sun.ac.za/files/technologies/ocean/WaveEnergyConvertors.pdf>. Centre for renewable and sustainable energy studies. (Consultado: 5 de março de 2014).
- 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: 2 de Março de 2014)

-
- Cunha, Jorge Fernandes e Onofrei, Roxana, (2010)
http://www.marcaspatentes.pt/files/collections/pt_PT/1/300/302/Energia%20Oce%C3%A2nica.pdf. “Marcas e patentes”. (Consultado: 2 de Março de 2014).
- DGEG@ (2014a). <http://www.dgeg.pt/>. Direção Geral de Energia e Geologia. (página de internet oficial) (Consultado: 1 de Março de 2014).
- DGEG@ (2014b). <http://www.dgeg.pt/>. Renováveis-estatísticas rápidas. 3 de Março de 2014. (Consultado: 6 de Março de 2014).
- EIA@ (2014). <http://www.eia.gov/forecasts/ieo/world.cfm>. U.S. Energy Information Administration. (Consultado: 8 de Março de 2014)
- 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@ (2014), <http://www.greencarcongress.com/2011/09/eia-20110920.html> Green Car Congress (Consultado: 5 de Março de 2014)
- 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” Tese 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
- Hussein, Bassam, Negrut, Dan., Shabana, Ahmed 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@ (2014). <http://www.iea.org/aboutus/faqs/renewableenergy/>. Internacional Energy Agency (pagina de internet oficial) (Consultado: 25 de Fevereiro de 2014).
- IMF (2013), *Commodity market monthly* (report released on June 12th), International Monetary Fund – Research Department, Commodities Team. Available at: www.imf.org/commodities (Consultado: 3 de Março de 2014).
- 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 letivo 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.
- 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.
- Nikraves, P. E. (2008), “Planar Multibody Dynamics – Formulation, Programming and Applications”, Boca Raton, FL: CRC Press.
- Nikraves, 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@ (2014). <http://www.pelamiswave.com/>. “Pelamis Wave” (Consultado: 3 de Março de 2014).
- Quintela, António de Carvalho (2009). “Hidráulica”, 11ª Ed, Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian

- 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
- SPPP@ (2014). <http://www.save-pico-powerplant.org/>. Save Pico Power Plant. Citação 3 de Março de 2014
- TREIA@ (2014). <http://www.treia.org/renewable-energy-defined>. Texas Renewable Energy Industries Association. (página de internet oficial) (Consultado: 25 de Fevereiro de 2014).
- TribunadoCeara@ (2014). <http://tribunadoceara.uol.com.br/noticias/usina-de-ondas-do-ceara-deve-ficar-100-ate-o-fim-de-2013/>. “Tribuna do Ceara” (Consultado: 5 de Março de 2014)
- 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.
- WaveEC@ (2014). <http://news.wavec.org/>. Centro de energias das ondas. (Consultado: 4 de Março de 2014).
- Wavestar@, (2014). <http://wavestarenergy.com/contact-us>. Wave Star Energy. (página da internet oficial) (Consultado: 7 de Março de 2014)
- Wolfram Corp. (2010), *Mathematica 8*, Il: Champaign.