

PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DO MOVIMENTO DE PLATAFORMAS FLUTUANTES OFFSHORE MULTIFUNCIONAIS

Electricity Production from the Motions of Offshore, Multifunctional, Floating Platforms

GONÇALO BRAGA ⁽¹⁾, PAULO ROSA-SANTOS ⁽²⁾, FRANCISCO TAVEIRA-PINTO ⁽³⁾ e PAULO MARTINS ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Mestre em Engenharia Civil, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465, Porto, ec11133@fe.up.pt

⁽²⁾ Professor Auxiliar Convidado, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465, Porto, pjrsantos@fe.up.pt

⁽³⁾ Professor Catedrático, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465, Porto, fpinto@fe.up.pt

⁽⁴⁾ Engenheiro Naval, Marinha, Ministério da Defesa Nacional
Escola Naval, Alfeite, 2810-001, Almada, deg11010@fe.up.pt

Resumo

Muitos dos sistemas existentes para o aproveitamento da energia das ondas apresentam elevados custos de manutenção, já que se encontram em contacto direto com o ambiente marítimo, e, portanto, sujeitos a índices de corrosão elevados e a incrustações de flora e fauna marinha. Esses custos podem torna-los não viáveis do ponto de vista económico.

Neste trabalho é feito o estudo numérico de um dispositivo inovador para produção de eletricidade a partir dos movimentos de plataformas flutuantes *offshore* ou, mais especificamente, um dispositivo que permite aproveitar a energia das oscilações de balanço dessas plataformas, que resultam da ação da agitação marítima e do vento. Uma característica distintiva deste dispositivo é que o sistema de extração de energia e todos os componentes sensíveis estão alojados no interior do casco da plataforma flutuante, logo, protegidos do agressivo ambiente marítimo. No estudo foi usado o pacote numérico ANSYS *Academic Research Offshore/Marine*, mais conhecido como AQWA, validado qualitativamente com resultados experimentais obtidos por Clemente (2015).

O comportamento do dispositivo foi estudado em detalhe fazendo variar de forma sistemática algumas das variáveis com mais influência no seu desempenho global. Os resultados obtidos foram analisados de forma crítica. Esta abordagem permitiu uma melhor caracterização do comportamento do dispositivo tendo em vista à sua otimização. De uma maneira geral, as principais conclusões obtidas no estudo desenvolvido por Clemente (2015) foram confirmadas pelo presente estudo numérico, por exemplo, verificou-se que o dispositivo apresenta maior potência absorvida para períodos de onda próximos do período natural da oscilação de balanço e que a um aumento de altura de onda incidente corresponde também um aumento dos valores da potência média absorvida.

Palavras-chave: Conversor da energia das ondas, modelação numérica, AQWA, ressonância, oscilação de balanço.

Abstract

Many of the existing wave energy harvesting systems present high maintenance costs, since they are in direct contact with the marine environment, subjected to high corrosion rates and incrustations of marine flora and fauna, which can make them economically infeasible.

This work presents the numerical study of a novel device created with the goal of producing electric power from the motions of offshore floating platforms or, more specifically, that allows harvesting the energy from the platform's roll oscillations which result from the action of sea waves and wind. A distinctive feature of this device is that the power-take-off system and all the sensitive components are safely housed inside the hull of the floating platform, therefore protected from the rough marine environment. The study was carried out with the ANSYS *Academic Research Offshore/Marine* numerical package, also known as AQWA, which was qualitatively validated with experimental results previously obtained by Clemente (2015).

The behavior of the device was comprehensively studied by systematically varying some of the variables with more influence on its overall performance and critically analyzing the results obtained. This allowed the study of the device to be deepened aiming its optimization. In general, the main conclusions obtained in the study carried out by Clemente (2015) were confirmed in the numerical study, namely it was observed that the device presents better performances (higher extracted power) for wave periods close to the roll natural period of oscillation and that an increase in the incident wave height leads also to an increase of the mean absorbed power.

Keywords: Wave energy converter, numerical modelling, AQWA, resonance, rolling.

1. Introdução

Atualmente, e com a crescente necessidade de redução dos agentes causadores de poluição e das alterações climáticas, têm surgido várias alternativas à produção de energia não renovável, algumas das quais envolvem o recurso à energia das ondas.

Tendo por base os conhecimentos adquiridos ao longo dos anos e consequentes avanços tecnológicos, hoje já é possível conceber dispositivos para produção de energia renovável através da conversão do potencial energético das ondas marítimas em energia elétrica. Contudo, uma vez que o aproveitamento desse recurso energético ainda está numa fase inicial, surge a necessidade de estudar novos conceitos, formas, funcionalidades, tecnologias e aplicações para que se possam atingir níveis de eficiência e rentabilidade mais elevados e, logo, de viabilidade económica, essenciais para que se transformem numa alternativa viável às energias não renováveis, assegurando a satisfação de uma cota relevante dos consumos energéticos.

Muitos dos sistemas existentes para o aproveitamento da energia das ondas apresentam ainda custos de manutenção elevados, já que estão em permanente contacto direto com o ambiente marítimo e, portanto, sujeitos a índices de corrosão elevados e a incrustações de flora e de fauna marinhas, o que os pode tornar inviáveis do ponto de vista económico.

Neste trabalho é feito o estudo numérico de um dispositivo inovador para a produção de energia elétrica a partir dos movimentos de plataformas flutuantes *offshore* de qualquer tipo, ou seja, que permite o aproveitamento da energia das oscilações de balanço dessas plataformas que resultam da ação da agitação marítima e do vento. Neste novo conceito, o sistema de extração de energia e todos os componentes sensíveis estão alojados no interior do casco da plataforma flutuante, logo protegidos do agressivo ambiente marítimo. É expectável que os custos de operação e manutenção do sistema sejam assim minimizados.

O desenvolvimento do dispositivo foi iniciado por Clemente (2015) que, através do recurso à modelação física, estudou dois modelos do dispositivo, um à escala geométrica 1/40 e o outro à escala 1/75, no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica Recursos Hídricos e Ambiente da FEUP.

No presente trabalho é utilizado o pacote ANSYS *Offshore/Marine*, mais conhecido como AQWA, para estudar, de uma forma sistemática, a influência de algumas variáveis relevantes (por exemplo, altura de onda, período de onda, profundidade de água) no desempenho do dispositivo e, posteriormente, analisar de forma crítica os resultados obtidos, com vista a aprofundar o atual conhecimento sobre a resposta do dispositivo, para a sua futura otimização.

2. Sistema Produção de Energia

2.1. Introdução

Nas últimas quatro décadas, foram propostos e estudados centenas de conversores da energia das ondas, mas até ao momento ainda nenhum atingiu a fase comercial.

De facto, vários problemas estão ainda numa fase de resolução, tais como: a capacidade de sobrevivência e a durabilidade dos dispositivos, e o aumento da sua eficiência na absorção da energia das ondas em condições de agitação marítima muito variáveis no tempo e no espaço. O dispositivo estudado por Clemente (2015) pode ter várias aplicações, designadamente, pode ser instalado em plataformas flutuantes *offshore* multifuncionais associado a um casco que pode ter diversas configurações ou em navios e embarcações convencionais. A particularidade do conceito está no seu modo de atuação, que é instigado pelos movimentos oscilatórios de balanço da plataforma flutuante onde está instalado. Estes movimentos provocados pela ação das ondas ou do vento fazem com que uma massa móvel se desloque transversalmente. É esse movimento que aciona o gerador elétrico do sistema de extração de energia (do inglês Power Take-Off, PTO).

2.2. Princípio de funcionamento

O dispositivo em estudo é constituído por uma plataforma flutuante, à qual está acoplada uma estrutura metálica, que serve de suporte ao sistema de extração de energia. O sistema é constituído por uma componente móvel que pode deslizar sobre uma cremalheira, Figura 1.

O contacto da componente móvel com a cremalheira é feito por um pinhão (engrenagem) que aciona o gerador elétrico. A energia produzida pode ser armazenada localmente numa bateria, ou transmitida para terra por cabo submarino, dependendo do tipo de aplicação em causa.

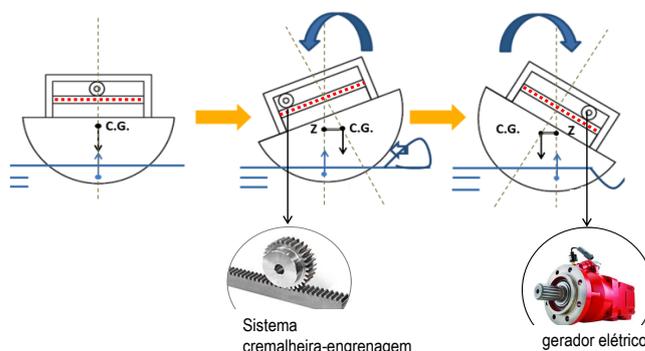


Figura 1. Representação da constituição e do modo de operação do dispositivo em estudo (adaptado de Clemente *et al.*, 2016).

As oscilações da plataforma flutuante farão a massa móvel movimentar-se periodicamente enquanto existir um diferencial de altura na estrutura metálica, fazendo o PTO produzir energia. A variabilidade e o potencial máximo de geração estão dependentes, sobretudo, da amplitude e do período das oscilações de balanço da plataforma flutuante, assim como da altura a que a massa móvel se encontra em relação ao eixo de rotação da plataforma. Uma descrição mais detalhada sobre o funcionamento do dispositivo pode ser encontrada em Clemente *et al.*, (2016). Fará sentido que o protótipo seja orientado na perpendicular à direção de propagação das ondas, uma vez que, o principal grau de liberdade explorado é o balanço. A possibilidade de colocação de todas as partes sensíveis do sistema de extração de energia no interior da plataforma flutuante garante proteção face às condições adversas do ambiente marinho, nomeadamente a corrosão e o desgaste ao longo do tempo.

2.3. Estudos anteriores

O dispositivo de produção de energia a partir das oscilações de plataformas flutuantes, idealizado por Martins (2013), foi inicialmente estudado em modelo físico por Clemente (2015) e, posteriormente, em modelo numérico utilizado o modelo numérico AQWA por Braga (2016), Figura 2.



Figura 2. Etapas do desenvolvimento do dispositivo de extração de energia.

Clemente (2015) estudou 2 aplicações alternativas do conceito com recursos à modelação física, nomeadamente quando este é associado a uma plataforma flutuante semicilíndrica genérica e a um navio de grande porte. Para o efeito foram construídos dois modelos, um à escala geométrica 1/40 e o outro à escala 1/75.

Os testes foram realizados no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica Recursos Hídricos e Ambiente da FEUP. Os dados experimentais obtidos permitiram a validação qualitativa dos resultados numéricos.

A plataforma flutuante utilizada, e que serve de base para o presente estudo, tem uma forma semicilíndrica, construída à escala 1/40. Sobre a plataforma flutuante foi instalado um pórtico metálico, constituído por uma barra horizontal e duas barras laterais verticais, que suporta a superestrutura materializada por calhas metálicas, ao longo da qual o sistema de extração de energia (PTO) se pode movimentar.

No interior da plataforma flutuante é possível colocar pesos de lastro, posicionados de forma a assegurar o deslocamento e a distribuição de massas pretendida para a plataforma. Os vários componentes da estrutura flutuante estudada estão esquematizados na Figura 3.

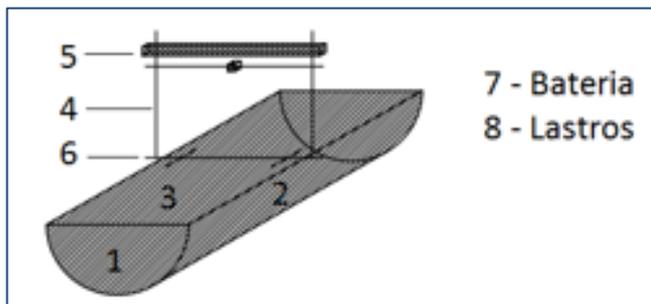


Figura 3. Esquema da estrutura flutuante estudada: 1-3 - plataforma flutuante, 4 - barras laterais verticais, 5 - barra horizontal de suporte do PTO, 6 - fixação à plataforma. A bateria e os lastros encontram-se no interior do caso da plataforma.

Importa referir que nos testes em laboratório foram analisadas diferentes variáveis, designadamente a posição e o valor dos pesos de lastro utilizados, a posição vertical e o peso da massa móvel associada ao PTO, entre outros, para ser possível analisar a resposta do sistema para uma gama variada de condições de agitação marítima.

3. Modelo Ansys® AQWA™

3.1. Introdução

O modelo numérico AQWA, utilizado no desenvolvimento e otimização do dispositivo em estudo, é constituído por um conjunto de ferramentas de análise de estruturas *offshore*, flutuantes ou fixas, que requerem a consideração do efeito da agitação marítima, do vento e das correntes.

Este modelo, baseado no método dos elementos de fronteira (por exemplo, método dos painéis) e utilizado para resolver a interação onda-estrutura, foi desenvolvido originalmente para navios e plataformas flutuantes, porém tem sido amplamente aplicado no estudo de conversores da energia das ondas (e.g., Bosma *et al.*, 2014; Bosma *et al.*, 2015; Bracco *et al.*, 2011; McCabe *et al.*, 2010; Pastor e Liu, 2014; López *et al.*, 2017). O modelo determina as solicitações hidrodinâmicas devidas à ação da agitação marítima em corpos flutuantes ou fixos, através do recurso à teoria 3D da radiação/difração e/ou à equação de Morison. As forças de deriva de segunda ordem, unidirecionais ou multidirecionais são também avaliadas, ANSYS, (2016).

Neste trabalho, o modelo AQWA foi utilizado no estudo sistemático das variáveis que mais influem no desempenho do dispositivo, bem como para estimar a sua produção de energia, aumentando o conjunto de condições de operação com resultados conhecidos, e melhorando a compreensão da resposta do complexo sistema em estudo. O modelo é constituído por dois módulos: o *Hydrodynamic Diffraction* e o *Hydrodynamic Response*.

3.2. Análise no domínio da frequência

O *Aqwa Hydrodynamic Diffraction* permite a determinação de parâmetros hidrodinâmicos primários (e.g. amortecimento, massa adicionada), necessários para a realização da análise da resposta não linear de estruturas, flutuantes ou fixas, no domínio do tempo.

A análise tridimensional dos problemas da radiação e difração pode ser realizada para vários corpos considerando a interação hidrodinâmica entre esses corpos. Neste módulo é também feito o cálculo das forças devidas à agitação marítima, designadamente as forças de primeira e segunda ordem (neste caso usando funções de transferência quadráticas), para ondas multidirecionais ou unidirecionais.

3.3. Resposta hidrodinâmica

O *Aqwa Hydrodynamic Response* permite a análise dinâmica de estruturas flutuantes no domínio do tempo, tendo em vista uma avaliação global da sua resposta e desempenho. Neste módulo é possível reproduzir diferentes tipos de conexões físicas, tais como cabos de amarração, defensas e articulações.

Os efeitos associados às forças de deriva de variação lenta, às condições de tempestade e à ocorrência de danos, como por exemplo a rotura de cabos de amarração, podem ser incluídos para estudar os efeitos transitórios que possam ocorrer.

Para ser executado este módulo deve estar ligado ao módulo *Hydrodynamic Diffraction*, pois partilha com este a geometria do problema e outras predefinições, necessitando também dos coeficientes hidrodinâmicos que foram previamente calculados.

Os movimentos de um ou mais corpos flutuantes podem ser simulados no domínio do tempo, a partir das solicitações do ambiente marítimo considerando não só as componentes hidrodinâmicas, mas também as não-linearidades relativas a juntas, ligações e cabos de amarração. A equação dinâmica do movimento do corpo flutuante é traduzida por,

$$m\ddot{\xi} = f_e + f_r + f_{st} + f_{loss} + f_{PTO} \quad [1]$$

em que ξ representa o deslocamento, m a massa total, f_e as forças de excitação, f_r as forças de radiação, f_{st} as forças hidrostáticas, f_{loss} as forças atribuídas às perdas mecânicas e f_{PTO} as forças relativas ao sistema de extração de energia.

A formulação das equações que descrevem os movimentos do corpo flutuante no domínio do tempo permite relacionar os valores instantâneos de forças e movimentos. O problema de base desta abordagem reside na descrição das reações hidrodinâmicas do fluido em resposta a movimentos arbitrários do corpo no tempo.

Para a resolução desse problema os modelos de simulação da resposta de corpos flutuantes no domínio do tempo, como o AQWA, são baseados na abordagem proposta por Cummins (1962), que recorre à teoria das funções de resposta a impulso, segundo a qual, quando um corpo é posto a oscilar em águas inicialmente paradas, as forças e os momentos que nele atuam em cada instante refletem não só o seu movimento atual, mas também a história dos seus movimentos anteriores.

Assim, um movimento arbitrário de um corpo flutuante é descrito como uma sucessão temporal de pequenos movimentos impulsivos pelo que, em qualquer instante, a força total de reação hidrodinâmica do fluido resulta da soma das reações aos movimentos impulsivos referidos, sendo que cada reação é considerada com um atraso temporal em relação ao instante do deslocamento impulsivo.

3.4. Simulação do dispositivo

A modelação da dinâmica do dispositivo de produção de energia em estudo requer a consideração simultânea da plataforma flutuante e da massa móvel associada ao sistema de extração de energia (PTO), uma vez que as oscilações da plataforma, por efeito das ondas (e do vento), induzem o movimento das partes móveis do PTO que, por sua vez, alteram a distribuição de massas do conjunto e, portanto, a sua resposta às ações do ambiente marítimo, Figura 4.

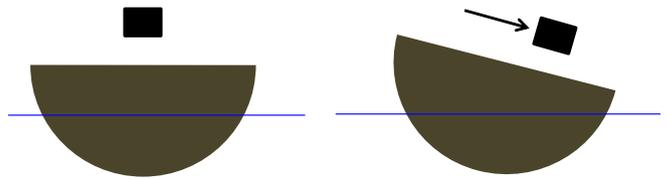


Figura 4. Modelação conjunta da plataforma flutuante e das partes móveis do sistema de extração de energia em estudo.

4. Estudo Numérico

4.1. Introdução

Neste trabalho numérico foi reproduzida a geometria e as características dos modelos físicos estudados por Clemente (2015), com o objetivo de dar continuidade a esse trabalho e otimizar a tecnologia para produção de energia a partir do movimento de plataformas flutuantes *offshore*.

Os resultados experimentais existentes foram inicialmente utilizados na validação qualitativa dos resultados obtidos com o modelo numérico. Após essa fase, o comportamento do dispositivo foi analisado fazendo variar, de forma sistemática, algumas das variáveis com mais influência no seu desempenho global.

Assim, e tendo em vista a validação do modelo numérico, começou-se por medir e pesar todos os componentes do modelo físico anteriormente testado.

De seguida, procedeu-se ao cálculo de, entre outros, momentos de inércia desses componentes, raios de giração, volume de água deslocado pela plataforma e calado estático, centros de massa, distâncias do centro de gravidade à linha de água e posição da massa móvel associada ao PTO. Estes dados foram depois introduzidos no modelo AQWA.

4.2. Geometria da plataforma flutuante

Das quatro condições testadas por Clemente (2015), apenas foi reproduzida a configuração (d), uma vez que para essa condição os valores apresentados para as inércias e para o período natural de oscilação da estrutura são mais próximos dos calculados neste trabalho.

No modelo numérico foram utilizados os valores calculados para as massas, as inércias e os raios de giração do conjunto semicírculo, sistema PTO e pesos de lastro, assim como as dimensões dos diversos componentes do sistema (por exemplo, a calha metálica sobre a qual desliza a componente móvel do PTO a altura da calha ao convés da plataforma).

Uma vez que o estudo experimental foi realizado à escala geométrica 1:40, optou-se por usar também essa escala no modelo numérico, Figura 5.

A geometria do problema em análise é definida no módulo *Design Modeler*, que permite descrever a geométrica de um ou mais corpos, flutuantes e/ou fixos, utilizando diversas ferramentas de desenho. É importante ter a noção da escala e das unidades envolvidas no projeto.

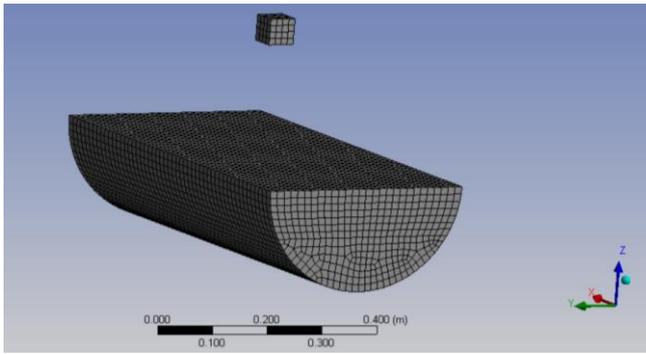


Figura 5. Modelação numérica do dispositivo usando o AQWA.

4.3. Profundidade de água

A profundidade de água, d , tem influência na dinâmica do dispositivo em estudo, pois afeta vários parâmetros, sendo os mais importantes os coeficientes de massa adicionada e de amortecimento que determinam a resposta de um corpo flutuante à ação da agitação marítima e, conseqüentemente, a potência que se pode extrair através do PTO, como o que está em estudo neste trabalho.

Nos testes numéricos iniciais foi usada a profundidade de água de 0.60 m, à escala do modelo físico, em correspondência com a profundidade de água usada no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da SHRHA da FEUP. Neste trabalho é analisada a influência de d nos coeficientes hidrodinâmicos.

A Figura 6 apresenta os coeficientes de massa adicionada e de amortecimento associados às oscilações de balanço (a_{44} e b_{44} , respetivamente), para três profundidades de água.

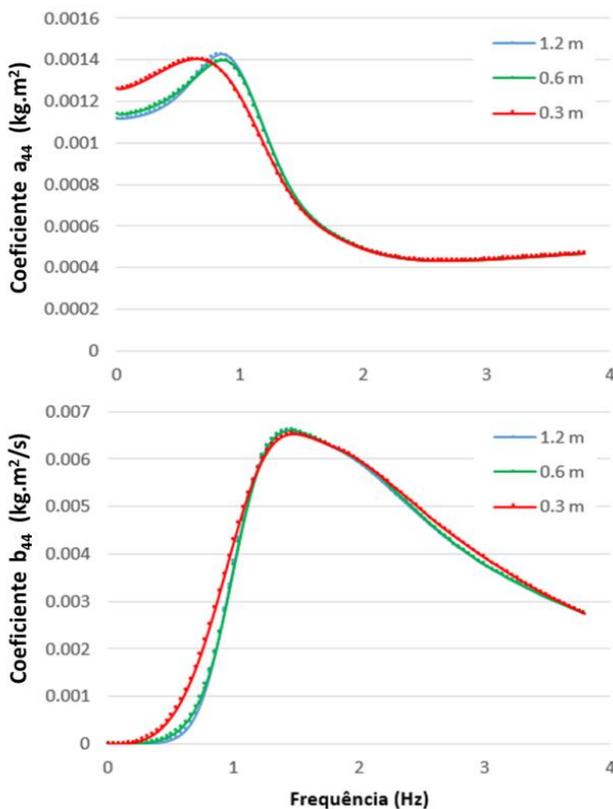


Figura 6. Coeficientes hidrodinâmicos para três profundidades de água distintas.

Os coeficientes de massa adicionada e de amortecimento são bastante próximos para as profundidades de 1.2 m e 0.6 m, sendo que a maior diferença se verifica para a profundidade de 0.3 m, Figura 6.

Estes resultados estão de acordo com o expectável, isto é, apenas há diferenças significativas nos coeficientes referidos quando a profundidade de água local e a folga sobre a quilha da plataforma são pequenas.

É de esperar que para profundidades de água maiores estes coeficientes hidrodinâmicos se aproximem dos valores teóricos para profundidades infinitas, uma vez que à medida que a profundidade aumenta menor é a sua influência nos coeficientes de amortecimento e de massa adicionada.

4.4. Definição da dimensão da malha

A definição da malha é um aspeto muito importantes pois influi na precisão com que os coeficientes hidrodinâmicos são determinados e, conseqüentemente, dos resultados da análise a realizar posteriormente no domínio do tempo.

Teoricamente, o ideal seria definir uma malha tão pequena quanto possível, de modo a obterem-se resultados próximos da realidade. No entanto, um aumento do refinamento da malha implica maiores requisitos em termos de capacidade de processamento. Por outro lado, a partir de um certo nível de refinamento, as diferenças nos coeficientes hidrodinâmicos são residuais.

A definição da dimensão da malha trata-se, portanto, de uma decisão que tem que ter em conta dois critérios: ou se opta por ter maior precisão nos resultados sobrecarregando mais o computador ou, em alternativa, os cálculos decorrem mais rapidamente, porém os resultados apresentam menor precisão. Neste problema, o importante é obter uma solução de compromisso entre rapidez de cálculo e precisão, e ter depois em consideração as conseqüências desta decisão na análise dos resultados finais. No estudo foram utilizadas três diferentes dimensões de malha: pequena, intermédia e grande.

O Quadro 1 apresenta a dimensão máxima dos painéis, a tolerância na criação da malha e o tempo de cálculo dos coeficientes hidrodinâmicos (módulo *Hydrodynamic Diffraction*), relativo à duração total do cálculo computacional considerando o número máximo de frequências que o AQWA permite, que são 100.

Quadro 1. Características das malhas testadas.

Malha	Dimensão máxima (m)	Tolerância (m)	Duração do cálculo (h)
pequena	0.0125	0.00625	14h00min
intermédia	0.0250	0.01250	03h30min
grande	0.0500	0.02500	00h30min

Os coeficientes hidrodinâmicos obtidos para as diferentes malhas, em função da frequência, estão representados na Figura 7. No presente estudo optou-se por trabalhar com a dimensão da malha intermédia.

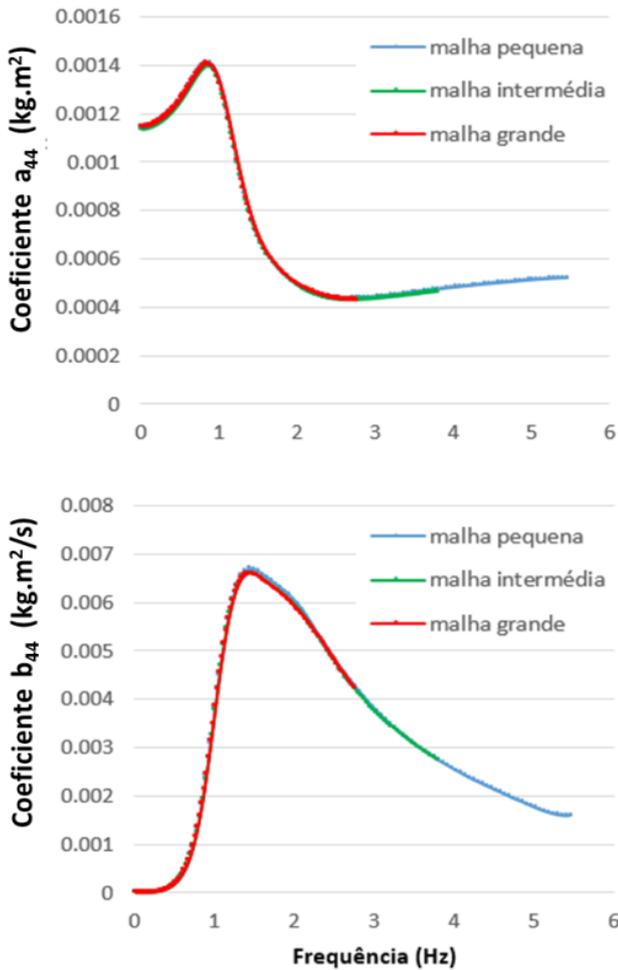


Figura 7. Coeficientes hidrodinâmicos para diferentes dimensões da malha usada no AQWA

De salientar que a dimensão da malha tem influência, não apenas no tempo de simulação, mas também no intervalo de frequências para o qual os coeficientes hidrodinâmicos são calculados, tal como mostra a Figura 7. Isto é, quanto mais refinada é a malha, maior é a frequência máxima que pode ser considerada.

Ainda que neste trabalho os testes sejam realizados apenas com ondas regulares, é importante ter em atenção que o sistema de extração de energia implementado na plataforma flutuante torna a resposta significativamente irregular. Isto justifica, portanto, o cálculo dos coeficientes hidrodinâmicos para uma ampla gama de frequências e não apenas para uma frequência única.

4.5. Frequências da análise hidrodinâmica

As frequências consideradas na análise dos problemas da difração e da radiação, ou seja, para calcular os coeficientes hidrodinâmicos (*i.e.*, coeficientes de massa adicionada e de amortecimento) estavam igualmente espaçadas entre um valor mínimo, condicionado pela profundidade de água, e um valor máximo, determinado pela dimensão máxima da malha.

Quanto mais elevado for o número de frequências intermédias considerado, mais bem definida ficará a curva que traduz a variação dos coeficientes hidrodinâmicos com a frequência, o que é favorável em termos de qualidade dos resultados, mas maior será o tempo de processamento.

A Figura 8 ilustra os coeficientes de massa adicionada e de amortecimento para diferentes números de frequências calculadas. Pode verificar-se que para 40 ou 100 frequências os resultados obtidos são idênticos, pelo que é aceitável usar apenas as 40 frequências e reduzir, dessa forma, o tempo de processamento. De qualquer forma, nos testes executados com ondas regulares e irregulares, já no domínio do tempo, foi usado o número máximo de frequências possível (100), visto que o cálculo dos coeficientes hidrodinâmicos, embora demorado, é feito apenas uma vez para cada configuração do dispositivo em estudo.

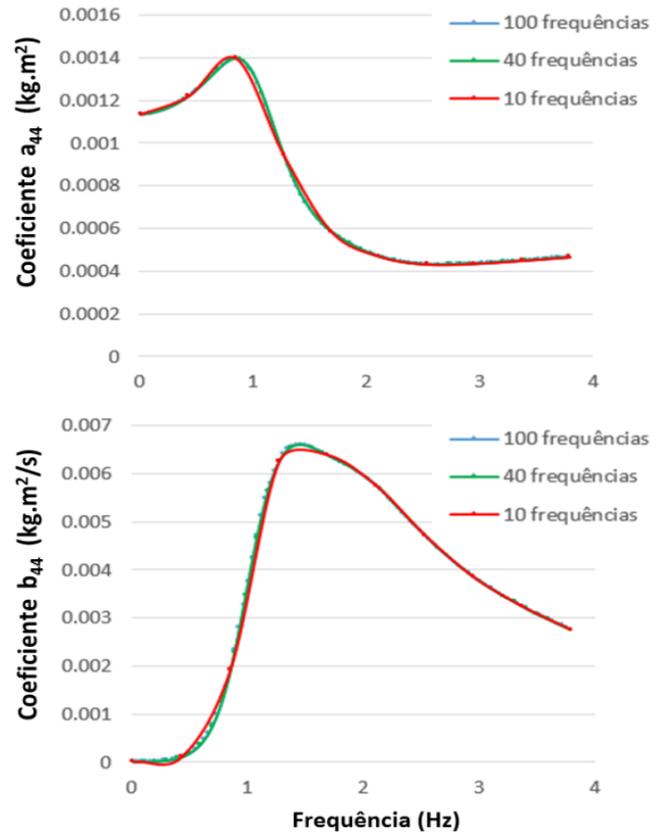


Figura 8. Coeficientes hidrodinâmicos para diferentes números de frequências intermédias calculadas.

4.6. Amarração da plataforma flutuante

No estudo experimental, para evitar a deriva da plataforma flutuante, foram utilizados cabos de amarração, colocados de modo a minimizar qualquer possível influência destes no modo de oscilação de balanço.

Este sistema de amarração foi também reproduzido no modelo numérico, utilizando dois cabos de amarração rígidos, ao nível da linha de água, um à popa e o outro à proa, alinhados com o eixo longitudinal de simetria da plataforma flutuante, e ligando-a a dois pontos de amarração fixos que representavam o ponto de ligação às barras verticais utilizadas no estudo experimental.

A Figura 9 apresenta o dispositivo estudado, sendo possível identificar a plataforma flutuante semicilíndrica (1), os cabos de amarração (2), a massa móvel (3) e as defensas (4) utilizadas para limitar os movimento de rotação da massa móvel, de forma que a amplitude desses movimentos não ultrapasse o comprimento total da calha utilizada nos testes experimentais.

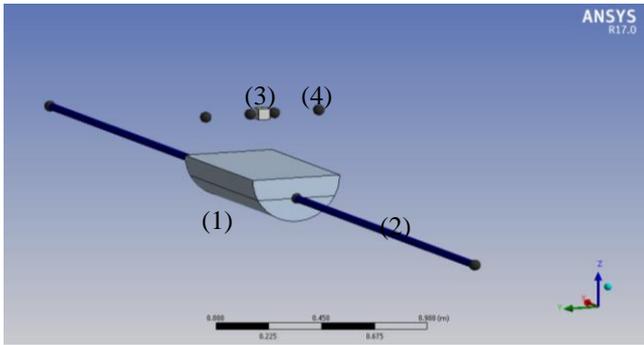


Figura 9. Representação do PTO e do sistema de amarração.

Uma vez que os cabos usados em laboratório apresentavam uma rigidez muito elevada, foi adotado no modelo numérico um valor para o coeficiente de rigidez do cabo também elevado. Como a distância entre as barras fixas verticais e a plataforma era de 2.00 m, definiu-se um cabo de amarração com 2.03 m de comprimento, sendo a folga de 0.03 m (estimada) considerada de forma a que a plataforma flutuante se possa movimentar, dentro de certos limites, e em concordância com o que foi observado em laboratório. Importa referir que não estava disponível toda a informação necessária à completa reprodução dos testes experimentais.

4.7. Reprodução do sistema de extração de energia

Um dos obstáculos que teve de ser ultrapassado, foi o de reproduzir, com o maior rigor possível, o movimento das componentes móveis do sistema de extração de energia (PTO), tal como foi reproduzido no modelo físico, uma vez que não existe no AQWA qualquer tipo de funcionalidade que permita representar sistemas de extração de energia. Para contornar a situação, foi tomada a decisão de representar o movimento que seria linear através de uma rotação de um corpo (parte integrante do PTO) em torno de uma rótula fictícia, situada a uma altura de 25 m relativamente ao referencial xyz , para que o arco descrito pelo movimento do corpo se aproxime de uma reta com o comprimento da calha. Duas defensas de rigidez elevada foram usadas para representar os limites físicos da calha utilizada no estudo experimental, Figura 9.

A rótula está ligada rigidamente à plataforma flutuante e à massa móvel, tendo massa desprezável, tal como as ligações referidas. De realçar que as dimensões em planta do modelo da plataforma flutuante utilizada são $0.75 \times 0.40 \text{ m}^2$. Quanto menor for o valor da altura da rótula maior será o erro associado à representação. Para os 25 m de altura utilizados, o erro é de cerca de 0.001352 m, o que representa 0.26% do comprimento da calha, sendo por isso um valor considerado aceitável.

5. Resultados

5.1. Estimativa da potência absorvida

Uma vez que o dispositivo em estudo está projetado para absorver a energia associada às oscilações de balanço da plataforma e tendo em atenção a representação do PTO no AQWA, recorreu-se à expressão seguinte para determinar a potência absorvida a partir dos resultados numéricos,

$$P = M \omega \quad [2]$$

em que, P representa a potência absorvida, M o momento aplicado na rótula fictícia usada para reproduzir o sistema de extração de energia, e ω a velocidade angular da massa móvel.

É importante salientar que a resposta do sistema em estudo não é regular no tempo mesmo para ondas regulares. Antes pelo contrário, na maior parte dos testes, verificou-se que apenas após os primeiros 10 s, aproximadamente, a resposta do sistema atingia uma situação de equilíbrio dinâmico, tal como mostra a Figura 10. Por esse motivo, os resultados numéricos obtidos nesse intervalo de tempo inicial foram negligenciados.

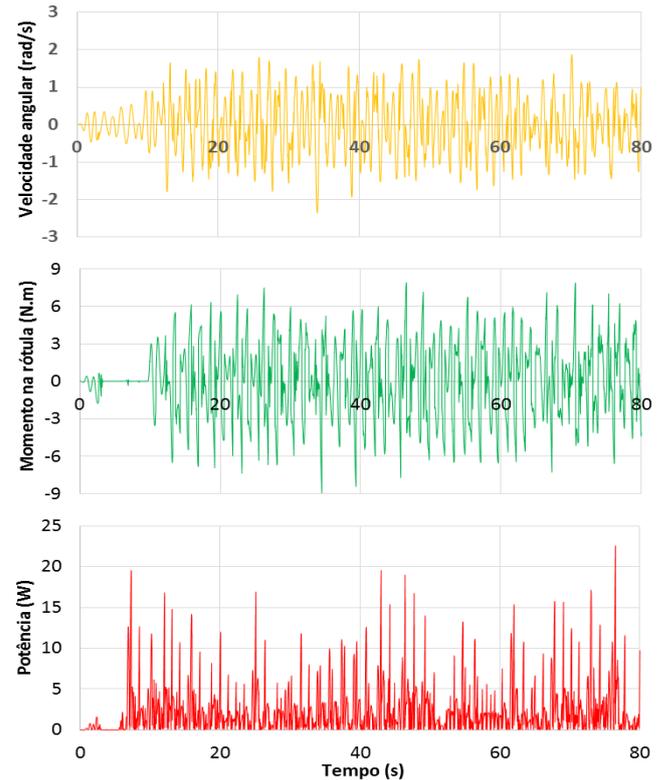


Figura 10. Séries temporais de velocidade angular dos componentes móveis do PTO (superior), momento resistente na rótula (meio) e potência instantânea absorvida (inferior), que incluem a fase inicial que precede o estabelecimento da situação de equilíbrio dinâmico, num teste realizado para uma altura de onda 0.5 m, um período de onda 8 s e um ângulo de incidência de 90° . Plataforma com os seus movimentos restringidos, à exceção do balanço.

5.2. Validação qualitativa dos resultados

Como nem toda a informação necessária à reprodução das condições estudadas no modelo físico estava disponível, a validação dos resultados numéricos é apenas qualitativa. A título de exemplo, nesta secção analisam-se os resultados do teste experimental 83 (configuração d) realizado com ondas regulares com uma altura de onda de 0.05 m, um período de onda de 1.107 s e um ângulo de incidência igual a 90° . A distância vertical entre o PTO e o convés era igual a 0.51 m, sendo que neste caso não existia massa adicional acoplada.

A primeira fase da validação consistiu em comparar a ordem de grandeza dos movimentos da plataforma flutuante nos 6 graus de liberdade, no modelo físico e no modelo numérico, para verificar se o sistema em estudo foi bem reproduzido no modelo numérico. Os resultados obtidos para o teste 83 são apresentados na Figura 11 e na Figura 12.

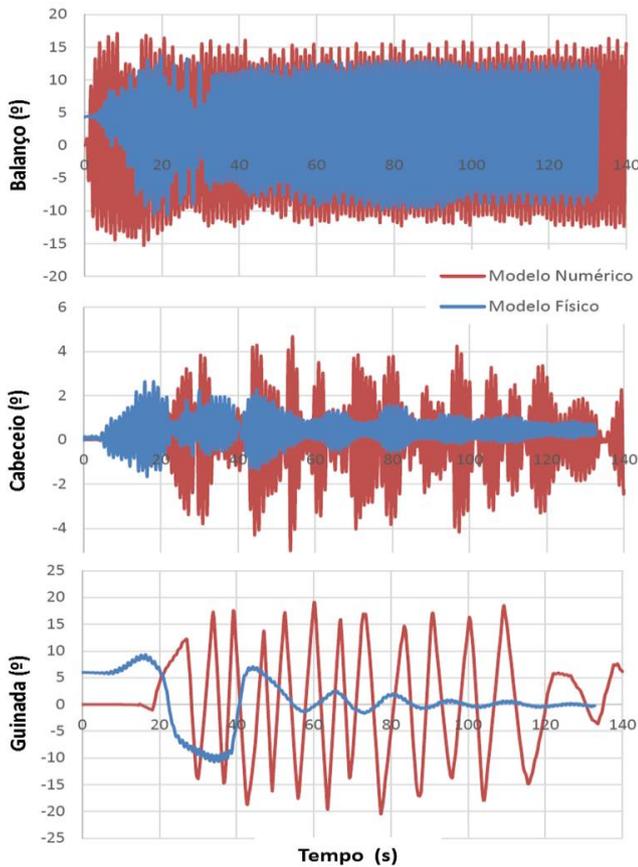


Figura 11. Comparação das séries temporais dos movimentos de rotação no modelo físico e no modelo numérico.

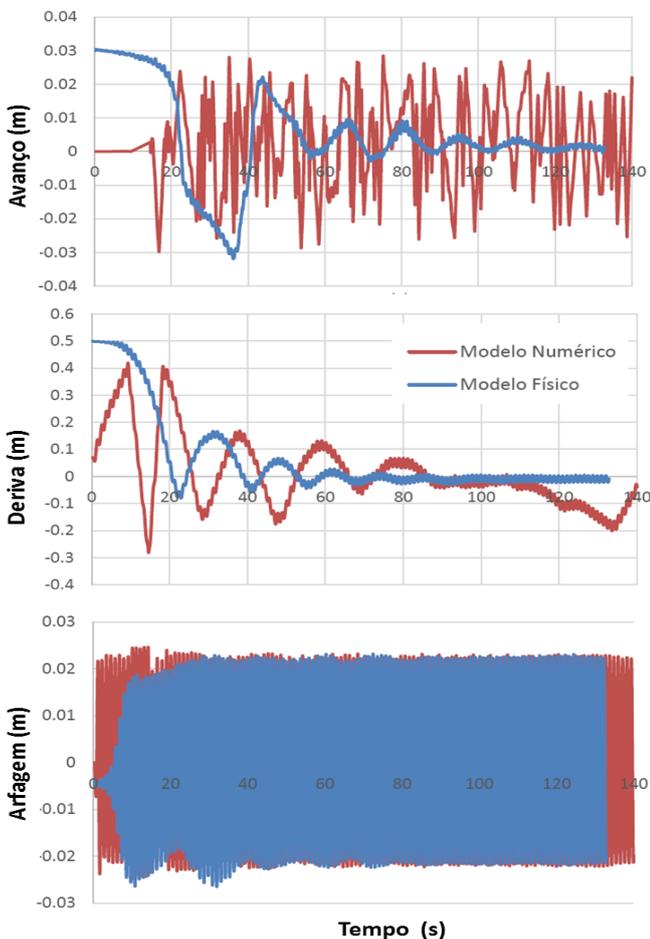


Figura 12. Comparação das séries temporais dos movimentos de translação no modelo físico e no modelo numérico.

Existem algumas diferenças importantes entre os resultados numéricos e experimentais para o modo de avanço, deriva, cabeceio e guinada, que, em parte, poderão ser justificadas, pela dificuldade em representar o sistema de amarração ou o próprio sistema de extração de energia (PTO) utilizados no trabalho laboratorial. No entanto, a ordem de grandeza da amplitude das oscilações é semelhante. As oscilações de arfagem e balanço estimadas numericamente aproximam-se bastante dos resultados experimentais.

No caso da deriva (deslocamento segundo o eixo dos yy) a proximidade entre os valores numéricos e os experimentais, é justificada pelo facto de a folga dos cabos de amarração ter sido bem estimada.

A amplitude da oscilação de arfagem não poderia ser muito diferente pois é bastante influenciada, e até se pode dizer que acompanha, a elevação da superfície livre da água associada às ondas incidentes.

O balanço era a única oscilação que podia ser calibrada alterando o valor do amortecimento associado ao PTO, assim sendo, foi possível obter resultados da mesma ordem de grandeza, através de um processo iterativo no qual se foi ajustando o valor desse amortecimento.

Por último, falta verificar se o valor da potência instantânea é concordante. No presente estudo considerou-se um valor para o amortecimento associado ao PTO que inclui todas as suas componentes, ou seja, a resistência ao movimento que é imposta no PTO o atrito entre superfícies, as perdas no sistema de extração, entre outros. A Figura 13 apresenta a comparação entre a série temporal da potência instantânea obtida com o modelo numérico e a que resulta do estudo em modelo físico.

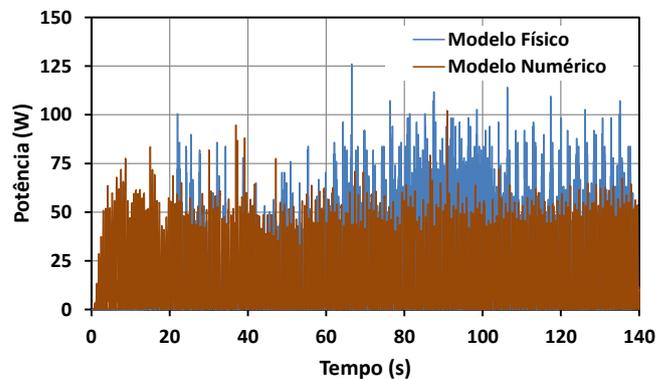


Figura 13. Comparação da série temporal da potência instantânea obtidas no modelo físico e no modelo numérico.

É possível constatar que existem diferenças, porém, pode referir-se que os valores obtidos são da mesma ordem de grandeza. Para além disso, a potência média para o modelo físico é de cerca de 18.2 W e para o modelo numérico de 23.1 W. Tendo em atenção as condições em que as simulações numéricas foram realizadas pode dizer-se que os resultados obtidos são satisfatórios e que o modelo utilizado permite simular numericamente a dinâmica do sistema de extração de energia em estudo.

5.3. Influência das características da agitação marítima

A influência de algumas variáveis no desempenho (*i.e.*, potência absorvida) do dispositivo de produção de energia a

partir do movimento de plataformas flutuantes *offshore* foi também objetivo deste trabalho.

Embora numa aplicação real as características das ondas incidentes no dispositivo sejam variáveis e não se possam controlar, é importante analisar de que forma varia o seu desempenho para diferentes alturas de onda. Desta forma será possível identificar quais as condições de agitação que se traduzem num melhor desempenho do dispositivo e, consequentemente, os melhores locais para a sua instalação. Ou fixada essa localização determinar quais as alterações a implementar no dispositivo por forma a aumentar a sua eficiência de acordo com as condições locais.

Nos testes numéricos foi utilizada uma gama de alturas de onda regulares entre 0.0125 e 0.1250 m (i.e., entre 0.5 e 5.0 m no protótipo). A análise da influência desta variável é feita mantendo todas as restantes variáveis do problema fixas, i.e., fazendo variar só as alturas de onda para os diferentes períodos de onda. O ângulo de incidência das ondas foi de 90° e o PTO encontrava-se a 0.51 m do convés da plataforma flutuante.

Na Figura 14 apresentam-se as potências médias obtidas para as várias alturas e períodos de ondas, à escala do modelo físico (1:40).

Numa primeira análise conclui-se que quanto maior a altura de onda incidente no modelo, maior a amplitude das suas oscilações e, consequentemente, maior a potência extraída desse movimento.

As plataformas flutuantes amarradas apresentam períodos naturais de oscilação que podem ser excitados pelas ondas incidentes. Assim, para um dado período de onda próximo de um desses períodos naturais, podem ocorrer fenômenos de ressonância que resultam na amplificação das oscilações da estrutura, situação que no presente estudo é uma mais-valia, pois o objetivo é extrair a maior potência possível das oscilações da plataforma flutuante.

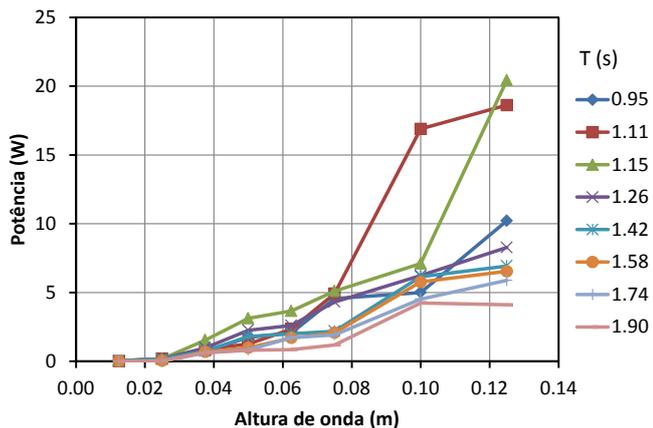


Figura 14. Potência média absorvida em função da altura de onda para diferentes períodos (valores à escala do modelo físico).

Os cálculos preliminares permitiram estimar que o período natural de oscilação da plataforma flutuante em estudo seria de aproximadamente 1.15 s (7.30 s no protótipo).

Na Figura 15 apresenta-se a variação da potência média absorvida em função do período de onda, para simulações realizadas com ondas regulares.

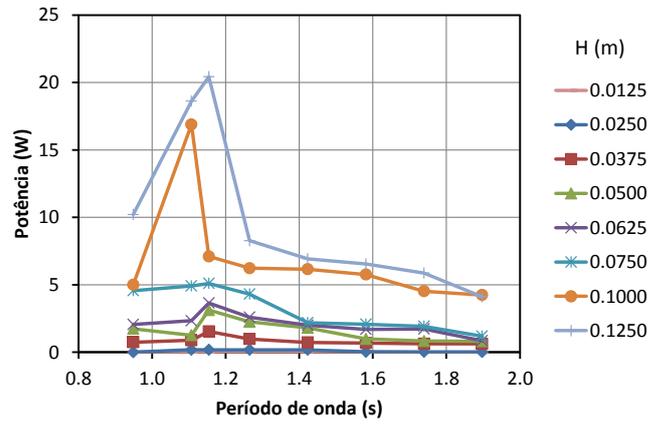


Figura 15. Potência média absorvida em função do período de onda para diferentes alturas de onda (valores à escala do modelo físico).

Através da análise da Figura 15 é possível concluir que, de facto, os valores máximos das potências absorvidas ocorrem em períodos próximos do período natural da oscilação de balanço, ou seja, próximo dos 1.15 s, comprovando o que foi anteriormente referido. Porém, para algumas condições de teste (i.e., alturas de onda), os valores máximos da potência ocorrem para valores ligeiramente diferentes desse período natural. Isto poderá dever-se, eventualmente, ao facto de a análise que é realizada com o modelo numérico não estar a ser feita à plataforma flutuante isoladamente, mas sim ao conjunto da plataforma flutuante, massa móvel e cabos de amarrações que, naturalmente, afetam o período natural de oscilação, o qual, muito provavelmente, deixa de coincidir com o valor calculado anteriormente.

De salientar também que os picos nas curvas da potência média absorvida são tanto mais evidentes quanto maior é a altura de onda que incide na plataforma.

6. Considerações Finais e Conclusões

Neste trabalho foi realizado o estudo numérico de um novo dispositivo que converte a energia das oscilações de balanço de plataformas flutuantes em eletricidade. O sistema de extração de energia e todas as componentes sensíveis, estão alojados no interior do casco da plataforma, protegidos do agressivo ambiente marítimo. Neste estudo foi utilizado o pacote numérico ANSYS *Offshore/Marine*, AQWA, depois de validado qualitativamente com resultados experimentais obtidos num estudo em modelo físico realizado no tanque de ondas da SHRHA do DEC da FEUP (Clemente, 2015).

O ANSYS® AQWA™ permitiu simular o comportamento do sistema de aproveitamento da energia das ondas, assim como analisar o seu desempenho para diferentes condições de agitação marítima. Os resultados obtidos mostram que a resposta da plataforma flutuante, mesmo quando sujeita à ação de ondas regulares, é, regra geral, irregular.

O trabalho permitiu concluir que o sistema de extração de energia em estudo é muito influenciado pelas características da agitação marítima, nomeadamente pelo período de onda. Verificou-se, como era de esperar, que a potência absorvida pelo dispositivo era maior para períodos de onda próximos do seu período natural de oscilação e que, a um aumento de altura de onda incidente, corresponde também um aumento dos valores da potência média absorvida.

O estudo permitiu ainda identificar toda a informação que será necessária registar num futuro estudo experimental, de a forma a ser possível reproduzir com maior rigor as condições testadas em modelo físico no modelo numérico. Este trabalho representa uma etapa importante no processo de desenvolvimento de uma nova tecnologia para explorar a energia renovável do oceano, abrindo assim o caminho a futuros desenvolvimentos.

Referências

- ANSYS, 2016. ANSYS AQWA. ANSYS, Ltd., Canonsburg, 17 ed. PA, USA.
- Bracco, G., Giorcelli, E., Mattiazzo, G., 2011. *ISWEC: A gyroscopic mechanism for wave power exploitation. Mechanism and machine theory.* 46(10):1411-24.
- Braga, G., 2016. *Desenvolvimento de tecnologia para produção de energia a partir do movimento de plataformas flutuantes offshore multifuncionais.* Tese de Mestrado MIEC, FEUP, Portugal.
- Bosma, B., Sheng, W., Thiebaut, F., 2014. *Performance Assessment of a Floating Power System for the Galway Bay Wave Energy Test Site.* Proc. of International Conference on Ocean Energy (ICOE), Halifax, Canada.
- Bosma, B., Lewis, T., Brekken, T., von Jouanne, A., 2015. *Wave Tank Testing and Model Validation of an Autonomous Wave Energy Converter.* Energies. 8:8857-72.
- Clemente, D., 2015. *Energy production from the motions of offshore platforms.* Tese de Mestrado MIEC. FEUP, Portugal.
- Clemente, D.; Rosa-Santos, P.; Taveira-Pinto, F.; Martins, P. T.; Mendonça, H.; Moreira, A. P.; 2016. *Produção de energia a partir dos movimentos de plataformas flutuantes offshore,* Atas das 10^{as} Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente (ed. F. Taveira-Pinto), FEUP, Portugal, pp.12-22, ISBN: 978-989-99439-1-9.
- Cummins W., 1962. *The impulse response function and ship motions.* The David Taylor Model Basin, Washington DC, USA.
- López, M., Taveira-Pinto, F., Rosa-Santos, P., 2017. *Numerical modelling of the CECO wave energy converter*. Renewable Energy, V.113, pp:202-210, ISSN: 0960-1481 doi:10.1016/j.renene.2017.05.066.
- Martins, 2013. *Sistema de produção da energia elétrica a partir do movimento de plataformas flutuantes, por ação das ondas e do vento.*
- McCabe, A., Aggidis, G., Widden, M., 2010. *Optimizing the shape of a surge-and-pitch wave energy collector using a genetic algorithm.* Renewable Energy. 35(12):2767-75.
- Pastor J, Liu Y., 2014. *Power absorption modeling and optimization of a point absorbing wave energy converter using numerical method.* Journal of Energy Resources Technology, 136:021207.