

97

Plataforma monocoluna geradora de energia limpa

Monocolumn platform generator of clean energy

Plataforma monocoluna generadora de energía limpia

Daniel Prata Vieira Ana Luisa de Barros Orsolini André Luis Condino Fujarra

Resumo

A procura por fontes renováveis de energia é um assunto que está em grande discussão hoje em dia. Produzir energia sem prejudicar o ambiente é obter mais gualidade de vida e maior oferta de recursos básicos ao mundo. Os mares e oceanos possuem uma quantidade praticamente inesgotável de energia, disponível na forma de vento, correnteza, marés e ondas. Para a absorção da energia advinda das ondas, foi proposto um sistema que consiste em uma plataforma do tipo monocoluna com um cilindro localizado em seu moonpool. A incidência de ondas nestas unidades faz com que cada unidade responda com movimentos diferentes. Esta diferenca é responsável por criar um movimento relativo entre as unidades, utilizado com o intuito de gerar energia por meio da atuação em um mecanismo hidráulico conectado através de turbinas a um gerador de eletricidade. Para o estudo da geração de energia, foi proposto um modelo computacional capaz de auxiliar nas fases iniciais do projeto, no qual é necessário definir, por exemplo, o dimensionamento das unidades, equipamentos e subsistemas. O modelo computacional do funcionamento do sistema foi desenvolvido em ambiente Matlab® e utilizou, como base para compor o equacionamento dinâmico do sistema, coeficientes obtidos com o código Wamit[®]. Neste modelo foi inserido o efeito da ancoragem e posteriormente o efeito do sistema hidráulico sobre o movimento das unidades. A partir deste modelo, foram projetados: a geometria das unidades, o sistema de amarração, o sistema hidráulico de conversão de energia, além de subsistemas como o conjunto de baterias responsável por armazenar parte da energia. O trabalho concluiu a etapa inicial de detalhamento do projeto de um sistema capaz de absorver energia das ondas, apresentando resultados positivos, que apontam a eficiência do uso desta fonte de energia.

palavras-chave: ■ energia limpa ■ plataforma monocoluna ■ energia das ondas.

Abstract

The search for renewable energy sources is the subject of much discussion nowadays. Producing energy without causing damage to the environment is to improve welfare by offering more basic resources to the world. The seas and

oceans store a virtually inexhaustible amount of energy, which is available in the form of wind, currents, tides and waves. A system has been proposed to absorb the energy originated by waves. It consists of a platform of the monocolumn variety, having a cylinder in its *moonpool*. The incidence of waves upon these unities causes each unity to respond with different motions. This difference is responsible for the creation of a relative motion among the unities, which is used in order to generate energy through the operation of a hydraulic mechanism connect by turbines to a power generator. A computational model has been proposed to study this energy production, one that can be of help during the initial stages of the project, when it is necessary to define, as for instance, the dimensions of the unities, equipment and subsystems. This computational model for the system was developed in the Matlab® environment, using coefficients obtained with the Wamit® code to compose the dynamic equations of the system. The mechanical anchoring was first inserted in this model, then the hydraulic system effect on the movements of the unities. From this model were projected: the geometry of the unities, the mooring system and the hydraulic system for energy conversion, besides subsystems such as the set of batteries responsible for storing part of the energy. This work concluded the initial phase of detailing the project for a system capable of absorbing energy from the waves and it produced positive results, indicating the efficiency of using this energy source.

keywords: ■ clean energy ■ monocolumn platform ■ energy from waves.

Resumen

La búsqueda procura por fuentes renovables de energía es una tema que está en gran discusión actualmente. Producir energía sin perjudicar el ambiente es obtener más calidad de vida y mayor oferta de recursos básicos al mundo. Los mares y océanos poseen una cantidad prácticamente inagotable de energía, disponible en la forma de viento, correntía, mareas y olas. Para la absorción del energía proveniente de las olas, fue propuesto un sistema que consiste en una plataforma del tipo monocoluna con un cilindro localizado en su moonpool. La incidencia de olas en estas unidades haz con que cada unidad realice movimientos distintos. Esta diferencia es responsable por crear un movimiento relativo entre las unidades, utilizado como manera de generar energía por medio de la actuación en un mecanismo hidráulico conectado a través de turbinas a un generador de electricidad. Para el estudio de la generación de energía, fue propuesto un modelo computacional capaz de auxiliar en las fases iniciales del proyecto, donde es necesario definir, por ejemplo, la dimensión de las unidades, equipamientos y subsistemas. El modelo computacional de funcionamiento del sistema fue desarrollado en ambiente Matlab® y utilizó, como base para componer la ecuación dinámica del sistema, coeficientes obtenidos con el código Wamit[®]. En este modelo fue inserido el efecto del ancoraje y posteriormente el efecto del sistema hidráulico sobre el movimiento de las unidades. A partir de este modelo, fueron proyectados: la geometría de las unidades, el sistema de amarras, el sistema hidráulico de conversión de energía, además de subsistemas como el conjunto de baterías responsable por almacenar parte de la energía. El trabajo concluyó la etapa inicial de detalles del proyecto de un sistema capaz de sorber energía de las olas, presentando resultados positivos, que apuntan la eficiencia del uso de esta fuente de energía.

Palabras-clave: energía limpia plataforma monocoluna energía de las olas.



Introdução

Produzir energia sem prejudicar o ambiente é obter mais qualidade de vida e maior oferta de recursos básicos ao mundo. Os mares e oceanos possuem uma quantidade praticamente inesgotável de energia, disponível na forma de vento, correnteza, marés e ondas, e o Brasil tem cerca de 3,5 milhões de metros quadrados de mar territorial (Souza, 1999), ou seja, uma vasta área para exploração desse tipo de energia.

Para aproveitar esse grande potencial brasileiro, o presente trabalho propõe o projeto de uma unidade flutuante que capta a energia das ondas do mar, transformando-a em energia elétrica por meio do acionamento de um sistema hidráulico. Atualmente, existem alguns projetos que exploram a ideia de sistemas semelhantes, os descritos em Henderson (2006) e Beatty *et al.* (2010). No entanto, o presente projeto utiliza uma ideia nova, inteiramente concebida no Brasil, que é o uso de uma plataforma do tipo monocoluna, que consiste em uma larga coluna com um *moonpool* em seu interior, que aumenta sua estabilidade e segurança.

O sistema é composto pela monocoluna e um cilindro localizado neste *moonpool*, como pode ser visto na figura 1. O fato de o movimento destas duas unidades responder diferentemente à incidência de ondas provoca um movimento relativo, que será aproveitado para a geração de energia.



No interior da monocoluna ficam localizados oito sistemas hidráulicos reproduzidos radialmente e acionados diretamente por esses movimentos relativos. Cada sistema hidráulico é composto por um conjunto de pistões, um acumulador, um reservatório e uma turbina geradora, além das tubulações e válvulas necessárias ao seu funcionamento e de baterias para armazenagem da energia gerada.

As aplicações do sistema poderiam ser diversas: a energia gerada por ele poderia ser transmitida por meio de cabos submarinos à terra, para abastecer uma comunidade, ou então a outras plataformas oceânicas de exploração de petróleo, para complementar a demanda de energia destas unidades. Em todo caso, este projeto pode ser o passo inicial para propostas ainda maiores, como um centro de distribuição de pessoal e equipamentos *(hub)* ou uma plataforma oceânica autossustentável.

Os tópicos seguintes apresentam o projeto inicial desta unidade através de modelos e simulações computacionais que abordam os diferentes subsistemas que devem ser projetados para funcionar em harmonia e alcançar o objetivo final do trabalho: a geração de energia.

Fundamentação teórica

Os modelos físicos e matemáticos, desenvolvidos com o objetivo de analisar a viabilidade do projeto proposto, são apresentados a seguir. O modelo físico pretende identificar todas as forças de restauração e amortecimento aplicadas sobre os dois corpos, e os modelos numéricos, apresentam as teorias utilizadas para a modelagem do sistema ancorado, sua análise em mares reais e previsão de sua capacidade de geração de energia. Para encaminhar estes estudos iniciais, foi empregada a teoria linear de ondas (Newman, 1977).

Modelo físico

Como descrito anteriormente, a capacidade de geração de energia da unidade depende principalmente do movimento em *heave* de seus componentes. Sendo assim, apenas este grau de liberdade foi analisado, de forma a projetar os sistemas hidráulicos, dimensionar o tamanho da unidade e analisar sua viabilidade.

Conforme mostrado na figura 2, primeiramente foram identificadas as forças de restauração hidrostática e de amarração, as forças de excitação de ondas, os amortecimentos viscosos, potenciais e de fricção em cada um dos componentes.



Em seguida, os termos foram arranjados de acordo com a Segunda Lei de Newton na forma do sistema apresentado na equação 1:

$$\begin{cases} (M_1 + Ma_1) \cdot \ddot{x}_1 = Fw_1 - K_1 \cdot x_1 - (Bpot_1 + Bvisc_1) \cdot \dot{x}_1 - B(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \\ (M_2 + Ma_2) \cdot \ddot{x}_2 = Fw_2 - K_2 \cdot x_2 - (Bpot_2 + Bvisc_2) \cdot \dot{x}_2 - B(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \end{cases}$$
(1)

A este sistema devem ser adicionadas as forças devidas ao sistema de ancoragem, o qual é responsável por evitar que a plataforma fique à deriva no mar.

Análise do sistema ancorado

Analisar o tipo de amarração a ser empregado no sistema era uma tarefa fundamental, pois, alterando os períodos naturais de oscilação em *heave* dos componentes, as amarras poderiam modificar profundamente os movimentos relativos entre ambos. Para indicar o tipo de amarração mais adequado (linhas em catenária, *tension-leg* ou *tautleg*), elaborou-se um equacionamento capaz de determinar, para cada configuração, quais seriam as restaurações adicionadas ao sistema em função das características dos materiais das linhas.

Procurou-se encontrar forças de restauração lineares em relação ao movimento de *heave* (x_i) de cada corpo ($F_i = K_{ext_i}x_i$), para que os coeficientes de rigidez encontrados fossem então facilmente integrados ao sistema matricial de equações derivado do modelo físico (equação 1). Tais coeficientes podem ser escritos como função do número de linhas (n), da altura da lâmina d'água (LDA), do diâmetro (d) das linhas, de seu peso linear submerso (w), de seu módulo de elasticidade (EA), e de seu comprimento inicial (L_0), conforme mostrado nas equações 2, 3 e 4.

Por meio da teoria do comportamento linear dos materiais (Gere, 2003), no caso das configurações *taut-leg* e *tension-leg*, e por meio do equacionamento sobre a geometria de uma catenária (Amarante, 2010), foram elaboradas fórmulas linearizadas pelas séries de Taylor (Stewart, 2001) que permitem calcular a rigidez inserida no sistema. Para o caso de uma configuração *tension-leg*, a rigidez externa se escreve conforme a equação 2; para uma configuração *taut-leg*, conforme a equação 3; e, finalmente, para uma configuração em catenária, conforme a equação 4:

$$K_{ext}(tension \, leg) = n \cdot \frac{EA}{L_0} \tag{2}$$

$$K_{ext}(taut \ leg) = n. \ EA.\left(\frac{1}{L_0} - \frac{1}{L_{0f}} + \frac{LDA^2}{L_{0f}^3}\right)$$
(3)

 $K_{ext}(catenária) =$

$$= n.\left\{\sqrt{1 - \frac{1}{\left(\frac{wLDA}{H_0} + 1\right)^2}} \cdot (a + w) + (wLDA + H_0) \quad (4)\right\}$$
$$\left(\frac{wLDA}{H_0} + 1\right)^{-3} \left(\frac{w}{H_0} - \frac{awLDA}{H_0^2}\right) \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{wLDA}{H_0} + 1\right)^2}\right]^{-1/2}\right\}$$

Os casos das amarrações *tension* e *taut-leg* foram obtidos calculando-se a deformação elástica imposta nas

linhas para um dado movimento de *heave*. As deformações elásticas possibilitam o cálculo da variação de tensão nas linhas, que, por sua vez, permitem o cálculo da força de restauração e de seu respectivo coeficiente.

O caso da amarração em catenária foi obtido calculando-se a variação no comprimento suspenso da catenária em função do movimento de *heave* da unidade. O equacionamento dependeu ainda da determinação do parâmetro (*a*) que aparece na equação 4, que representa a variação linear da tensão horizontal (H_0) na linha, de acordo com seu movimento de topo vertical. Este parâmetro foi equacionado a partir de comparações com um modelo de análise de elementos finitos feito com ajuda do código Dynasim®. Observou-se, então, que este parâmetro pode ser escrito em função do ângulo de topo da catenária, assim como do peso específico do material que a compõe, como mostra a equação 5.

$$a(\theta, w) = (0,0126, \theta^2 - 2,4041, \theta + 117,64) \cdot \frac{w}{5,401} [kN/m]$$
(5)

A comparação dos resultados oriundos das equações 2, 3 e 4 e de simulações com o código Dynasim® mostra que as equações preveem a rigidez ao movimento vertical de modo bastante fiel aos resultados encontrados pela análise de elementos finitos.

Análise em mares irregulares

Para uma análise realística desta unidade, deve-se simular a incidência de ondas que caracterizem uma condição real de mar. Este mar real, aqui denominado mar irregular, é tratado como um somatório de ondas regulares diferenciadas por seu comprimento e amplitude próprios.

Usando esta hipótese, é possível obter através de um código numérico os coeficientes hidrodinâmicos da equação 1 para cada onda regular e compor, através da função de memória, o comportamento deste sistema sob a incidência de várias ondas regulares somadas.

Um estado de mar é caracterizado espectro de energia em função da frequência dada por $S_{\zeta}(\omega)$. No domínio discreto, podemos escrever a elevação de um mar em função do tempo com *N* componentes de onda do seguinte modo (equação 6):

$$\zeta(t) = \sum_{n=1}^{N} A_n \cos(\omega_n t + \varepsilon_n)$$
(6)

Assim, dado um espectro de mar definido por um período natural e uma altura significativa, é possível obter as amplitudes A_n de cada uma das ondas regulares, conforme a equação 7:

$$A_n(\omega) = \sqrt{2 \cdot S_{\zeta}(\omega_n) \cdot \Delta\omega} \tag{7}$$

Resta então, para representar um mar real no domínio da frequência, obter as fases entre as componentes de onda ε_n . Faltinsen (1990) observou que, para representar tal mar irregular, basta gerar randomicamente tais fases, desde que essas fases aleatórias obedeçam a uma distribuição normal.

De posse das amplitudes de onda no domínio da frequência e das fases entre as componentes de onda, podemos escrever a força W(t) sobre o corpo flutuante como equação 8:

$$W(t) = \sum_{n=1}^{N} |X(\omega_n)| A_n \cos(\omega_n t + \varepsilon_n + \varepsilon_{Xn})$$
(8)

Nesta equação, $X(\omega_n)$ é a força de excitação para ondas de amplitude unitária que apresentam fase ε_{Xn} . Essa força de excitação para onda unitária é obtida pelo Wamit®.

Com relação à massa adicional e ao amortecimento potencial, devem ser feitas algumas observações. Primeiramente, a massa adicional deve ser considerada constante e tomada para frequência angular tendendo ao infinito, conforme a equação 9:

$$A = a(\omega \to \infty) \tag{9}$$

A parcela do amortecimento potencial deve ser calculada pela seguinte função de memória (equação 10):

$$F_{POT}(t) = \int_{0}^{\infty} B(\tau) \cdot \dot{x}(t-\tau) d\tau$$
(10)

Onde se obtém (equação 11):

$$B(\tau) = \frac{2}{\pi} \int_{0}^{\infty} b(\omega) \cdot \cos(\omega\tau) \, d\omega \tag{11}$$

Esta parcela de amortecimento potencial deve ser atualizada a cada time step da integração e deve estar do lado direito da equação do movimento, que fica da seguinte forma (equação 12):

$$(M + A) \cdot \ddot{x}(t) + C \cdot x(t) = W(t) - F_{POT}(t)$$
 (12)

A formulação acima é largamente utilizada por códigos de simulação numérica no domínio do tempo, como o Dynasim® e o Tanque de Provas Numérico®, e pode ser encontrada em Simos (2006).

Modelo numérico de geração de energia

Para obter uma estimativa da quantidade de energia gerada pelo sistema, foi desenvolvido um modelo no Simulink® (simulador dinâmico do Matlab®), utilizando-se seu toolbox Simscape®, que trabalha com a ideia da transmissão de sinais físicos, ou seja, forcas, deslocamentos, velocidade, fluxo, pressão, etc. Isto significa que não é preciso inserir nenhuma equação matemática, basta inserir blocos que representam os componentes físicos do sistema, como a massa, a mola, o amortecedor, o pistão hidráulico, o conversor hidráulicomecânico, e conectá-los de forma coerente. Estes sinais físicos podem ser monitorados por sensores de movimento, de fluxo ou de pressão que nada mais fazem que transformá-los em sinais numéricos, que podem ser visualizados na forma de gráficos. A figura 3 apresenta o diagrama de blocos desenvolvido para calcular a geração de energia da unidade.





Desta simulação é possível extrair dados de pressão interna nas tubulações, rotações da turbina, deslocamentos no pistão e vários outros resultados necessários para dimensionar os componentes básicos do sistema.

Metodologia

Mesmo com a simplificação para apenas um grau de liberdade, a resolução do sistema apresentado na equação 12 é bastante complicada, principalmente em se tratando de obter o valor de seus coeficientes. Assim, foram usados recursos computacionais para simular o desempenho desse sistema.

Deste modo, uma ferramenta para modelar o sistema e resolver as equações foi elaborada em ambiente Matlab®. Ela consiste em um simulador dinâmico formado por um grupo de quatro rotinas diferentes, hierarquicamente ligadas, e capazes de:

- gerar um modelo geométrico do sistema, criando uma malha com o programa Multisurf® a ser entrada no programa Wamit®, que calcula os coeficientes de massa adicional e amortecimento potencial do sistema;
- rodar o Wamit[®] dentro do ambiente Matlab[®], salvando seus arquivos de saída em uma pasta específica;
- ler os arquivos de saída do Wamit®, recuperando os coeficientes necessários à simulação, montar a equação 1 e utilizar um integrador numérico para resolver essa equação;
- gerar a visualização das séries temporais do movimento, na forma tanto de gráficos quanto de animação.

As séries de movimentos temporais geradas pela rotina (tomar como exemplo a figura 4) são então inseridas no modelo numérico do sistema hidráulico. Este último calcula as séries temporais de fluxos e pressões em cada componente hidráulico, assim como o perfil de potência que sai da turbina geradora.



O fluxograma da figura 5 mostra mais claramente a hierarquia entre as rotinas, assim como os dados de entrada necessários. Os blocos em azul-escuro são as informações que o usuário deve fornecer, e as partes em azul-claro são as informações calculadas no próprio programa.



Resultados

Utilizando-se as rotinas desenvolvidas, descritas neste item, foram obtidos os resultados necessários para se analisar a viabilidade da plataforma aqui proposta. As seções que seguem descrevem as conclusões encontradas quanto ao tipo de amarração mais indicado ao sistema, os resultados obtidos quanto aos movimentos relativos entre componentes e quanto à capacidade de geração de energia da unidade.

Amarração indicada

A partir do equacionamento encontrado no início do projeto (equações 2, 3 e 4), diferentes tipos de amarração foram testados para o sistema, como mostra a Figura 6. A intenção era analisar o efeito que as amarras teriam sobre os movimentos relativos dos seus componentes.



Com as simulações numéricas foram observados os seguintes fatores:

- qualquer tipo de amarração tem pouca influência no movimento vertical da monocoluna, pois a rigidez das amarras é desprezível em relação à sua restauração hidrostática;
- o cilindro tende a acompanhar os movimentos da monocoluna: se esta se movimenta pouco, o cilindro

movimenta-se pouco; se esta se movimenta bastante, o cilindro também se movimenta bastante; logo, os movimentos relativos entre ambos sofrem poucas alterações;

- estando o cilindro amarrado em taut-leg ou tension-leg e a monocoluna amarrada por catenárias, esta última continua a se movimentar normalmente, enquanto os movimentos do cilindro são bastante modificados, tornando os movimentos relativos maiores;
- sendo assim, decidiu-se manter quatro tension-legs no cilindro, para restringir seus movimentos, e 12 linhas em catenárias na monocoluna, apenas para garantir um offset baixo do sistema (entre 5% e 7% da altura da lâmina d'água). A amarração proposta pode ser vista na Figura 7. Com ela, foi possível obter movimentos relativos cerca de seis vezes maiores do que os movimentos originais, quando os corpos são considerados livres.



Unidades flutuantes

As dimensões principais das unidades flutuantes foram escolhidas com base em um estudo paramétrico com a rotina desenvolvida de forma a obter os maiores níveis de movimento relativo e, consequentemente, os maiores níveis de geração de energia. A figura 8 apresenta um exemplo da análise de sensibilidade.

Este estudo paramétrico forneceu, então, as dimensões das unidades apresentadas na tabela 1.





bilidade da relação entre os analy diâmetros da monocoluna e betw de seu moonpool. meter

 righte 6 – Sensibility
 righte 6 – Analisis de sensianalysis of the relationship

 bilidad de la relación entre

 between monocolumn diameters and its moonpool.

 luna y de su moonpool.

Unidade	Parâmetro	Valor (m)	
Monocoluna	Diâmetro externo	25	
	Diâmetro do <i>moonpool</i>	10	
	Calado	10	
Cilindro	Diâmetro	8	
	Calado	10	
Tabela 1 – Dimensões principais das unida- des flutuantes. Table 1 – Main dimensions of the floating unities. Tabla 1 – Dimensio- nes principales de las unidades flotantes.			

Dimensionamento de arranjos internos

O primeiro equipamento dimensionado foi o pistão hidráulico. Inicialmente, foi considerado apenas um pistão por arranjo (num total de oito arranjos radiais). No entanto, pesquisando-se em catálogos deste equipamento, verificou-se que não existiam cilindros no mercado capazes de suprir o fluxo necessário à geração de energia. Os maiores cilindros utilizados atualmente possuem cerca de 1,2m de diâmetro e 22m de curso. Deste modo, optou-se por um arranjo com diversos cilindros, como apresentado na figura 9.



Cada pistão hidráulico possui as dimensões apresentadas na tabela 2 e que foram inseridas no modelo do Simulink® para simulação.

Parâmetro	Valor	Unidade	
Diâmetro	1	m	
Área do pistão	0,785	m²	
Número de Arranjos	8	un.	
Número de pistões por arranjo	7	un.	
Número total de pistões	56	un.	
Área total dos pistões	44	m²	
Curso	6	m	
Tabela 2 – ParâmetrosTable 2 – ParametersTabla 2 – Parámetrosdo arranjo de cilindros.for the arrangementdel arreglo deof cylinders.cilindros.			

O motor hidráulico de conversão possui quatro parâmetros que devem ser definidos: deslocamento, pressão nominal, velocidade nominal e inércia do conjunto de pás. O deslocamento é um parâmetro que define o número de voltas que o motor deve executar com determinado fluxo que passa por este. O valor do deslocamento do motor hidráulico é dado em m³/rad. A pressão nominal e a velocidade nominal são os valores médios nos quais o motor irá trabalhar. Estes parâmetros estão ligados à quantidade de água que o sistema consegue bombear ao motor, dependendo diretamente da condição de mar. A inércia do conjunto de pás foi estimada pelo tamanho do rotor que seria utilizado. Testes com o modelo do Simulink® mostraram que um rotor com as dimensões aproximadas apresentadas na figura 10 apresentaria bom resultado.



A tabela 3 apresenta os parâmetros do motor hidráulico e da inércia, utilizados no modelo do Simulink® para estimativa da energia gerada pelo sistema.

Parâmetro		Valor	Unidade	
Deslocamento		0,375	m³/rad	
Pressão nominal		5,00E+04	Pa	
Velocidade nominal		50	rad/s	
Inércia		49,8	kg.m ²	
Tabela 3 - Parâmetros Table 3 - Parameters Tabla 3 - Parámetros do motor hidráulico. of the hydraulic engine. del motor hidráulico.				

O sistema de geração de energia deve contar também com um sistema de baterias. Apesar de a unidade transmitir a energia elétrica que produz diretamente por cabos de transmissão para o local onde esta será consumida, deve-se projetar um sistema de armazenamento que possa acumular energia sobressalente ou que acumule energia durante um período em que não se pode transmiti-la.

Como o sistema de baterias ocupa um espaço significante na unidade, é necessário estimar o tamanho destas baterias para sabermos se caberá no casco. A dimensão do conjunto de baterias foi estimada com base nas características energéticas de uma unidade de bateria tendo como meta o número de horas que a unidade pode ficar sem transmitir energia na pior condição de mar ensaiada. Estas características são apresentadas na tabela 4.

Parâmetro	Valor	Unidade
Densidade energética	35	Wh/kg
Peso de uma bateria	680	kg
Número de baterias por compartimento	81	un.
Número total de baterias	648	un.
Energia total disponível	1,23E+04	kWh
Geração máxima de energia	3,91	MW
Energia máxima gerada em 6h	23.460	kWh
Tempo de operação para carregar as baterias	3,16	h
Tabela 4 – Parâmetros do motor hidráulico. Table 4 - Parameters of the hydraulic engine.	Tabla 4 – Par motor hidrául	ámetros del ico.

Com base na tabela 4 foi calculada a necessidade de um conjunto de 648 baterias divididas em oito arranjos de 81 baterias. As dimensões de uma única bateria são apresentadas na tabela 5.

Parâmetro	Valor	Unidade	
h	1,5	m	
L	0,35	m	
В	0,5	m	
Tabela 5 – Dimensões Table 5 – Dimensions Tabla 5 – Dimensiones de uma bateria. of a battery. de una batería.			

De posse dos dados das tabelas 4 e 5, foi possível o dimensionamento do bloco de baterias. Cada bloco terá um arranjo de nove por nove baterias, resultando em um bloco de 3,15m de largura e 4,5m de comprimento.

A figura 11 apresenta um arranjo geral de como cada um desses equipamentos será posicionado na unidade, de forma a atender os requisitos de espaço interno.



Capacidade de geração de energia

Para estimar a geração de energia da unidade, o simulador foi testado para diversas condições ambientais. Os espectros de onda das condições testadas são apresentados na figura 12.



Estes espectros cobrem diversos mares característicos da costa brasileira, sendo, assim, condizentes com a estimativa. Inserindo as condições ambientais no modelo do Simscape®/Simulink®, foi possível obter a série temporal de potência na turbina. Os valores RMS desta série são apresentados na tabela 6 em função da condição de mar.

		Tp (s)			
HS(M) {	8	9	10	12	14
2	0,39	0,51	0,43	0,26	0,16
3	0,84	1,65	1,87	0,53	0,26
4	-	3,91	3,38	0,95	-
Tabela 6 – Mapa da geração de energia por condição ambiental.Table 6 – Energy pro- duction map by envi- ronmental condition.Tabla 6 – Mapa de la generación de energía por condición ambien- Values in MWs.Valores em MW.Values in MWs.tal. Valores en MW.					

Com base nos valores apresentados na tabela 6, podemos concluir que, como esperado, para condições ambientais mais severas, a geração de energia é maior, chegando a níveis bem interessantes (quase 4MW para Tp=9s e Hs=4m),; no entanto, para condições mais tranquilas, a geração fica bem aquém do esperado, como no caso da condição com Tp=14s e Hs=2m.

Verificou-se, porém, que, se o motor hidráulico possuísse parâmetros diferentes daqueles apresentados na tabela 3, essa geração poderia ser aumentada significativamente. Por exemplo, se mudarmos a pressão nominal do motor de 5 · 10⁴ Pa para 5 · 10⁵ Pa, poderemos mudar a geração de energia para esta condição de 160kW para 76kW.

Conclusão

O sistema proposto pode ser considerado um projeto tecnologicamente viável, pois as simulações numéricas realizadas mostram que é possível acionar um sistema hidráulico a partir dos movimentos relativos entre seus componentes. Prevê-se que o sistema hidráulico, tal como dimensionado até agora, é capaz de gerar até 3,9MW de potência para um mar de altura significativa 4m e período típico 9s.

A resposta de movimentos relativos apresenta maior dependência dos movimentos da monocoluna em si do que do cilindro, pois, estando no interior da monocoluna, este tende a acompanhar seus movimentos. Sendo assim, é recomendável fixar o sistema por dois tipos de amarras. O primeiro tipo são linhas em *tension-leg* amarradas ao cilindro, que diminuem suas amplitudes de movimento em *heave*. O segundo tipo são linhas em catenária ligadas à monocoluna, que não possuem influência notável em seus movimentos, mas garantem que a unidade não apresentará um passeio, ou *offset*, muito elevado em condições climáticas extremas.

Embora o modelo numérico para resolução do problema físico dos corpos flutuantes e amarrados esteja pronto e funcionando conforme o esperado, o modelo do sistema hidráulico ainda necessita de aperfeiçoamentos. O modelo Simulink® prevê a capacidade de geração de energia em uma média de 1,7MW de potência instalada para um mar típico da Bacia de Campos, podendo chegar a 3,9MW. Maiores níveis de geração de energia podem ser obtidos se a plataforma operar com parâmetros ajustáveis, como, por exemplo, níveis de lastro, de forma a adeguar os períodos naturais de oscilação aos períodos do mar que está incidindo. É possível também fazer os equipamentos trabalharem em uma malha fechada de controle, no qual o motor, os cilindros e válvulas estariam interligados e monitorando as condições ambientais de forma a adequar seus parâmetros a estas.

Estima-se que a presença de um acumulador nesse modelo poderia aumentar ainda mais este valor. Além disso, dadas as dimensões utilizadas dos equipamentos hidráulicos e o dimensionamento das baterias da unidade, percebe-se que a geometria da plataforma talvez esteja superdimensionada, pois o arranjo interno apresenta ainda bastante espaço. Isto pode vir a ser um ponto positivo, pois uma unidade de menores dimensões provavelmente será construída mais facilmente e apresentará custo menor. Sendo assim, isso pode possibilitar a instalação de fazendas de geração de energia elétrica, onde diversas unidades trabalharão em conjunto para abastecer certa região.

Referências Bibliográficas

AMARANTE, R. M. Estudo da estática e dinâmica de linhas, sob configuração de catenária, através da identificação geométrica, processamento e análise de imagens digitais. 2010. 207 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. BEATTY, S. J.; WILD, P.; BUCKHAM, B. J. Integration of a wave energy converter into the electricity supply of a remote Alaskan island. **Renewable Energy**, Oxford, v. 35, n. 6, p. 1203-1213, June 2010.

DYNASIM. Manual do Usuário. Predyna, (s.d). Versão 4.4.13.



FALTINSEN, O. M. Sea loads on ships and offshore structures. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 328 p. (Cambridge Ocean Technology Series, v. 1).

GERE, J. M. Mecânica dos Materiais. São Paulo: Thomson Learning, 2003. 698 p.

HENDERSON, R. Design, simulation, and testing of a novel hydraulic power take-off system for the pelamis wave energy converter. **Re**newable Energy, Oxford, v. 31, n. 2, p. 271-283, Feb. 2006.

NEWMAN, J. N. Marine Hydrodynamics. Cambridge: MIT Press, 1977. 402 p. SIMOS, A. N. Hidrodinâmica I: texto de apoio à disciplina PNV5200. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

SOUZA, J. Mar territorial, zona econômica exclusiva ou plataforma continental? Revista Brasileira de Geofísica, São Paulo, v. 17, n. 1, p. 79-82, Mar. 1999.

STEWART, J. Cálculo. 4. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2001. 640 p. v. 2.

Autores



Daniel Prata Vieira Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Epusp)

daniel.prata@tpn.usp.br

Daniel Prata Vieira é doutorando e pesquisador do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Epusp). Bolsista do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) desde março de 2011. Possui experiência em projeto de navios e sistemas oceânicos. Atua principalmente em ensaios de modelos em escala reduzida e em simulações computacionais de sistemas e estruturas oceânicos desde 2007 no laboratório Tanque de Provas Numérico. Principais temas: vibrações induzidas por vórtices, interação fluido-estrutura, ensaios em tanque de provas, projeto de navios não convencionais (Swath) e energia das ondas oceânicas. Concluiu a graduação em 2010.

Vencedor da 5ª edição do Prêmio Petrobras de Tecnologia Engenheiro Antônio Seabra Moggi na categoria Tecnologia de Energia – Graduação.



Ana Luísa de Barros Orsolini E&P Engenharia de Produção Instalações e Processos de Produção Gerência de Engenharia Naval

ana.orsolini@petrobras.com.br

Ana Luísa de Barros Orsolini é engenheira naval do setor de Engenharia de Produção/Engenharia Naval do E&P da Petrobras desde março de 2012. Nesta mesma empresa concluiu o curso de Engenheiros Navais Juniores entre 2011 e 2012. Trabalhou no setor de engenharia do Estaleiro Brasfels no ano de 2011. Participou de diversos estágios no exterior durante o programa de diploma duplo em Engenharia Naval da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo juntamente com a instituição francesa École Nationale Supérieure de Techniques Avancées (Ensta). Concluiu a graduação em 2010.



André Luis Condino Fujarra Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Epusp)

afujarra@usp.brr

André Luis Condino Fujarra é professor-doutor e atua no Departamento de Engenharia Naval e Oceânica (PNV) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Epusp), contratado em 2003. É técnico mecânico formado em 1989 pela Escola Técnica Prof. Everardo Passos (Etep), em São José dos Campos; engenheiro naval e oceânico formado pela Epusp em 1995, bem como, Mestre e Doutor em Engenharia também pela Epusp, títulos obtidos, respectivamente, em 1997 e 2002. Foi pesquisador visitante na University of Michigan (UofM), Ann Arbor, no Department of Naval Architecture & Marine Engineering em 1999, bem como no Maritime Research Institute Netherlands (Marin), Wageningen, junto ao Departamento Offshore entre 2011 e 2012. Em 2003, foi chefe interino do Agrupamento de Engenharia Naval e Oceânica do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). Tem ministrado disciplinas no curso de graduação: Dinâmica de Sistemas I e II; Materiais e Métodos para a Construção de Veleiros; Projeto de Formatura I e II. No programa de pós-graduação do PNV ministra, ainda, as disciplinas de Métodos Numéricos Aplicados à Engenharia Naval e Oceânica e de Hidrodinâmica Experimental. Tem trabalhado em projetos e convênios de P&D nas áreas de Engenharia Naval e Oceânica através do PNV-Epusp, em parceria com grupos de pesquisa, nacionais e internacionais, bem como empresas do segmento de produção de petróleo. Principais temas: hidrodinâmica e dinâmica de sistemas oceânicos, dinâmica de cabos e linhas, vibrações induzidas pela emissão de vórtices em risers e plataformas. Especialidades mecânica dos fluidos, hidrodinâmica, dinâmica de sistemas oceânicos, mecânica aplicada à engenharia, focadas no segmento experimental, porém com inúmeras inserções analítico-numéricas.