

**DINCON 2017**CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE DINÂMICA, CONTROLE E APLICAÇÕES
30 de outubro a 01 de novembro de 2017 – São José do Rio Preto/SP

Modelo Dinâmico de um Módulo da Planta Solar Fotovoltaica Flutuante Instalada no Lago da Usina Hidrelétrica de Porto Primavera-SP

Andreyson Bicudo Jambersi¹João Antonio Pereira²Antonio Eduardo Turra³Samuel da Silva⁴

Departamento de Engenharia Mecânica, Unesp, Ilha Solteira, SP

Resumo. Neste artigo é apresentado o estudo do comportamento dinâmico de um módulo de uma planta flutuante com painel fotovoltaico, instalado no lago da Usina Hidrelétrica Sérgio Motta, em Porto Primavera, SP. O flutuador está sujeito à ação de perturbação das ondas geradas no lago. Considera-se que o flutuador se comporta como se estivesse em um canal com o movimento ocorrendo em duas dimensões, de modo que o mesmo oscila torno de uma linha de equilíbrio estático e os esforços atuantes, causados pela água, são modelados como um binário de forças de rigidez hidrostática, associada ao empuxo, e de amortecimento hidrodinâmico, de natureza dissipativa. As equações de movimento do flutuador são obtidas utilizando a dinâmica de Newton-Euler e os valores de amplitude de ondas medidos no local são utilizados na excitação deste modelo. Os resultados obtidos mostram o comportamento esperado para o flutuador nas condições locais.

Palavras-chave. Planta solar flutuante, Dinâmica de corpo rígido, Energia solar, Excitação por ondas.

1 Introdução

A crescente demanda do sistema de abastecimento energético no Brasil para o aumento da disponibilidade de energia aliada à necessidade de mitigações dos efeitos e impactos da implantação de novas plantas têm levado à busca por meios de produção de energias renováveis.

Uma nova proposta que vem se consolidando no seguimento de energia solar é o

¹ andreyson@dem.feis.unesp.br

² japereira@dem.feis.unesp.br

³ turra@dem.feis.unesp.br

⁴ samuel@dem.feis.unesp.br

desenvolvimento de plantas fotovoltaicas em água, nas quais a locação dos painéis coletores de energia solar é feita diretamente sobre reservatórios, utilizando flutuantes como base para a instalação dos painéis, ao invés da tradicional implantação do sistema em terra. Dentre as principais vantagens deste tipo de aplicação destacam-se: a proximidade dos módulos de células fotovoltaicas com a água que pode melhorar o arrefecimento do sistema, aumentando também o rendimento das células fotovoltaicas quando comparado com sistemas deste tipo dispostos em terra [1]; o aproveitamento da área alagada, ocasionando na diminuição de custos de imobilização de terras, principalmente em regiões produtivas; a redução da evaporação em lagos e reservatórios devido à área coberta pelos flutuantes não sofrer a incidência direta dos raios solares [2]; e, por fim, a diminuição da incidência de luz solar diretamente na água, em decorrência da ocupação de parte da área do reservatório pelos flutuadores, o que inibiria o desenvolvimento descontrolado de algas formadoras de matéria orgânica [3], prejudicial na operação de UHE's (usinas hidrelétricas), e toxinas, prejudiciais à vida silvestre e aquática [4].

Várias propostas de sistemas fotovoltaicos flutuantes já são utilizadas em vários países da Europa, Ásia e América do Norte [1], [5], [6]. Porém a utilização deste tipo de flutuadores em lagos onde existam ondas com amplitudes consideráveis, onde grandes oscilações poderiam fazer com que os painéis rachem, é um desafio ainda não encontrado na literatura. Neste sentido, o presente artigo apresenta um estudo e avaliação do comportamento dinâmico da proposta de um flutuante devido à ação das ondas do lago da UHE Sérgio Motta, em Porto Primavera, SP. O modelo é definido utilizando conceitos da dinâmica de Newton-Euler e utilizando os dados de onda medidos no lago.

2 Descrição da modelagem dinâmica

A planta fotovoltaica flutuante é constituída de uma conexão em série de módulos flutuantes que formam uma plataforma flexível, na qual os módulos se movimentam uns em relação aos outros quando sujeitos aos efeitos das ondas. A presente análise da dinâmica do flutuador considera apenas um dos módulos que compõe o flutuante.

Os movimentos admitidos para o flutuador são os de translação $z(t)$, ao longo da direção vertical, e de rotação $\theta(t)$, em torno de um eixo perpendicular ao plano do flutuador. Isso corresponde a uma aproximação, já que o flutuante na realidade possui seis graus de liberdade. Esse comportamento é admitido devido às análises do local indicarem incidências de ventos e, consequentemente, de ondas, que ocorrem majoritariamente de modo unidirecional. Essas análises do local foram realizadas por meio de uma estação de medição de ondas e ventos, instalada na margem esquerda (ME), nas proximidades do local onde o flutuador será posicionado [7]. A partir da análise dos dados coletados na estação, constata-se ainda que as amplitudes de ondas geradas na região do lago da UHE Sérgio Motta, onde serão instalados os flutuadores, não são muito grandes. Desta forma, assumir-se razoável supor que o flutuador se comporta como se estivesse situado em um canal.

2.1 Sistemas de coordenadas e parâmetros físicos utilizados

O modelo do flutuador é obtido utilizando conceitos de Dinâmica de Newton-Euler [8] e é descrito com o auxílio de um sistema de referência inercial ${}_I S$ e um móvel ${}_{BI} S$, conforme Figura 1.

Os sistemas de referência estão dispostos de forma que o eixo $x \equiv x_1$ é perpendicular ao plano da figura e seu sentido positivo aponta para dentro do desenho (conforme regra da mão direita).

Para a descrição do movimento utiliza-se um Sistema Inercial $_I S - (x, y, z)$, fixo no ponto O , que corresponde à posição do centro de massa do flutuador na posição de equilíbrio e representado pela base ortonormal $\{\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}\}$ e um Sistema Móvel $_{B1} S - (x_1, y_1, z_1)$, fixo no centro de massa (CM) do flutuador e solidário à rotação (positiva) deste em torno de $x_1 \equiv x$, com velocidade angular $\dot{\theta}$ e representado pela base ortonormal $\{\hat{i}_1, \hat{j}_1, \hat{k}_1\}$.

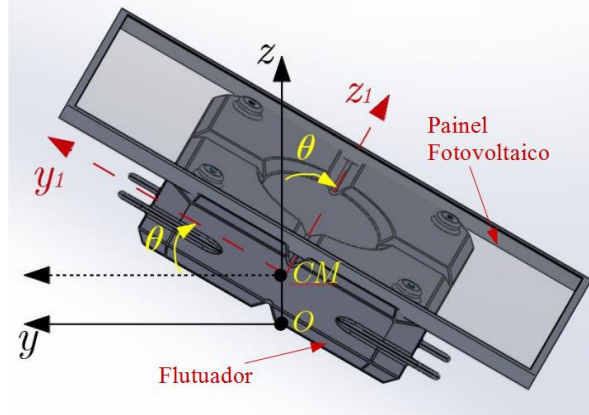


Figura 1: Representação do flutuante em modelo CAD e desenho esquemático dos sistemas de referência inercial (em corta preta) e móvel (em cor vermelha). Vista frontal, com o eixo $x \equiv x_1$ perpendicular ao plano da figura, no sentido da folha.

A matriz de transformação de coordenadas entre os sistemas de referência $_I S$ e $_{B1} S$ é dada por:

$$\mathbf{T}_\theta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

e a transformação entre os sistemas se dá da forma $_{B1} S = \mathbf{T}_{\theta I} S$ e $_I S = \mathbf{T}_{\theta}^T {}_{B1} S$ onde o sobrescrito T é o indicativo de matriz transposta.

O tensor de inércia de massa ($\mathbf{I}_{CM}$) é invariante no tempo quando representado no sistema móvel $_{B1} S$ e é composto por momentos de inércia de massa, que são os termos da diagonal principal, e produtos de inércia de massa, que consistem nos elementos fora desta, e cujo os valores são facilmente extraídos no próprio *software* CAD onde o flutuador foi modelado, no centro de massa e alinhado com os eixos (x_1, y_1, z_1) . De modo que:

$$_{B1} \mathbf{I}_{CM} = \begin{bmatrix} 6,8736 & -0,0053 & 2,9999 \\ -0,0053 & 5,8159 & 0,0009 \\ 2,9999 & 0,0009 & 14,5383 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Além disso, também através do *software* CAD, obteve-se o valor de massa de 40.175 kg (cerca de 32 kg referente ao flutuante e cerca de 18 kg referente ao painel) para o conjunto.

2.2 Descrição dos esforços atuantes

Considera-se que o sistema oscila em torno de uma linha de equilíbrio estático e está submetido a forças decorrentes da ação das ondas do lago. Esses esforços foram modelados como forças concentradas que atuam em dois pontos, F (frontal) e R (traseiro) do flutuante. Apesar da nomenclatura aqui utilizada, as ondas “incidem” primeiro no ponto R e “saem” pelo ponto F . A Figura 2 apresenta o DCL (diagrama de corpo-livre) do flutuador nessa situação.

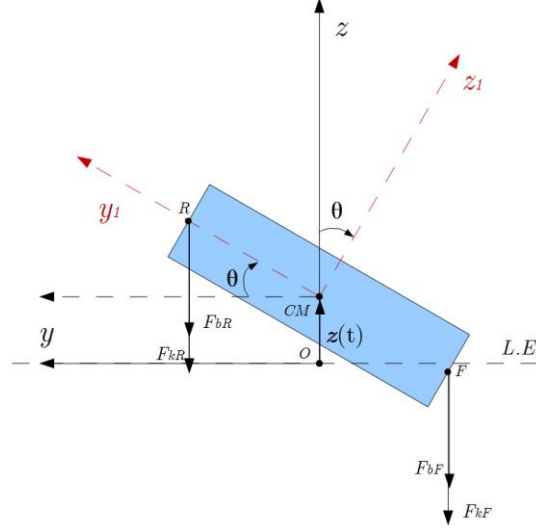


Figura 2: Diagrama de corpo livre do flutuador (representado aqui com uma geometria simples), sujeito às forças restauradoras aplicadas em F e R .

Os termos F_{kF} e F_{kR} , são as forças de rigidez hidrostática, ou ainda, forças de elevação/restauração (empuxo) vertical, causadas pela ação das ondas do lago, que agem nos pontos F e R do flutuador. F_{bF} e F_{bR} , são as forças de amortecimento hidrodinâmico, também causadas pela incidência das ondas do lago agindo nos pontos F e R , de natureza dissipativa.

Devido à natureza restauradora destes esforços, essas forças atuam sempre na direção contrária ao movimento e na direção vertical (eixo z do sistema de referência inercial) e seus valores de amplitude variam com o tempo. Essas amplitudes são dadas por:

$$F_{kF} = k_F(z_F - w_F); F_{kR} = k_R(z_R - w_R); F_{bF} = b_F(\dot{z}_F - \dot{w}_F) \text{ e } F_{bR} = b_R(\dot{z}_R - \dot{w}_R) \quad (3)$$

onde os termos k_F e k_R são as constantes de rigidezes hidrostáticas, em [N/m]; b_F e b_R são as constantes de amortecimento hidrodinâmico, em [Ns/m]; z_F e z_R são os deslocamentos; $\dot{z}_F$ e $\dot{z}_R$ são as velocidades instantâneas; w_F e w_R são as alturas (amplitudes) e $\dot{w}_F$ e $\dot{w}_R$ são as velocidades (transversais, ao longo do eixo z) instantâneas das ondas, com relação aos pontos F e R do flutuante.

A segunda Lei de Newton é facilmente calculada no sistema inercial ${}_I\mathbf{S}$, e relaciona a resultante das forças ($\sum {}_I\mathbf{F}$) aplicadas com a taxa de variação do momento linear do centro de massa (${}_I\dot{\mathbf{p}}_{CM}$) de modo que:

$$\sum {}_I\mathbf{F} = m\{0 \quad 0 \quad \ddot{z}\}^T \quad (4)$$

sendo m é a massa do flutuante, em [kg] e $\ddot{z}$ a aceleração do centro de massa, em [m/s].

A equação de Euler, por sua vez, é facilmente calculada no sistema móvel ${}_{B1}\mathbf{S}$ devido ${}_{B1}\mathbf{I}_{CM}$ ser invariante nesse sistema. Essa equação relaciona o somatório dos torques externos aplicados em

relação ao centro de massa ($\sum_{B1} \mathbf{T}_{CM}$) à taxa de variação do momento angular também calculado em relação ao centro de massa (${}_{B1}\dot{\mathbf{H}}_{CM}$) do flutuador. Assim:

$${}_{B1}\dot{\mathbf{H}}_{CM} = {}_{B1}\mathbf{I}_{CM} \frac{d}{dt}({}_{B1}\boldsymbol{\omega}) + {}_{B1}\boldsymbol{\Omega} \times ({}_{B1}\mathbf{I}_{CM} {}_{B1}\boldsymbol{\omega}) + m {}_{B1}\mathbf{r}_{CM-CM} \times {}_{B1}\mathbf{a}_{CM} = \sum_{B1} \mathbf{T}_{CM} \quad (5)$$

que, resolvendo para o flutuador no plano, fornece:

$$\sum_{B1} \mathbf{T}_{CM} = \left\{ (I_{x1} + I_{y1x1} + I_{z1x1}) \ddot{\theta} \quad 0 \quad 0 \right\}^T \quad (6)$$

Assim, são obtidas as equações do movimento que podem ser descritas na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & (I_{x1} + I_{y1x1} + I_{z1x1}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{z} \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -(F_{kF} + F_{kR} + F_{bF} + F_{bR}) \\ [(F_{kF} + F_{bF}) - (F_{kR} + F_{bR})] \frac{L}{2} \cos \theta \end{Bmatrix} \quad (7)$$

Para a realização da integração, utilizou-se um método de Runge-Kutta de 4ª ordem e condições iniciais nulas para $\theta(0)$ e $\dot{\theta}(0)$. Para o deslocamento e velocidade de translação, considerou-se que os mesmos possuíam no instante inicial os mesmos valores de amplitude e velocidade transversal da onda incidente, ou seja: $z(0) = w_F$, $\dot{z}(0) = \dot{w}_F$. O passo de integração utilizado foi $\Delta t = 0.005$ [s].

3 Respostas temporais do modelo excitado com dados de onda medidos no lago

Para a realização das simulações a seguir, utilizou-se dados medidos no dia 29 de Agosto de 2016, das 10:23 às 10:25 da manhã, devido as medições serem consistentes, e representarem bem as condições locais. Os valores das rigidezes hidrostáticas e dos amortecimentos hidrodinâmicos foram escolhidos de forma arbitrária analisando a resposta à diversas faixas de valores e tendo em vista a ordem de valores que se esperaria dos deslocamentos.

A Figura 3 mostra os valores de amplitude das ondas medidos e com nível DC removido.

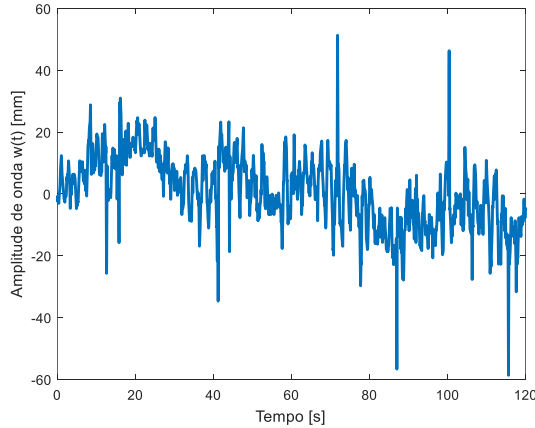


Figura 3: Série temporal dos valores de amplitude de onda utilizados.

Da Figura 4(a) é possível perceber que o deslocamento do centro de massa $z(t)$ do flutuador, após um breve período transiente, passa a se comportar de forma muito próxima ao comportamento das ondas do lago em si, exceto por um fator de escala em amplitude e uma suavização em sua trajetória.

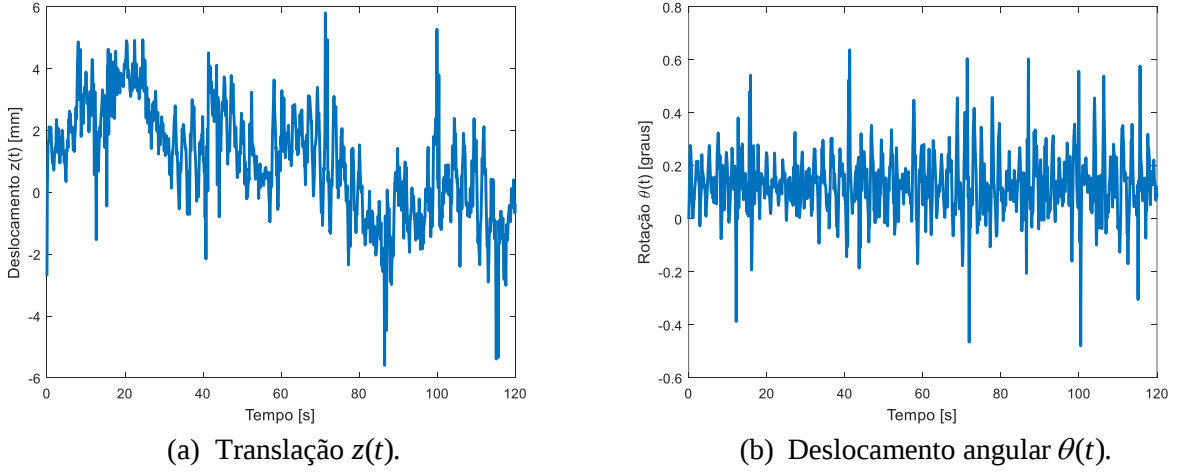


Figura 4: Movimento observado utilizando $k_F = k_R = 5000$ N/m e $b_F = b_R = 450$ Ns/m.

A Figura 4(b), por sua vez apresenta o ângulo de rotação $\theta(t)$, onde os valores apresentados para a amplitude estão em graus. Nota-se que o ângulo de rotação não assume valores considerados altos e que o movimento, assim como o de translação, possui amplitude limitada e estável.

A Figura 5(a) e (b) apresentam os esforços no flutuador. A partir dessas figuras, nota-se que os esforços que atuam nos pontos F e R , ilustrados anteriormente no diagrama de corpo-livre (Figura 2) são muito próximos em amplitude e defasados um em relação ao outro, isso vale tanto para as forças causadas pelo empuxo, F_{kF} e F_{kR} , quanto para as forças de amortecimento F_{bF} e F_{bR} .

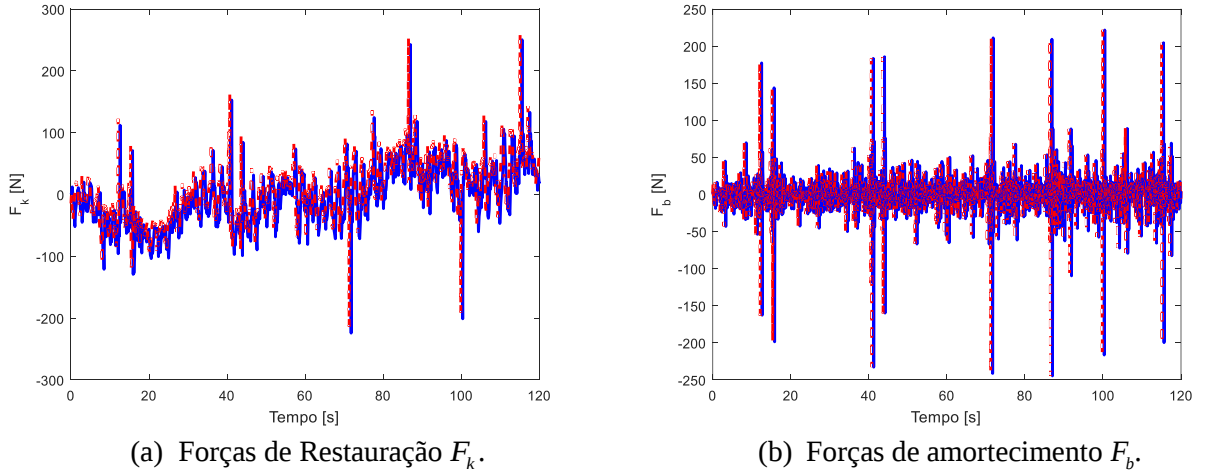


Figura 5: Esforços no ponto R (—) e F (- -) utilizando $k_F = k_R = 5000$ N/m e $b_F = b_R = 450$ Ns/m.

4 Conclusões

A implantação de plantas fotovoltaicas dispostas em estruturas flutuantes em lagos de UHE's pode apresentar uma série de vantagens práticas quando comparadas à implantação destes em terra.

O uso destes sistemas em lagos pode trazer a necessidade do estudo do comportamento dinâmico dos flutuadores.

Dos resultados obtidos é possível verificar que, mesmo que não sejam conhecidos os valores exatos para os coeficientes de proporcionalidade relacionados às rigidezes hidrostáticas e amortecimentos hidrodinâmicos, é possível obter respostas temporais que coincidem com o esperado para a física do problema. Um estudo mais detalhado verificando a sensibilidade do modelo à variação desses parâmetros pode ser útil no entendimento do modelo.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CESP pelo suporte técnico e financeiro prestado junto ao projeto P&D 9004/2014, da ANEEL, intitulado “Integração de Plantas Eólicas e Solares Fotovoltaicas a Usinas Hidrelétricas Existentes” atualmente em execução, bem como às executoras Base, FEPISA, FUSP, Prosolar, MFAP, MRTS e RTB. E também à UNESP de Ilha Solteira pela estrutura fornecida. O primeiro autor agradece à FEPISA também pela sua bolsa de doutorado. O último autor agradece o seu apoio CNPq - Processo 307520/2016-1.

Referências

- [1] Y. Ueda, K. Kurokawa, M. Konagai, S. Takahashi, A. Terazawa, e H. Ayaki, Five Years Demonstration Results of Floating PV Systems with Water Spray Cooling, 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, (2012).
- [2] T. R. Dhas, A Review on New Era of Solar Power Systems: Floatovoltaic Systems or Floating Solar Power Plants, I, vol. 3, no. 1, p. 1, (2014).
- [3] T. Matsuo, K. Hanaki, S. Takizawa, e H. Satoh, Advances in Water and Wastewater Treatment Technology: Molecular Technology, Nutrient Removal, Sludge Reduction, and Environmental Health. Elsevier Science, (2001).
- [4] G. A. B. da Fonseca, Contribuição antrópica na poluição de reservatórios hidrelétricos: o caso da usina hidrelétrica de São Simão - GO/MG, Dissertação de Mestrado em Planejamento Energético, UFRJ/COPPE, (2010).
- [5] C. Ferrer-Gisbert, J. J. Ferrán-Gozálvez, M. Redón-Santafé, P. Ferrer-Gisbert, F. J. Sánchez-Romero, e J. B. Torregrosa-Soler, A new photovoltaic floating cover system for water reservoirs, Renewable energy, vol. 60, 63–70, (2013), DOI: 10.1016/j.renene.2013.04.007.
- [6] K. Trapani and M. Redón Santafé, A review of floating photovoltaic installations: 2007–2013, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 23, no. 4, pp. 524–532, (2015), DOI: 10.1002/pip.2466.
- [7] J. A. Pereira, A. E. Turra, R. B. Jr., S. da Silva, A. B. Jambersi e D. D. Sabino, Relatório de estudo e especificação técnica da estação de medição de ondas, FEPISA/CESP, (2014).
- [8] M. D. Ardema, Newton-Euler Dynamics. Springer, (2005).