

# 12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



## TÍTULO DO TRABALHO:

**OSCILAÇÃO VERTICAL LIVRE DE UMA PLATAFORMA FLUTUANTE COM REDUÇÃO DE MOVIMENTO**

## AUTORES:

Antônio Luis Siqueira Tada<sup>1</sup>, Pedro Kalid Bacellar<sup>2,\*</sup>, Celso Kazuyuki Morooka<sup>2,3</sup>, Sergio Nascimento Bordalo<sup>2,3</sup>

## INSTITUIÇÃO:

<sup>1</sup>Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, UNICAMP,

<sup>2</sup>Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP,

<sup>3</sup>Departamento de Energia & Centro de Estudos de Energia e Petróleo, UNICAMP

\*e-mail do autor correspondente: p.kalidbacellar@gmail.com

## OSCILAÇÃO VERTICAL LIVRE DE UMA PLATAFORMA FLUTUANTE COM REDUÇÃO DE MOVIMENTO

### Resumo

A exploração de recursos naturais no mar avança cada vez mais para águas profundas e ultra profundas. Desafios são cada vez mais crescentes na produção marítima de óleo e gás, e mais recentemente, a escassez de recursos minerais no continente já é uma realidade para alguns países, e desta forma, verifica-se um aumento no interesse pela mineração no fundo dos oceanos. Soma-se a este fato, o anseio da sociedade cada vez maior pela preservação do meio ambiente e a preferência pela energia de fontes renováveis. Neste cenário, soluções cada vez mais eficientes e eficazes são fundamentais para suprir a energia necessária para o acionamento das bombas para elevação e movimentação de petróleo e gás, e processamento dos fluídos produzidos no campo de petróleo. Uma forma alternativa que desperta atenção na atualidade é o uso da energia tradicional proveniente de geradores a diesel ou turbinas com queima de gás natural combinados com a energia renovável proveniente da força dos ventos.

A presente pesquisa é parte do estudo para o desenvolvimento de uma plataforma flutuante marítima inovadora, com uma câmara de ar confinada à estrutura de seu casco para redução de seus movimentos verticais com potencial aplicação como plataformas flutuantes para torres com geradores eólicos de energia em alto mar. Como parte da etapa inicial, neste trabalho estuda-se a frequência natural do movimento de “heave” da plataforma e as propriedades hidrodinâmicas através de testes de decaimento. Para isto, um modelo físico simplificado da plataforma, com e sem câmara de ar, foi considerado em testes de oscilação livre em um tanque de águas calmas. Fundamentos da dinâmica do movimento foram estudados, considerando geometrias simplificadas para a plataforma. A equação do movimento de “heave” foi utilizada em simulações numéricas para o comportamento dinâmico do movimento com a finalidade de complementar a compreensão dos resultados de medição no laboratório. Desta comparação pode-se validar o modelo computacional simplificado adotado e melhorar o entendimento da ação da câmara de ar na redução do movimento. As observações na frequência natural da plataforma e a boa concordância observada na oscilação da plataforma nos testes com modelo físico e simulações no computador, mostram resultados promissores quanto ao desempenho da câmara de ar na redução de movimentos da plataforma.

Palavras-chave: sistemas marítimos flutuantes, dinâmica de oscilações, simulação computacional.

### Abstract

Exploitation of natural resources at the sea is moving towards deep and ultra-deep waters. Offshore oil and gas field production, and the reality of mineral resources shortage on onshore fields has increased the interest for the natural resources mining at the bottom of seas. Moreover, the society demand for preservation of the environment suggest more and more the preference for energy from renewable sources. In this scenario, efficient and effective solutions are essential to supply necessary energy to drive pumps for lifting oil and gas and to process it, and further, to move the oil and gas production from the subsea reservoir fields to the land. In this scenario, an attractive alternative with others today is combine the use of traditional energy from diesel generators or turbines that burn natural gas with renewable energy from the wind power.

The present research is part of the study of an innovative offshore floating platform development, with an air chamber confined to the platform hull structure to reduce the vertical movements with potential to settle wind turbine towers on open seas. As a first step in this work, the natural frequency of the platform's "heave" motion and the fundamental hydrodynamic properties are evaluated based on decay tests with a small model. A simplified physical model of the platform was built, with and without an air chamber, and free oscillation tests in a calm water tank was conducted. Fundamentals of motion dynamics were studied by considering simplified geometries for the platform. A numerical simulation tool was implemented to the "heave" motion equation to support the understanding of results observed on measurements in the laboratory experiment model. This comparison can validate the simplified computational model adopted, and improve the understanding of the air chamber actions for the motion reduction process. Observations of the dynamic behavior of heave motion, and the good agreement of the natural frequency of the free oscillation physical model tests with the computer simulations, gives a promising indication for the performance of the air chamber to reduce the platform heave motion due the environment.

Keywords: floating offshore systems, motion dynamics, computational simulation.

## **Introdução**

O movimento de uma plataforma marítima e embarcação flutuante em operação, sob a influência de ondas em diferentes condições de mar pode acarretar erros operacionais, ou mesmo, perdas de eficiência nestas operações. E ainda, eventuais danos e riscos à tripulação e a imposição involuntária de limites operacionais. Assim sendo, seria de grande valia a possibilidade de sistemas passivos ou ativos na redução de movimentos da estrutura flutuante sob ação das ondas do mar, contribuindo inclusive para a mitigação de riscos e minimização de eventuais danos ao meio ambiente.

Uma plataforma flutuante ou navio possui seis graus de liberdade para movimentos (Morooka 1990), sendo que este trabalho apresenta o seu foco no movimento vertical de "heave". O estudo dos efeitos de movimentos e deslocamentos de navio ou plataforma flutuante sob ação de vento, correnteza marítima e ondas em operações de construção, intervenção, ou ainda, produção de poços marítimos de petróleo tem sido estudados no passado (Morooka, 1998; Tsukada et al, 2007; Yamamoto and Morooka, 2007, Suzuki et al, 2007). Com base em estudos anteriores (Hansen, 2019; Jaculli et al 2020, 2023; Kiryu et al, 2021), este trabalho almeja estudar os fundamentos da redução do movimento vertical em estruturas flutuantes devido à ação de uma câmara de ar integrada ao casco da estrutura flutuante.

É considerada uma câmara de ar interna ao casco de uma plataforma flutuante, com a parte inferior da câmara aberta à água do mar formando uma superfície livre de contato entre a água e o ar da câmara. À medida que a plataforma se movimenta na vertical, ocorre a compressão e descompressão do ar confinado à câmara, observando-se uma variação de empuxo e esforços fluidodinâmicos verticais, contribuindo na redução do movimento de heave. A Figura 1 ilustra a geometria citada.

Diferentes conceitos têm sido propostos para plataformas flutuantes com aplicação na exploração e produção marítima de um campo de petróleo, assim como para servirem de base flutuante para produção de energia em mar aberto como a eólica e o de aproveitamento de energia de ondas de ondas (Chakrabarti, 1987, Bai e Bai, 2015). Neste trabalho, o movimento de uma plataforma flutuante é descrito em conjunto com simulações numéricas e formulação analítica do movimento de heave (Bacellar et al, 2024), e a redução do movimento vertical de forma passiva, para diferentes períodos/frequência de onda em condições específicas de interesse são apresentadas. O objetivo deste trabalho é, portanto, estudar as propriedades da câmara de ar interna à estrutura flutuante, bem como esta impacta o movimento de "heave".



Considerando a Equação (1) para pequenas variações na amplitude da oscilação, a frequência natural da oscilação pode ser descrita conforme as Equações (2) e (3). A Eq. (2) representa a frequência natural da plataforma com a câmara de ar ( $f_{n,ac}$ ), e a Equação (3) sem a câmara de ar ( $f_{n,0}$ ).

$$f_{n,ac} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho g (A_{wl} - A_{ac}) \left| \frac{dh_{air}}{dh} \right|}{M(1+C_a)}} \quad (2)$$

$$f_{n,0} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho g A_{wl}}{M(1+C_a)}} \quad (3)$$

Em referência à Figura 1, quanto maior a razão  $A_{ac}/A_{wl}$ , menor será a frequência natural da estrutura, sendo esta tendência favorável para o comportamento da plataforma quanto à redução desejada do movimento de “heave” na região de excitação das ondas do mar. A geometria considerada neste estudo considera uma plataforma cuja área de interface ar-água é maior que a área de seção transversal do casco (Figura 1).

### Comportamento da Pressão na Câmara de Ar

O efeito da redução passiva do movimento de heave se dá principalmente pelas diferenças de pressão na câmara de ar, que ocorrem quando a plataforma oscila verticalmente. À medida que a estrutura emerge e submerge, água entrará e sairá da cavidade, comprimindo e expandindo o ar ali confinado. A entrada de água para dentro da cavidade reduz a flutuabilidade da estrutura e a saída da água aumenta esta flutuabilidade. Quanto mais água entrar na cavidade, mais o ar será comprimido, e quanto mais água flui para fora da cavidade, mais o ar irá expandir.

Conforme Bacellar et al, 2024, pode-se obter, a partir da equação de equilíbrio hidrostático, a relação dentre  $h_{air}$  e  $h$  a seguir:

$$h_{air}(h) = \frac{2p_{ch}H_{ch}}{p_{atm} + \rho g(h - H_{ac}) + \sqrt{(p_{atm} + \rho g(h - H_{ac}))^2 + 4\rho g H_{ch} p_{ch}}} \quad (4)$$

Na Eq. (4) acima,  $p_{atm}$  é a pressão atmosférica na superfície do mar,  $H_{ac}$  é a altura da câmara de ar,  $p_{ch}$  é a pressão do ar confinado na câmara de ar quando  $h_{air} = H_{ch}$ . Note-se que a pressão do ar na câmara  $p_c$  é considerada uma função de  $h_{air}$  segundo a equação de gás ideal isotérmico

$$p_c(h_{air}) = p_{ch} \frac{H_{ch}}{h_{air}} \quad (5)$$

As Equações (1) e (4) são utilizadas para o cálculo do movimento da plataforma com câmara de ar ou sem câmara de ar. Considerando pequenos movimentos de *heave* em torno da posição de equilíbrio estático inicial, a Equação (4) pode ser linearizada possibilitando redução no tempo de processamento computacional. Desta forma, a derivada  $dh_{air}/dh$  necessária para resolução da Equação (1) é obtida da Equação (4), sendo um valor admitido constante, que provê resultados com aproximação satisfatória.

A partir da Equação (4) e das Equações (2) e (3) pode-se inferir o efeito da câmara de ar sobre a frequência natural da plataforma – que pode ser visto na Figura 2. Em trabalho experimental de Bacellar et al (comunic. pess., 2024), o modelo em pequena escala tinha  $dh_{air}/dh = -0,015$ , portanto o efeito observado foi pequeno conforme esperado. No presente trabalho,  $dh_{air}/dh = -0,25$ , o que provê efeito mais significativo. Note-se que a redução da frequência natural depende da razão de áreas  $R_A = A_{ac}/A_{wl}$ . Porém, essa não deve exceder a razão crítica  $R_{A,c} = |dh_{air}/dh|^{-1} = 4$  (v. Figura 2). Neste trabalho,  $A_{ac}/A_{wl}$

= 2,51; de forma que  $f_{n,ac}/f_{n,o} = 0,61$ , uma notável redução de 39%. O maior valor de  $dh_{air}/dh$ , na presente análise, deve-se às maiores dimensões da câmara, de acordo com a Equação (5).

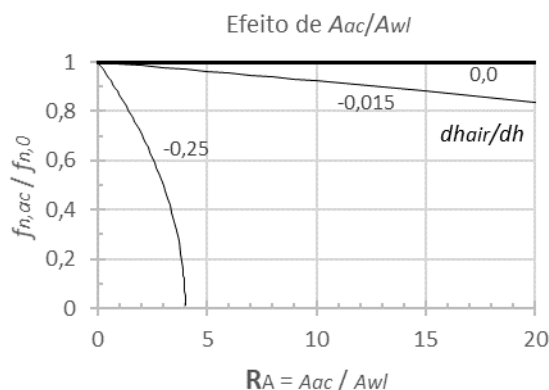


Figura 2. Efeito da câmara de ar sobre a redução da frequência natural em função da razão de áreas  $A_{ac}/A_{wl}$  e de  $dh_{air}/dh$ .

### Simulação Numérica

Para solução da Equação (1), o método da integração explícita de Runge-Kutta, de quinta ordem, em seis estágios foi implementada em MATLAB (Lopez, 2014). Desta forma, dada uma condição inicial para o sistema é possível de se prever o comportamento do sistema nos passos subsequentes. Os valores para simulação da plataforma em escala real (protótipo) foram tomados com base em um modelo de laboratório em pequena escala utilizado no trabalho de Bacellar et al (comunic. pess., 2024), e estão apresentados na Tabela 1. Nesse trabalho, experimentos de oscilações livres amortecidas foram realizados em um tanque de água, obtendo-se os valores do coeficiente de amortecimento  $B$  (sem câmara de ar e com câmara de ar). Para a presente simulação computacional de um protótipo fictício foi considerado um fator de escala 1:150; exceto para o diâmetro da coluna  $d_{wl}$ , pois a razão de áreas do modelo  $R_{Am} = 17,4$  é muito acima da razão de áreas crítica do protótipo ( $R_{Ac} = 4$ ), conforme pode ser verificado na Figura 2.

Tabela 1. Valores para Simulação Numérica.

| Parametros                                           | Valores              | Unidades |
|------------------------------------------------------|----------------------|----------|
| Gravidade ( $g$ )                                    | 9,81                 | $m/s^2$  |
| Pressão atmosférica ( $p_{atm}$ )                    | 100,0                | kPa      |
| Densidade da água ( $\rho$ )                         | 1000,0               | $kg/m^3$ |
| Diâmetro externo na linha d'água ( $d_{wl}$ )        | 15,8                 | m        |
| Diâmetro interno da câmara de ar ( $d_{ac}$ )        | 25,1                 | m        |
| Altura da câmara de ar ( $H_{ac}$ )                  | 51,9                 | m        |
| Pressão de carga do ar na câmara ( $p_{ch}$ )        | 100,0                | kPa      |
| Altura de ar na câmara @ $p_{ch}$ ( $H_{ch}$ )       | 24,6                 | m        |
| Massa da plataforma ( $M$ )                          | $15,154 \times 10^6$ | kg       |
| Coeficiente da massa adicional ( $C_a$ )             | 1,0                  |          |
| Calado ( $h_o$ )                                     | 60,0                 | m        |
| Coeficiente de amortecimento sem câmara ( $B_o$ )    | $223,0 \times 10^3$  | N.s/m    |
| Coeficiente de amortecimento com câmara ( $B_{ac}$ ) | $287,0 \times 10^3$  | N.s/m    |

## Resultados e Discussão

O estudo aqui apresentado aborda a questão da determinação do comportamento oscilatório associando métodos experimentais e computacionais a fim melhor compreender a atuação do ar confinado na câmara e seu efeito no “heave”, bem como para examinar as influências dos parâmetros geométricos e físicos, sejam do ambiente ou da plataforma.

A Figura 3 apresenta o resultado de 400 simulações para forçamentos senoidais, varrendo a faixa de frequências de interesse neste caso particular. A amplitude do forçamento, para fins de exemplificação, foi arbitrada em  $F_a = 385 \times 10^3$  N para todos os casos simulados (0,26% do peso do protótipo). Na aplicação quase estática, a força produziria “heave”, respectivamente, de 0,20 m e 0,54 m para a situação sem câmara de ar e com câmara de ar. Esses valores são pequenos; entretanto, próximo das respectivas frequências naturais, 0,04 Hz (período 25 s) e 0,024 Hz (período 41 s), sem câmara e com câmara, tem-se oscilações com picos elevados de “heave” por ação da mesma força. Isso pode ser inadmissível em certas situações, devido aos riscos impostos às operações. A magnitude dos picos depende fortemente do coeficiente de amortecimento, portanto, torna-se necessário melhor estimativa e a determinação deste coeficiente, bem como aprimorar a sua modelagem. Ainda assim, o resultado aponta para relevantes indícios. Primeiramente, observa-se que, de fato, parece ser viável alterar significativamente a resposta da plataforma com a atuação da câmara de ar, notavelmente através da variação da sua frequência natural, que pode ser reduzida de forma a não coincidir com condições de mar desfavoráveis. Este estudo sugere que o projetista possa ter um grau razoável de controle sobre a resposta da plataforma através do adequado dimensionamento da câmara de ar. Em segundo lugar, nota-se que o efeito da redução do “heave” pode ser bastante pronunciado. Por exemplo, na Figura 3, em torno de 0,04 Hz, o protótipo sem câmara apresenta “heave” alto, porém, o protótipo com câmara tem “heave” muito menor. Um caso particular, mostrado no histórico da Figura 4 com  $f = 0,038$  Hz, ilustra a redução do “heave” por efeito da câmara de ar.

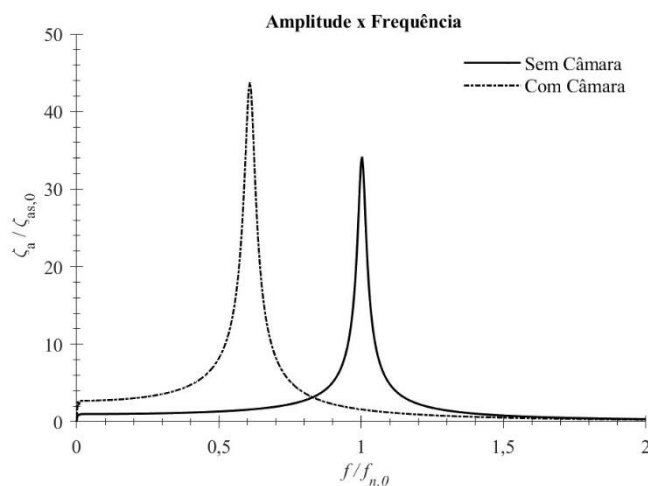


Figura 3. Amplitudes de oscilação vs. frequência de forçamento com amplitude constante. Frequência natural sem câmara  $f_{n,0} = 0,04$  Hz e amplitude estática sem câmara  $\zeta_{as,0} = 0,20$  m.

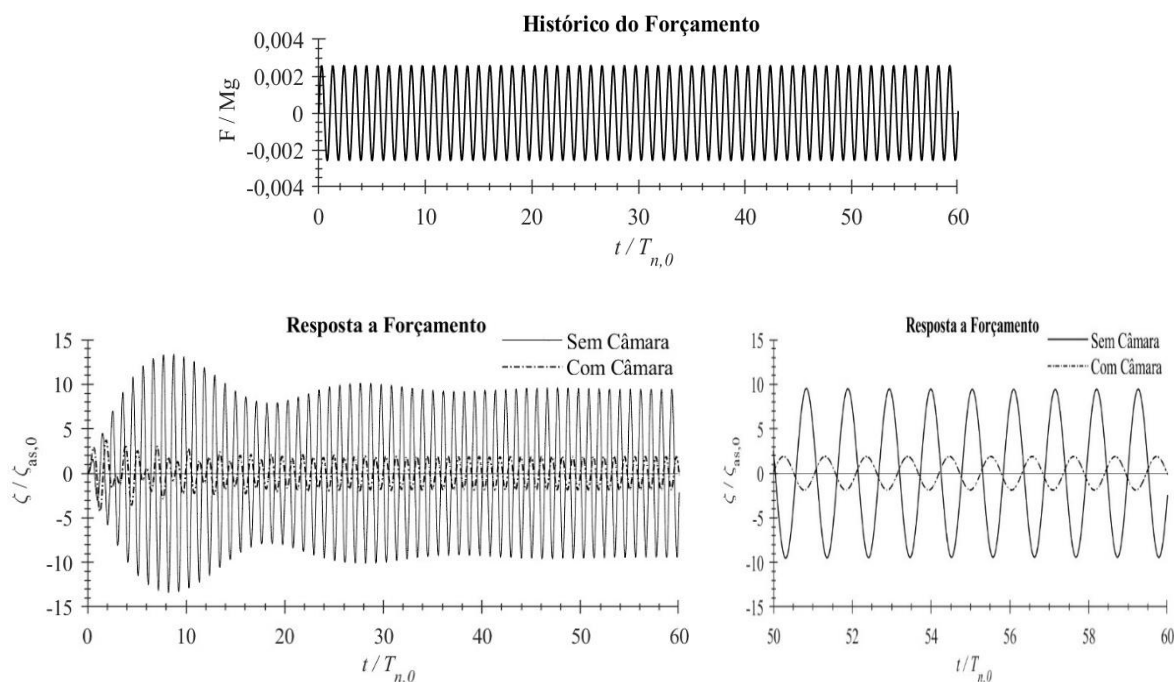


Figura 4. Histórico de oscilação: forçamento e resposta para a frequência de 0,038 Hz (período natural sem câmara  $T_{n,0} = 25$  s)

## Conclusões

Um simulador matemático foi desenvolvido para efetuar a análise numérica da dinâmica de plataformas flutuantes com câmara de ar inundável. Observa-se que o dimensionamento da pressão interna da câmara de ar, da altura e da área da cavidade da câmara, do calado da plataforma, pode ser utilizado para controlar, indiretamente, a intensidade da restauração e da redução no movimento de “heave”. Dessa forma, o movimento de “heave” dependerá, em certo grau, da geometria da estrutura considerada.

O presente trabalho é parte de uma pesquisa em andamento sobre plataformas flutuantes sujeitas a excitação devida à ondas, correnteza e ventos, no mar. O foco é a redução do “heave” sob efeitos da ação de uma câmara de ar confinada ao casco da estrutura flutuante. As principais conclusões neste estudo inicial são as seguintes:

- Câmaras de ar tem potencial para reduzir o movimento de “heave” excitado por ondas do mar.
- Os dois parâmetros diretamente envolvidos na redução do “heave” são: (a) a compressão da massa de ar em função da submergência; (b) a razão da área da câmara em relação à área da seção do casco na linha d’água.
- O modelo matemático proposto, embora simplificado, é ágil e prático para a obtenção de valores aproximados satisfatórios relativos à avaliação do movimento de “heave” na faixa de aplicação de interesse, pois captura o comportamento físico essencial da plataforma com câmara de ar.

Vários aspectos da modelagem física e matemática podem ser aprimorados, e serão objeto de desenvolvimento posteriormente. Trabalhos futuros incluem a análise de outras geometrias, o estudo de formas de aumentar a eficácia do efeito passivo da câmara de ar, e a exploração da possibilidade de se empregar controles ativos acoplados à câmara de ar.



## **Agradecimentos**

Agradecimentos ao PRH-5 ANP/Finep (2019), o terceiro autor ao CNPq (308551/2017-6) e juntamente com o segundo autor à CAPES/Print (88887.310645/2018-00), e finalmente ao apoio contínuo da FAPESP e UNICAMP.

## **Referências Bibliográficas**

- Bacellar, P.K., Trigo, C.C.O., Bordalo, S.N., Morooka, C.K. (2024): “Simulações Numéricas do Comportamento Oscilatório Vertical Reduzido de uma Plataforma Flutuante”, XII Congress of Mechanical Engineering (CONEM), ABCM, Natal, RN, Brasil.
- Bacellar, P.K., Bordalo, S.N., Morooka, C.K. (comunicação pessoal, 2024): “Numerical Model and Computer Simulation for Offshore Floating Platforms of Reduced Vertical Oscillations in Waves”, em elaboração para submissão, Brasil.
- Bai, Y., Bai Q. (2015): “Sistemas Marítimos de Produção de Petróleo”, Editora GEN LTC; 1ª edição.
- Morooka, C.K. (1990): “Large Amplitude Displacements of a Deepwater Moored Floating Offshore Platform”, SPE Latin American Petroleum Engineering Conference, Rio de Janeiro, Brazil.
- Morooka, C.K.; Doria, M.T. (1998): “Heave Motion Effects on Kick and Lost Circulation Detection in Floating Drilling Rigs”, 8<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engin. (ISOPE), Montreal, Canada.
- Hansen, S. W. (2019): “Investigation of the StationMar Concept to Validate the Principle of the Structure and Find Corresponding Challenges to Develop a Functional System”. Master’s thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway.
- Kiryu, P.O., Morooka, C.K., Jaculli, M.A., Leira, B.J., Sangesland, S. (2021): “Dynamic Behaviour of a Reduced Heave Motion Platform for Offshore Wind Tower”, 26<sup>th</sup> International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2021), ABCM, Congresso Virtual, Florianópolis, SC, Brasil.
- Lopez, C.P. (2014): “MATLAB Differential Equations”. ISBN 978-1-4842-0311-8, Springer Science and Business Midia. Publ. Apress, New York, USA.
- Grillo, N.L. (2022): Introdução ao Estudo de Vibrações Mecânicas, Editora Edgard Blücher Ltda.
- Jaculli, M.A., Leira, B.J., Sangesland, S., Morooka, C.K. and Mendes, J.R.P. (2020): “Dynamic Behavior of A Novel Heave-Compensated Floating Platform for Well Interventions”, 11<sup>th</sup> International Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE), Virtual Conference.
- Jaculli, M. A., Leira, B.J., Sangesland, S., Morooka, C.K. and Kiryu, P.O. (2023): “Dynamic Response of a Novel Heave-Compensated Floating Platform: Design Considerations and the Effects of Mooring”, Ships and Offshore Structures, Vol. 18, No. 6, pp. 787–797.
- Suzuki, M.J.; Frizzzone, C.M.R.; Morooka, C.K.; Bordalo, S.N. (2007): “Estudo de Procedimentos para Análise da Operação e Projeto de Risers de Produção de Petróleo”, 4º Congr. Bras. de P&D em Petróleo e Gás (PDPETRO), Assoc. Bras. de Pesquisa e Desenvolv. em Petróleo e Gás (ABPG), Campinas–SP.
- Tsukada, R.I.; Yamamoto, M.; Morooka, C.K. (2007): “Análise de Operação da Instalação de Risers e Descida de BOP em Sondas Flutuantes de Perfuração”, 4º Congr. Bras. de P&D em Petróleo e Gás (PDPETRO), Assoc. Bras. de Pesquisa e Desenvolv. em Petróleo e Gás (ABPG), Campinas–SP.
- Yamamoto, M.; Morooka, C.K. (2007): “Dynamic Positioning of Floating Platform Coupled with a Drilling Riser”, 4º Congre. Bras. de P&D em Petróleo e Gás (PDPETRO), Assoc. Bras. de Pesquisa e Desenvolv. em Petróleo e Gás (ABPG), Campinas–SP.