

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



TÍTULO DO TRABALHO:

OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE ANCORAGEM PARA ESTRUTURAS OFFSHORE VIA UMA COMBINAÇÃO DE ANÁLISES NÃO LINEARES DINÂMICAS E ESTÁTICAS EQUIVALENTES

AUTORES:

Gabriel Rocha Domingos¹, Eduardo Nobre Lages¹, Adeildo Soares Ramos Júnior¹, Anderson Takehiro Oshiro², Mauro Costa de Oliveira²

INSTITUIÇÃO:

¹Laboratório de Computação Científica e Visualização, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas; ²Centro de Pesquisa Leopoldo Américo Miguez de Mello, PETROBRAS

OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE ANCORAGEM PARA ESTRUTURAS OFFSHORE VIA UMA COMBINAÇÃO DE ANÁLISES NÃO LINEARES DINÂMICAS E ESTÁTICAS EQUIVALENTES

Resumo

A indústria brasileira de óleo e gás depende fortemente da exploração offshore, utilizando Sistemas de Produção Flutuantes (FPS) em sua operação. Projetar essas estruturas é uma tarefa complexa e que requer muitos recursos devido aos diversos requisitos relacionados à segurança, operação e compatibilidade entre diferentes sistemas da unidade. O sistema de ancoragem, responsável por controlar os deslocamentos do FPS, é um componente crucial para a operação adequada dos risers e do sistema de produção. Projetar um sistema de ancoragem consiste em considerar fatores como posicionamento das âncoras, número de linhas, interferência com o sistema de produção e, além disso, atender a todos os critérios de projeto sob as milhares de condições ambientais tipicamente envolvidas nos projetos de FPS. Modelos computacionais são essenciais para o projeto do sistema de ancoragem, visando simular a dinâmica do FPS via integração numérica. No entanto, esses modelos frequentemente incorrem em altos custos computacionais, tornando a otimização do sistema de ancoragem uma tarefa ainda mais desafiadora e dispendiosa. Uma abordagem alternativa para a otimização do sistema de ancoragem envolve o uso de metamodelos que replicam as características do modelo original, mas com custos computacionais significativamente menores. Investigações sugerem que a utilização dos modelos dinâmicos não lineares originais na etapa inicial de otimização pode definir de forma eficaz as condições ambientais críticas para as etapas subsequentes de otimização. O metamodelo não linear estático é então empregado para o restante da otimização, considerando apenas o subconjunto de condições ambientais críticas definido na primeira etapa. Esta abordagem resulta em soluções viáveis e reduz significativamente o tempo necessário para o projeto do sistema de ancoragem. Um exemplo prático é utilizado para validar a metodologia proposta, demonstrando sua validade e eficiência.

Palavras-chave: Otimização Estrutural, Estruturas Offshore, Sistemas de Ancoragem, Modelos Dinâmicos, Modelos Estáticos Equivalentes.

Abstract

The Brazilian oil and gas industry heavily relies on offshore exploration, using Floating Production Systems (FPS) in its operations. Designing these structures is a complex task that requires extensive resources due to various requirements related to safety, operation, and compatibility between different systems of the unit. The mooring system, responsible for controlling the displacements of the FPS, is a crucial component for the proper operation of risers and the production system. Designing a mooring system involves considering factors such as anchor positioning, the number of lines, interference with the production system, and meeting all design criteria under the thousands of environmental conditions typically involved in FPS projects. Computational models are essential for the design of the anchoring system, aiming to simulate the FPS dynamics through numerical integration. However, these models often incur high computational costs, making the optimization of the mooring system an even more challenging and expensive task. An alternative approach to the optimization of the anchoring system involves the use of metamodels that replicate the characteristics of the original model but with significantly lower computational costs. Investigations suggest that using the original nonlinear

dynamic models in the initial optimization stage can effectively define the critical environmental conditions for subsequent optimization steps. The static nonlinear metamodel is then employed for the remaining optimization, considering only the subset of critical environmental conditions defined initially. This approach results in viable solutions and significantly reduces the time required for the design of the anchoring system. A practical example is used to validate the proposed methodology, demonstrating its validity and efficiency.

Keywords: Structural Optimization, Offshore Structures, Mooring Systems, Dynamic Models, Equivalent Static Models.

Introdução

A indústria offshore de O&G é uma importante atividade econômica para o setor energético brasileiro. Com os avanços de exploração em campos com lâminas d'água cada vez mais profundas, surge a complexa tarefa de projetar os Sistemas de Produção Flutuantes (FPS). Muitos são os desafios envolvidos no projeto dessas estruturas, como: critérios de projeto, segurança, boas práticas de projeto, operação, manutenção, vida útil e, também, muitas horas de trabalho de profissionais altamente qualificados, especialistas no projeto dessas estruturas.

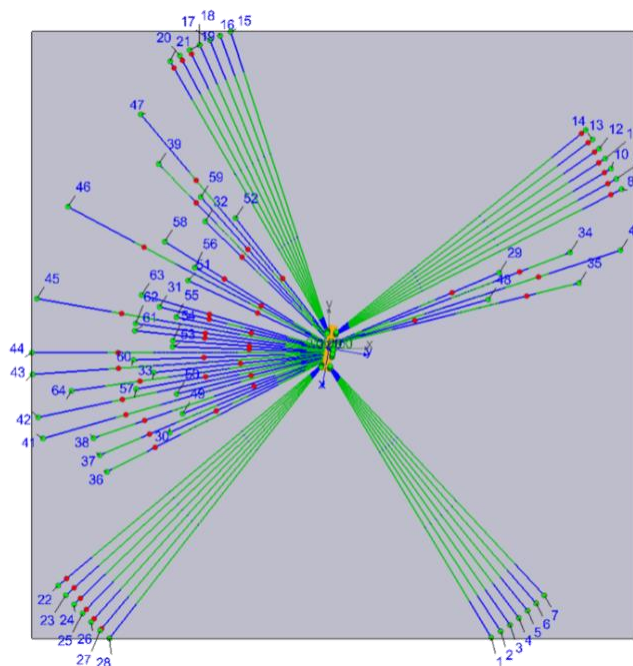


Figura 1 – Modelo estudado neste trabalho: FPSO com 28 linhas de ancoragem instalado em águas ultra profundas.

Neste cenário, atacar o problema por meio de uma abordagem de otimização pode trazer muitas vantagens. É possível traduzir os critérios técnicos em funções matemáticas e empregar um algoritmo de otimização que tem a capacidade de buscar por soluções viáveis para o problema de forma otimizada. Essa abordagem tem o potencial de economizar tempo e esforço manual dos profissionais responsáveis, permitindo uma mudança no paradigma de projeto.

Neste trabalho, um modelo de otimização foi desenvolvido inspirado em um problema trazido diretamente da indústria. O objetivo do problema se resume a encontrar um projeto conceitual do sistema de ancoragem que atenda a uma série de critérios especificados. As linhas de ancoragem têm as posições das âncoras, o número de segmentos, comprimentos, diâmetros e materiais previamente definidos, com apenas os comprimentos das amarras de topo a serem determinados. É importante comentar que informações confidenciais precisaram ser omitidas.

O modelo estudado, apresentado na Fig. 1, é um FPSO composto de 28 linhas de ancoragem (1-28) dispostas em 4 clusters, com 36 risers (29-64). Cada linha do modelo é composta de 7 segmentos de amarras e cabos de poliéster. Apenas os comprimentos das amarras de topo podem ser alterados pelo processo de otimização.

O objetivo deste trabalho não é realizar uma otimização conjunta entre os sistemas de produção e ancoragem, como fizeram Cruces Girón et al. (2014) e Monteiro et al. (2021), nem tampouco reposicionar um FPS devido a critérios de operacionalidade, como abordou Domingos et al. (2023). Entretanto, a metodologia de Análises Estáticas Equivalentes (ESA) de Domingos et al. (2023) foi aplicada a este trabalho.

Modelo de Otimização

A formulação matemática deste modelo é constituída de uma função objetivo – uma função matemática que expressa critérios de projeto a serem minimizados – e um conjunto de restrições – que também são funções matemáticas definidas no espaço das variáveis de projeto. As variáveis de projeto são os parâmetros físicos que serão mudados no modelo para buscar por uma solução ótima. Uma solução é considerada ótima apenas quando a função objetivo atinge um mínimo local ou global e quando este ponto satisfaz todo o conjunto de restrições do modelo de otimização. A formulação matemática do modelo é apresentada abaixo.

$$\begin{aligned}
 \min_{\mathbf{L}} \quad & Dist(\mathbf{L}) = |\mathbf{pos}^{projeto} - \mathbf{pos}^{efetiva}| \\
 \text{sujeito a (101 e 099)} \quad & \frac{\Delta}{SAFOP} - 1 \leq 0; 1 - \frac{yaw}{\{yawMin\}} \leq 0; \frac{yaw}{\{yawMax\}} - 1 \leq 0; \\
 & \frac{T_{amarra \text{ de topo}}^i}{60\%MBL_{amarra \text{ de topo}}} - 1 \leq 0; \frac{T_{pretension}^i}{\{preTension\}} - 1 \leq 0; \\
 & \frac{T_{poliéster \text{ de topo}}^i}{60\%MBL_{poliéster \text{ de topo}}} - 1 \leq 0; \frac{distTop^i}{\{maxDistTop\}} - 1 \leq 0; \\
 & \frac{T_{mudline}^i}{\{maxTensionMudline\}} - 1 \leq 0; \frac{distBottom^i}{\{maxDistBottom\}} - 1 \leq 0; \\
 & 0.5 \leq \frac{L^i}{L_0^i} \leq 1.5; \\
 \text{com} \quad & i = 1, 2, \dots, n.
 \end{aligned} \tag{1}$$

O vetor $\mathbf{L}$ é o vetor das variáveis de projeto, representa o conjunto de comprimentos das amarras de topo, e possui n componentes. Todas as restrições estão sujeitas a duas variações do modelo, denominadas “101” e “099”, descritas adiante no texto. A primeira restrição representa os pontos de deslocamento, que devem estar contidos na Zona Segura de Operação para os Risers (SAFOP). Todas

as variáveis entre colchetes representam parâmetros que podem ser calibrados pelo profissional de acordo com a necessidade do modelo.

As variáveis de projeto do problema são os comprimentos das amarras de topo para cada linha de ancoragem. Neste exemplo, 28 variáveis. Como as funções do modelo de otimização envolvem critérios com diferentes unidades – comprimento, ângulo, tração, entre outros – o modelo de otimização é definido de forma adimensional. Essa estratégia se mostrou eficiente em melhorar a convergência do algoritmo de otimização. Os valores iniciais das variáveis de projeto são definidos como 1,0 e as restrições laterais permitem que os valores iniciais variem 50% para mais ou para menos – de 0,5 a 1,5 – com relação aos valores iniciais.

O conjunto de restrições foi definido de acordo com as necessidades do problema a ser resolvido: os deslocamentos causados pelos casos ambientais devem estar inteiramente contidos dentro da SAFOP; o aproamento do navio não deve exceder valores calibrados; as trações ao longo da linha não devem exceder critérios normativos e de segurança; as pré-trações nas linhas não devem exceder a capacidade dos guinchos de ancoragem; as trações nos *mudlines* não devem exceder a capacidade geotécnica da região; as distâncias entre os cabos de poliéster e o topo/fundo da linha d'água devem obedecer a parâmetros calibrados; e finalmente todos os critérios devem ser atendidos considerando uma variação absoluta de 1% no comprimento de todos os cabos de poliéster (fixando as pré-trações ao variar os comprimentos de poliéster).

Já a função objetivo do problema busca minimizar a distância entre a posição de projeto – especificada pelo profissional – e a posição neutra efetiva – aquela encontrada pelo equilíbrio das forças das linhas atuando no navio. A distância entre essas duas posições não deve ser maior que um valor calibrado.

O algoritmo de otimização utilizado neste trabalho é denominado COBYLA (POWELL, 1994; POWELL, 1998), o mesmo usado por Domingos et al. (2023). O algoritmo tem ordem zero e suporta restrições não-lineares de igualdade e desigualdade, e funciona baseado na construção de aproximações lineares das funções do modelo via simplexes associados a um procedimento de região de confiança. Todo código de otimização foi escrito na linguagem de programação Julia (BEZANSON et al., 2017) utilizando a biblioteca de otimização NLOpt (JOHNSON, 2007).

Metodologia de DA com ESA

A metodologia de Análises Estáticas Equivalentes (ESA) de Domingos et al. (2023) consiste em acelerar o processo de otimização por meio de algumas considerações. A primeira é considerar que todas as ações envolvidas no modelo estrutural são permanentes, isto é, são desprezados os efeitos dinâmicos das ações ambientais que atuam sobre o sistema. Essa consideração introduz diferenças nítidas entre os resultados, e para ajustá-las, a segunda consideração da metodologia é introduzir um fator de majoração k , que aumenta a magnitude dos deslocamentos causados pelas ações estáticas, aproximando os resultados da Análise Dinâmica (DA).

Para encontrar o fator k , é necessário realizar uma simulação dinâmica e uma simulação estática considerando todos os casos ambientais, e comparar os resultados de deslocamento caso a caso. O fator k será igual à máxima razão entre as magnitudes dos deslocamentos dinâmicos e estáticos. Em outras

palavras, ao dividir a magnitude do deslocamento dinâmico do caso ambiental mais crítico pelo fator k , deve-se encontrar a magnitude do deslocamento estático no caso ambiental correspondente.

A terceira consideração envolve o uso de ESA para determinar os casos ambientais críticos para o modelo de otimização. Neste trabalho, entretanto, essa parte da metodologia é ajustada considerando uma DA para a seleção dos casos ambientais críticos, e só após essa seleção o metamodelo estático (ESA) é considerado durante todo o restante da simulação. Em testes realizados com o problema explorado neste trabalho, percebeu-se que em algumas situações os casos ambientais críticos selecionados por meio do metamodelo estático não englobam todos os casos que são realmente críticos ao validar os resultados de maneira dinâmica, e, portanto, a seleção via DA levou a resultados melhores neste exemplo.

Apesar da mudança do uso de ESA para DA, a metodologia de seleção de casos críticos permanece praticamente a mesma: nos primeiros $n + 1$ passos de otimização o algoritmo COBYLA busca apenas construir a estrutura de simplexes necessária para seu funcionamento, sem dar passo em direção a ponto de mínimo. Durante essa fase, o algoritmo estressa cada uma das variáveis de projeto individualmente, e nesta fase realizamos as simulações (neste trabalho, usando DA) considerando todos os casos ambientais. Na $n + 2^{\text{a}}$ iteração, fazemos a análise de cada iteração j anterior, encontrando o fecho convexo dos deslocamentos e reunindo os vértices deste polígono em um subconjunto c_j . Diferentemente do proposto por Domingos et al. (2023), onde o conjunto d que reúne os casos críticos para o restante da simulação era produzido por meio de um histograma de frequências construído com todos os subconjuntos c_j , neste trabalho, o conjunto d é definido simplesmente pela união de elementos únicos dos subconjuntos c_j .

Para referência, do modelo que originalmente continha 4.516 casos ambientais, apenas 148 foram considerados como críticos e compuseram o subconjunto d , representando uma redução de 97% do número original de combinações ambientais do modelo. Além disso, como a SAFOP do modelo deste trabalho constitui um círculo baseado na porcentagem da lâmina d'água do modelo, o próprio domínio seguro é convexo, tornando desnecessário o uso de fechos convexos para a avaliação das restrições de deslocamento máximo do FPS, como proposto na metodologia original de Domingos et al. (2023).

Quando falamos em DA, nos referimos a uma análise quase-estática, considerando apenas a dinâmica da embarcação (desconsiderando a dinâmica das próprias linhas). As condições ambientais atuantes são fruto da combinação de ações derivadas de dados meteoceânicos da bacia de exploração do modelo. Para realizar as simulações, utilizou-se um software próprio chamado DYNASIM (NISHIMOTO et al., 2002; FUCATU et al., 2016), que é um software para análises estáticas e dinâmicas de linhas de ancoragem, produção e alívio.

Resultados

Na metodologia utilizada, primeiro foi necessário realizar $n + 1 = 29$ análises dinâmicas completas para a definição das 148 combinações ambientais críticas, perfazendo um tempo total aproximado de 36 horas, usando uma máquina com sistema operacional Windows 11 64 bits, CPU AMD Ryzen Threadripper PRO 5995WX e 256 GB de RAM instalada. Na mesma máquina, utilizando apenas as 148 combinações ambientais críticas e com a metodologia de ESA descrita anteriormente, todo o restante da

otimização durou apenas 87 minutos, completado em 97 iterações (sem contar as iterações necessárias para definir d). Finalmente, foi realizada uma DA completa para validar os resultados encontrados, com duração total de 75 minutos. Sendo assim, o tempo total de otimização e validação para o modelo estudado foi de aproximadamente 39 horas.

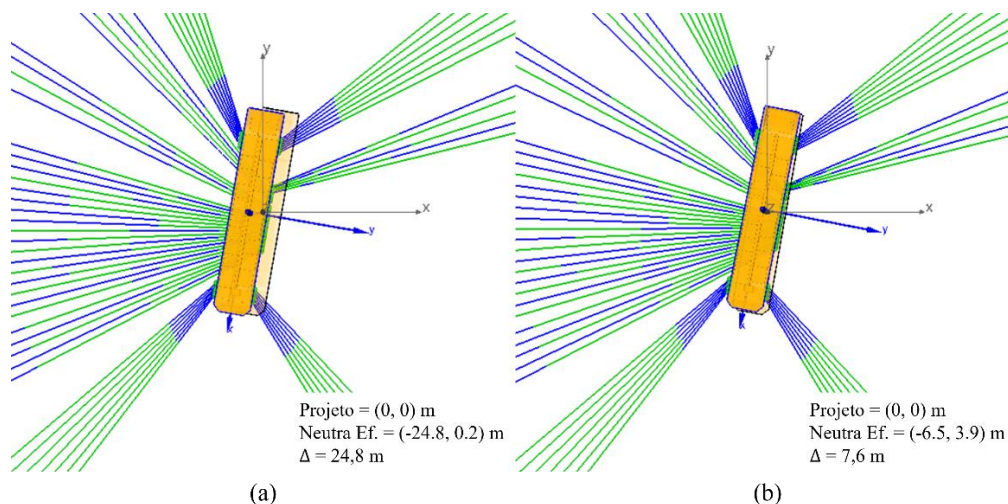


Figura 2 – Posição neutra efetiva (opaca) e posição de projeto (transparente) para os modelo (a) inicial e (b) otimizado.

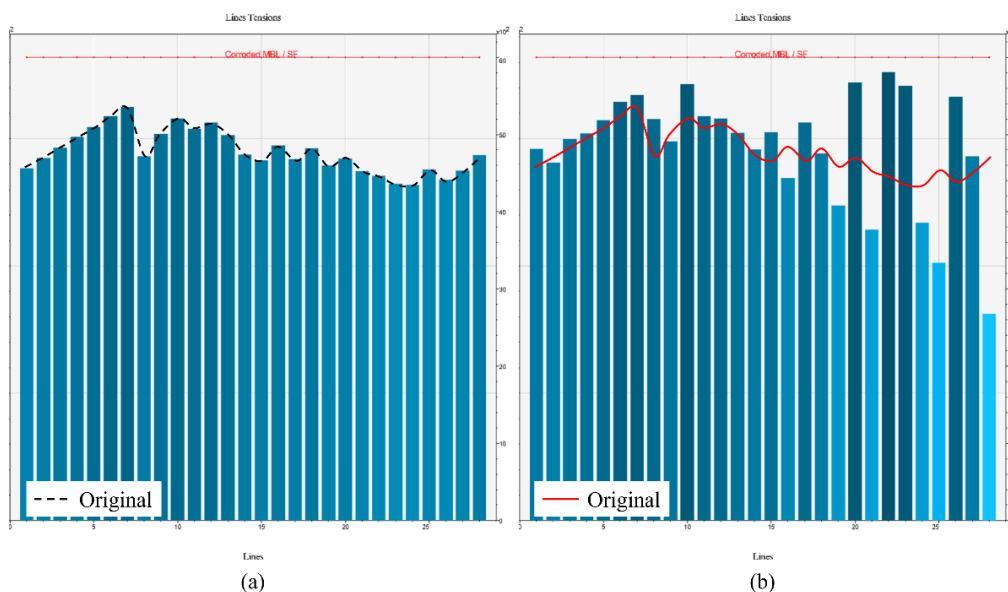


Figura 3 – Trações máximas nas linhas nos modelos (a) inicial e (b) otimizado. Ambos os resultados foram gerados por simulações dinâmicas. As linhas tracejada e vermelha são os picos de tração do modelo original, apenas para melhor comparação com os resultados otimizados.

Os resultados apresentados na Fig. 2(a) mostram a posição inicial neutra efetiva e de projeto. Já na Fig. 2(b), temos a posições do modelo otimizado. Houve uma redução de aproximadamente 69% na distância entre as posições neutra efetiva e de projeto no modelo otimizado (de 24,8 m para 7,6 m).

Deve-se comentar que o próprio modelo inicial já satisfazia todas as restrições de projeto. Entretanto, sua distância entre as posições neutra efetiva e de projeto estava maior do que o desejado. Dessa forma, em 39 horas contínuas, o algoritmo foi capaz de encontrar uma nova posição que continuasse satisfazendo todas as restrições, e melhorasse o critério da distância. Não foi necessário do profissional horas de trabalho manual baseado em tentativa e erro, buscando soluções conforme sua experiência de projetista e outros critérios subjetivos. Ajudar o profissional foi o principal objetivo deste trabalho.

Para o modelo inicial, as trações máximas nas linhas estavam mais bem distribuídas, enquanto no modelo final algumas linhas acabaram sendo mais sobrecarregadas em detrimento a outras. Entretanto, vale ressaltar que as restrições de tração nas linhas foram respeitadas, com o resultado da validação dinâmica apresentado na Fig. 3.

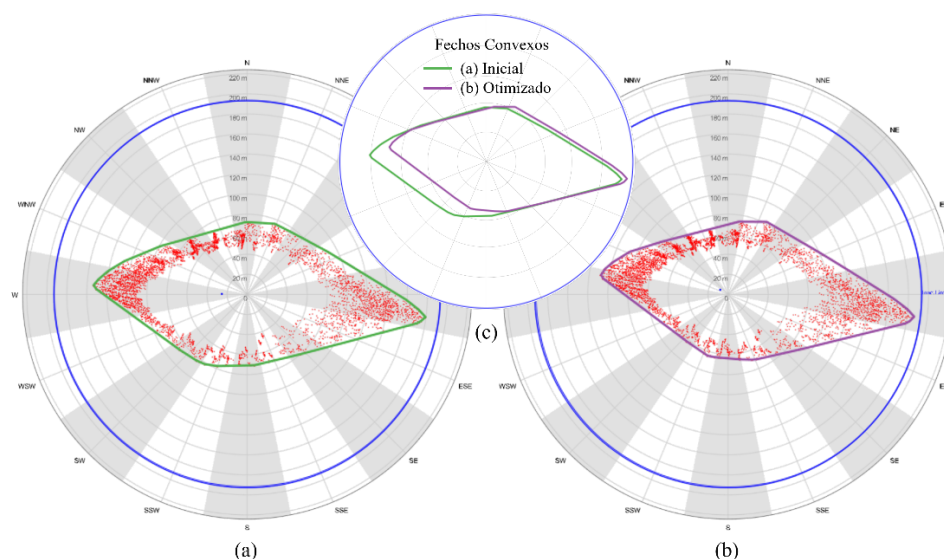


Figura 4 – Deslocamentos máximos nas linhas nos modelos (a) inicial e (b) otimizado, com seus fechos convexas plotados em (c) para comparação: inicial em verde, otimizado em verde. Ambos os resultados foram gerados por simulações dinâmicas.

Já com relação aos deslocamentos do FPS, é possível ver na Fig. 4 que houve um significativo deslocamento dos pontos para a direção És-Sueste, buscando diminuir a distância inicial entre as posições neutra efetiva e de projeto. Apesar dessa mudança geral de deslocamento, os limites continuam sendo respeitados, com todos os pontos (em vermelho) contidos na SAFOP (linha azul).

Conclusões

O projeto de FPS com o auxílio de otimização se mostrou eficiente, eficaz e viável. Os resultados encontrados neste trabalho mostram que é possível ter uma ferramenta capaz de ajudar o profissional projetista a atender os critérios de projeto, com a busca por uma solução por meio de um modelo de otimização, ao invés do processo tradicional baseado em tentativa e erro.

Apesar de mostrar excelentes resultados em alguns aspectos, como os deslocamentos, outros critérios se mostraram menos eficientes, como no caso das tensões, por exemplo. Esse comportamento reforça a

necessidade de continuar o trabalho, estudando melhor os modelos e incorporando ferramentas que aprimorem cada vez mais os resultados, levando a soluções cada vez mais robustas, confiáveis e eficientes.

Finalmente, é importante observar que essa ferramenta tem o potencial de mudar o paradigma de projeto de FPS, permitindo que os profissionais foquem na fase de validação e refino dos resultados, ao invés de gastar tempo nas fases iniciais de projeto, buscando por projetos conceituais viáveis.

Agradecimentos

Os autores agradecem à PETROBRAS e ao CNPq pelo suporte financeiro na elaboração deste trabalho.

Referências Bibliográficas

BEZANSON, J.; EDELMAN, A.; KARPINSKI, S.; SHAH, V. B. Julia: A fresh approach to numerical computing. **SIAM Review**, vol. 59, n. 1, pp. 65–98, 2017.

CRUCES GIRÓN, A. R.; CORRÊA, F. N.; VÁZQUEZ HERNÁNDEZ, A. O.; JACOB, B. P. An integrated methodology for the design of mooring systems and risers. **Marine Structures**, v. 39, pp. 395–423, 2014.

DOMINGOS, G. R.; LAGES, E. N.; RAMOS JÚNIOR, A. S.; OSHIRO, A. T.; OLIVEIRA, M. C. Nonlinear dynamic structural optimization of offshore structures using equivalent static models. In: **Anais do XLIV Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering**, Porto, Portugal, 2023.

FUCATU, C. H.; TANNURI, E. A.; LAGES, E. N.; SILVEIRA, E. S. S.; FERREIRA, F. M. G.; NISHIMOTO, K.; OLIVEIRA, M. C. Dynasim. Registration number: **BR512014001550-5**, 2016.

JOHNSON, S. G. The NLOpt nonlinear-optimization package, 2007. Disponível em: <<https://github.com/stevengj/nlopt>>. Acesso em: 03 ago. 2024.

MONTEIRO, B. F.; BAIOCO, J. S.; ALBRECHT, C. H.; LIMA, B. S. L. P.; JACOB, B. P. Optimization of mooring systems in the context of an integrated design methodology. **Marine Structures**, v. 75, pp. 102874, 2021.

NISHIMOTO, K.; FUCATU, C. H.; MASETTI, I. Q. Dynasim – a time domain simulator of anchored FPSO. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, v. 124, n. 4, pp. 203–211, 2002.

POWELL, M. J. D. A Direct Search Optimization Method that Models the Objective and Constraint Functions by Linear Interpolation, pp. 51–67. **Springer Netherlands**, Dordrecht, 1994.

POWELL, M. J. D. Direct search algorithms for optimization calculations. **Acta Numerica**, v. 7, pp. 287 – 336, 1998.