

# Otimização dos flutuadores de *risers* com catenária em configuração complexa

## Optimization of complex configuration of catenary risers buoyancy modules

Marcos Diego S. V. Arruda<sup>1</sup> ; Michele A. L. Martins<sup>2</sup> ; Eduardo N. Lages<sup>3</sup>

### Resumo

---

Em projetos de *risers*, dutos que conduzem o óleo e gás do poço à unidade de produção, a metodologia tradicional de pré-dimensionamento é baseada em tentativa e erro, o que proporciona a essa atividade uma considerável dependência da experiência do projetista. A utilização de *risers* com catenária em configuração complexa, capazes de permitir a extração de petróleo em condições de mar mais severas, pode agregar maior complexidade a esse processo de pré-dimensionamento, uma vez que novas variáveis de projeto são adicionadas ao problema pelo uso de módulos flutuadores acoplados em um segmento intermediário do *riser*. Este trabalho propõe a aplicação de uma metodologia de otimização dos flutuadores no pré-dimensionamento de *risers* com catenária em configuração complexa na determinação da configuração de equilíbrio estático. Para tanto, o problema de otimização é formulado matematicamente, resultando em um aplicativo computacional que combina o *framework* DOOLINES, um simulador para a análise estática e dinâmica de linhas de ancoragem e *risers*, e da *toolbox* de otimização do MATLAB®, para o gerenciamento desse processo que faz uso de uma técnica híbrida: iniciando com Algoritmos Genéticos e finalizando com Programação Quadrática Sequencial. Um estudo de caso é apresentado e discutido, demonstrando a funcionalidade desse aplicativo que proporciona um resultado tido como o melhor possível, para a medida de eficiência adotada.

**Palavras-chave:** Otimização estrutural. *Risers* com catenária em configuração complexa. Algoritmo Genético. Programação Quadrática Sequencial.

### Abstract

---

Risers are pipes that conduct oil and gas from the subsea wellhead to the floating production unit. For such structures, the pre-sizing approach is usually based on a trial-and-error methodology, fairly dependent on the designer's experience. The use of catenary risers in complex configuration brings the advantage of overcoming the challenges imposed by deep-water fields for oil exploitation. On the other hand, pre-sizing complexity increases as new design variables are added to define the geometrical parameters of the buoyancy modules attached to a riser intermediary segment. This work presents the pre-sizing approach of catenary risers in complex configuration using optimization techniques for the definition of the riser static equilibrium configuration. Thus, the optimization problem is numerically

---

<sup>1</sup> Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas; diegoarruda@lccv.ufal.br.

<sup>2</sup> Pesquisadora do Laboratório de Computação Científica e Visualização da Universidade Federal de Alagoas; micheleagra@lccv.ufal.br.

<sup>3</sup> Professor Associado do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas; enl@lccv.ufal.br.

represented and formulated resulting in a computational application that couples the framework DOOLINES, a simulator for the static and dynamic analysis of mooring lines and risers, with the MATLAB® optimization toolbox, for managing this process, applying a hybrid method, starting with the application of Genetic Algorithms followed by the Sequential Quadratic Programming. A case study is presented and discussed to demonstrate the functionality of this applicative that produces the optimal result according to an objective performance measure.

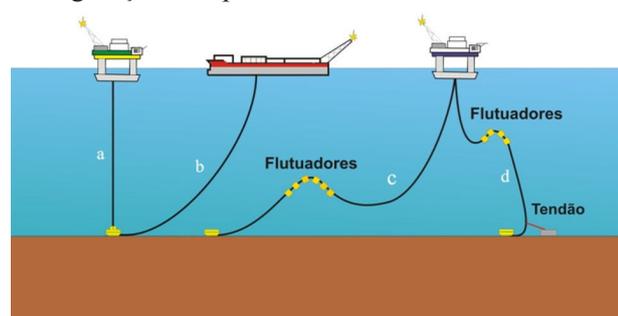
**Key words:** Structural optimization. Catenary riser in complex configuration. Genetic Algorithm. Sequential Quadratic Programming.

## Introdução

*Risers* são estruturas tubulares consideradas esbeltas pela baixa razão entre o diâmetro e o comprimento. Quanto ao material constituinte, em geral, há dois tipos de *risers*: os rígidos e os flexíveis. Os *risers* rígidos, geralmente em aço, são compostos por tubos soldados. Os *risers* flexíveis são produzidos a partir do entrelaçamento de materiais poliméricos, que conferem isolamento e proteção, e de armaduras, que lhes garantem resistência mecânica.

Quanto à configuração geométrica, os *risers* flexíveis podem apresentar-se na forma de catenária livre e catenária complexa. Já os *risers* rígidos, além das configurações possíveis para as linhas flexíveis, podem apresentar a configuração de *riser* tensionado no topo (*Top Tensioned Riser - TTR*), ou vertical, e algumas configurações mais complexas que utilizam boias e tendões (CHAKRABARTI, 2005), como ilustrado na Figura 1.

**Figura 1** - Configurações de *riser*: (a) vertical, (b) em catenária e (c) e (d) em catenária com configuração complexa.



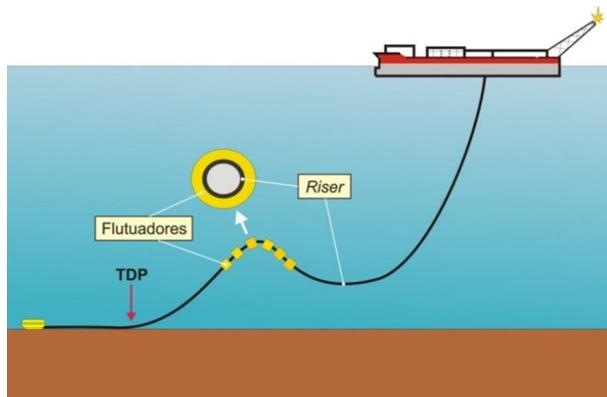
Fonte: Autor

A configuração do *riser* em catenária, por não ter que permanecer retilíneo entre suas conexões (caso da geometria vertical), torna-o capaz de melhor absorver a movimentação da plataforma sem comprometer sua integridade física, dada a sua complacência. Os *risers* complacentes experimentam carregamentos de onda, vento e corrente em condições mais severas – cenário de campos cada vez mais profundos e distantes do continente, como na região do pré-sal brasileiro.

Por outro lado, com o aumento da profundidade de exploração, alguns problemas surgem e podem inviabilizar a utilização de *risers* em catenária simples. Os principais problemas estão relacionados ao excesso de tração no topo, uma vez que todo o comprimento suspenso do *riser* é sustentado pelo ponto de conexão com a plataforma, e à baixa vida útil à fadiga, principalmente na conexão de topo e no ponto de contato com o solo (*touch down point - TDP*) (BELL; CHIN; HANRAHAN, 2005).

Para solucionar esses problemas, uma das alternativas para a configuração do *riser* em catenária é sua forma complexa (BAI, 2001). Sua geometria é adquirida, por exemplo, pela adoção de um conjunto de módulos flutuadores, dispostos em uma região intermediária da linha, que pelo empuxo atuante traz benefícios à dinâmica da estrutura (Figura 2).

**Figura 2** - Configuração de *riser* em catenária com configuração complexa através da adoção de flutuadores.



Fonte: Autor

Quanto ao dimensionamento de *risers*, esse deve ser realizado de modo a garantir os requisitos funcionais devidos aos carregamentos correspondentes ao meio interno (fluido transportado), ao meio externo, às cargas ambientais provenientes de ondas e correntes e movimentos da unidade flutuante durante a vida útil de projeto. Procedimentos para a adequada realização desse dimensionamento encontram-se regulamentados por normas internacionais, a exemplo da API-RP-2RD (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 1998) e da DNV-OS-F201 (DET NORSKE VERITAS, 2001).

Froufe (2006) fez uma análise comparativa de critérios de dimensionamento de *risers* com base nas recomendações apresentadas pelas normas ABS (AMERICAN BUREAU OF SHIPPING, 2005), DNV (DET NORSKE VERITAS, 2001) e API (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 1999). Observou-se que cada norma apresenta suas considerações de carregamento de forma diferente, mas são basicamente equivalentes, levando-se em consideração cargas estáticas e dinâmicas no projeto dos *risers*. Além disso, ressaltou ainda que a filosofia entre elas é equivalente, embora as formulações não sejam as mesmas.

A geometria diferenciada característica do *riser* em catenária com configuração complexa agrega uma maior dificuldade no pré-dimensionamento desse tipo de estrutura, uma vez que o mesmo passa a depender da definição de variáveis de projeto adicionais relacionadas aos flutuadores, a exemplo do comprimento do segmento, do diâmetro dos módulos, do espaçamento entre os módulos, da densidade do material e do posicionamento desses dispositivos ao longo do *riser*. Seguindo uma metodologia tradicional de projeto, seriam analisadas configurações formadas a partir de diferentes combinações dessas e de outras variáveis de projeto, por tentativa e erro, até que se alcançasse uma configuração viável técnica e economicamente.

Devido à grande quantidade de variáveis envolvidas no projeto conceitual desse tipo de estrutura, são inúmeras as possibilidades de configurações possíveis, tornando a metodologia tradicional de projeto ineficiente e podendo conduzir fatalmente a projetos inviáveis. Nesse contexto, a utilização de uma metodologia de otimização no pré-dimensionamento desse tipo de *riser* surge como uma alternativa mais apropriada, capaz de conduzir a uma configuração geométrica que, além de viável, é ótima segundo a medida de eficiência desejada.

Este trabalho tem como objetivo empregar uma metodologia para o pré-dimensionamento de *risers* em catenária com configuração complexa aplicando otimização híbrida, combinando-se Algoritmos Genéticos e Programação Quadrática Sequencial. São consideradas apenas restrições com base na configuração de equilíbrio estático. Essa configuração ótima é admitida como condição inicial para a análise dinâmica ainda prevista na metodologia de projeto de *risers*. Como ferramenta numérica para experimentação dessa metodologia, é desenvolvido um aplicativo computacional que combina o *framework* DOOLINES (SILVEIRA; LAGES; FERREIRA, 2012) – para a análise estática do *riser* – e a *toolbox* de otimização do MATLAB®.

## Referencial Teórico

Em projetos conceituais de *risers*, com a motivação de superar os complexos problemas de dimensionamento com relativa rapidez e eficiência, alguns estudos já foram desenvolvidos abordando a aplicação de técnicas de otimização na prática de projeto.

Vieira (2008) abordou o dimensionamento de um *riser* em catenária *lazy-wave*, configuração que também adota um trecho flutuado, utilizando a metodologia de otimização por algoritmos genéticos. A ferramenta computacional desenvolvida foi aplicada em três etapas: uma avaliando uma configuração pré-definida aos limites de aplicação em um determinado cenário, outra para definir os materiais empregados em uma determinada configuração e, a última, incluindo a análise dinâmica da linha. A função objetivo utilizada foi o custo dos componentes do *riser*, tendo como restrições o ângulo no topo, tração e tensões ao longo do *riser*, as quais receberam a denominação de restrições de comportamento.

Vieira (2009) apresentou um estudo comparativo sobre métodos de otimização bio-inspirados aplicados a *risers* em catenária. Para isso foi desenvolvida uma ferramenta computacional que possibilitou o estudo empregando-se três métodos: Sistema Imunológico Artificial (SIA), Algoritmos Genéticos (AG) e Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization*- PSO). O SIA apresentou melhores resultados em termos do número de avaliações necessárias para a convergência do processo de otimização. A função objetivo adotada também foi representativa do custo do material do *riser*, buscando-se minimizar o volume de flutuador necessário para atender às restrições impostas, semelhante ao trabalho supracitado.

A aplicação de *risers* em catenária *lazy-wave* conectadas a uma unidade de produção do tipo FPSO (*Floating, Production, Storage and Offloading*), que apresenta maior capacidade operacional na exploração em águas ultraprofundas,

foi abordada por Andrade et al. (2010). Nesse estudo foram analisadas todas as etapas do processo de dimensionamento: análise de carregamento extremo, de instalação, de interferência e de fadiga. A otimização permitiu a diminuição do tempo total de projeto, pois diminuiu o número de ciclos demandados pela metodologia tradicional.

Tanaka e Martins (2011) também trabalharam com otimização de *risers* rígidos com foco em catenárias *lazy-wave*. Nesse estudo foram comparadas diferentes funções objetivo, das quais a minimização da máxima amplitude de tensão dinâmica apresentou melhores resultados, apesar de todas as demais apresentarem configurações viáveis: minimização da máxima tensão estática ao longo do *riser* e minimização do custo do material. Foram adotadas como restrições: raio de curvatura mínimo, tração mínima e máxima ao longo do *riser*, ângulo entre o *riser* e a vertical no topo e tração máxima nesse mesmo ponto (motivada pela capacidade de carga da unidade flutuante).

## Aspectos de Otimização

### *Estrutura de um problema de otimização*

Otimização é a ação de se obter o melhor resultado para um determinado problema sobre dadas circunstâncias. Com a modelagem de um problema desse tipo em termos de uma função matemática, dependente de variáveis de decisão, otimização pode ser definida como o processo de achar as condições que resultem no máximo ou mínimo valor para essa função (RAO, 2009).

A forma canônica de um problema de otimização consiste em

$$\text{Achar } \arg \min f_{obj}(X) \quad (1)$$

tal que

$$g_j(X) \leq 0 \text{ para } j = 1, \dots, n_g \quad (2)$$

$$h_k(X) = 0 \text{ para } k = 1, \dots, n_h \quad (3)$$

$$lb \leq X \leq ub \quad (4)$$

onde  $\mathbf{X}$  é o vetor que agrega as  $n$  variáveis de decisão,  $fobj(\mathbf{X})$  é a função objetivo,  $g_j(\mathbf{X})$  é a  $j$ -ésima restrição de desigualdade,  $n_g$  é o número de restrições de desigualdade,  $h_k(\mathbf{X})$  é  $k$ -ésima restrição de igualdade,  $n_h$  é o número de restrições de igualdade e  $lb$  e  $ub$  são, respectivamente, os vetores dos limites inferior e superior da variável  $\mathbf{X}$ .

### Algoritmos Genéticos

O desenvolvimento dos Algoritmos Genéticos (AG) surgiu da ideia de formular matematicamente a teoria de que indivíduos mais adaptados ao meio em que vivem possuem maior probabilidade de sobrevivência e, conseqüentemente, de reprodução (GOLDBERG, 1989; HOLLAND, 1975).

Esse mesmo processo acontece na solução de um problema de otimização com base em algoritmos genéticos. A cada passo, os algoritmos genéticos trabalham com um conjunto de soluções para o problema, que é denominado geração. Como se trata de um processo evolutivo, são selecionados aqueles indivíduos – no caso do presente trabalho, configurações de risers – que apresentam melhores resultados, para que esses originem descendentes de uma nova geração. Isso se repete até que um critério de parada é atingido. A aleatoriedade está presente nos passos dos algoritmos genéticos e é um de seus pontos fortes: sua capacidade de modificar de maneira aleatória algumas características de uma solução, em algumas etapas do processo, evita que a otimização fique restrita a um mínimo local.

### Programação Quadrática Sequencial

A Programação Quadrática Sequencial (*Sequential Quadratic Programming*-SQP) é um dos mais recentes métodos de otimização desenvolvidos, como também um dos que apresentam melhores resultados (RAO, 2009).

Aplicada em problemas de otimização não lineares e com restrições, a SQP é considerada um

método por aproximação, pois sua fundamentação consiste em aproximar a função objetivo por um modelo quadrático e linearizar as restrições não lineares. Dessa forma, o problema é transformado em um subproblema de programação quadrática, de mais simples resolução, e a direção de busca é dada pelo vetor gradiente.

### A Análise Estrutural

#### *A análise do problema*

Em relação aos carregamentos atuantes, os risers são submetidos principalmente a ações resultantes da interação fluido-estrutura, como ações impostas por ondas e correntes marinhas, assim como o próprio movimento da plataforma a qual eles estão conectados. Também são considerados os esforços provocados pela força restauradora de contato com o solo e o peso próprio da estrutura (FERREIRA, 2005). No caso específico do presente trabalho, apenas os carregamentos estáticos são considerados, sendo eles: peso próprio, empuxo, corrente marinha e a interação com o solo.

No presente estudo, a avaliação estática do riser em catenária com configuração complexa considera que o mesmo consiste em uma estrutura com rigidezes axial e à flexão, porém livre à torção. Quanto às condições de contorno, o duto possui suas conexões fixas à translação, sendo que, na base, a conexão com o poço é livre à rotação e, no topo, a conexão com a unidade flutuante é realizada por meio de um apoio elástico.

#### *O framework DOOLINES*

O DOOLINES (*Dynamics of Offshore Lines*) é um *framework* orientado a objetos para análise não linear de estruturas marinhas esbeltas que apresentam o comportamento de cabos (SILVEIRA; LAGES; FERREIRA, 2012).

A característica de ser um *framework* indica que o DOOLINES é um sistema semicompleto,

sendo necessária uma aplicação para lhe instanciar – alguém que o acione, tornando-o concreto, como é o caso do aplicativo desenvolvido neste trabalho. Alguns aplicativos já foram desenvolvidos com o DOOLINES, a exemplo do programa DYNASIM (NISHIMOTO; FUCATU; MASETTI, 2002), um simulador de estruturas *offshore* que analisa de forma integrada a unidade flutuante de produção, as linhas de ancoragem e os *risers*.

O DOOLINES possui como suporte numérico de discretização espacial do elemento estrutural, no caso as linhas de ancoragem e os *risers*, o Método dos Elementos Finitos (por exemplo ZIENKIEWICZ; TAYLOR, 2005), com a formulação proposta por Ghadimi (1988) para a descrição das forças internas em cada elemento finito.

Emprega-se a técnica de Relaxação Dinâmica (OTTER; DAY, 1960) para a análise estática não linear realizada pelo DOOLINES. De um modo geral, essa técnica consiste em resolver um problema estático transformando-o, artificialmente, em um problema dinâmico amortecido. A solução estática é a solução limite desse problema amortecido.

## Modelagem do Problema

Neste trabalho, entende-se por modelagem a interpretação do problema real de um *riser* em catenária com configuração complexa, transformando-o em um modelo matemático de forma que possa ser trabalhado pelo aplicativo desenvolvido. São considerados aspectos tanto do problema de otimização quanto da representação numérica do *riser* para ser avaliado pelo DOOLINES.

### Representação numérica

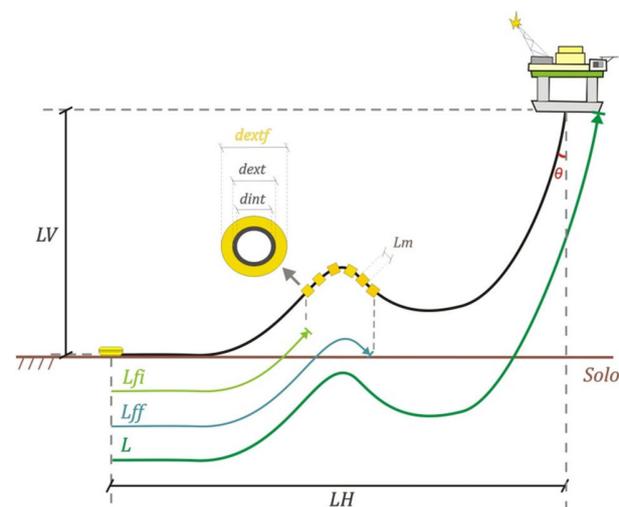
O *riser* em catenária com configuração complexa considerado neste trabalho é caracterizado pela presença de um segmento intermediário dotado de módulos flutuadores (Figura 3). É necessária, portanto, a definição de variáveis que determinem

univocamente a forma (segmentos e materiais) de como o *riser* é composto.

A definição da configuração geométrica do modelo de *riser* considerado depende das dimensões dos diversos parâmetros que compõem o *riser* e o conjunto de módulos flutuadores: diâmetro interno (*dint*), diâmetro externo (*dext*), diâmetro dos módulos flutuadores (*dextf*), comprimento de cada módulo (*Lm*), comprimento de arco inicial dos flutuadores (*Lfi*), comprimento de arco final dos flutuadores (*Lff*), comprimento total da linha (*L*) e ângulo de topo do *riser* em relação à vertical ( $\theta$ ).

Adicionalmente, o ambiente de instalação fornece: projeção vertical (*LV*), considerada a altura de lâmina d'água; projeção horizontal (*LH*) e solo, considerado um plano horizontal.

**Figura 3** - Parâmetros de projeto do modelo de *riser* em catenária com configuração complexa.



Fonte: Autor

### Variáveis de projeto

Para um determinado local de instalação, o ideal para um trabalho de otimização seria deixar como variáveis de projeto todos os parâmetros geométricos e propriedades dos materiais do *riser*. Porém, segundo Tanaka (2009), o custo

computacional para a otimização desse porte se tornaria demasiadamente grande. O aumento do tempo para o processo de otimização pode ser exponencial, prejudicando a velocidade da resposta. Por essa razão, é necessário estabelecer algumas simplificações para que o trabalho se realize de maneira satisfatória, deixando como variáveis de projeto aquelas de maior influência e fixando valores para as menos representativas.

Para este trabalho, são adotadas como variáveis de projeto a posição inicial dos flutuadores ( $L_{fi}$ ) e a posição final desses elementos ( $L_{ff}$ ). Essas variáveis implicam no posicionamento e no comprimento do conjunto de módulos flutuadores. Logo, o comprimento total do segmento de riser com flutuadores é dado pela diferença entre essas variáveis ( $L_{ff} - L_{fi}$ ) e a posição desse segmento ao longo do riser é definida a partir do comprimento de arco inicial  $L_{fi}$ .

### Função objetivo

Diante de um problema de otimização de um riser em catenária com configuração complexa e definidas as variáveis de projeto como sendo  $L_{fi}$  e  $L_{ff}$ , o objetivo é encontrar a melhor solução de maneira que essas variáveis impliquem em um resultado ótimo. A função objetivo adotada neste trabalho consiste no volume total de flutuador utilizado, que está relacionado proporcionalmente ao custo do mesmo. Minimizar o custo de material é uma forma bastante usual na otimização estrutural, e esse aspecto foi considerado nos trabalhos de Vieira (2008), Pina et al. (2008) e Vieira (2009) – que também tratam de otimização de risers. Portanto, a função objetivo é dada por

$$f_{obj} = (L_{ff} - L_{fi})(dextf^2 - dext^2) \quad (5)$$

Como o diâmetro externo do flutuador ( $dextf$ ) e o diâmetro externo do riser ( $dext$ ) são admitidos constantes, a função objetivo pode ser simplificada como

$$f_{obj} = L_{ff} - L_{fi} \quad (6)$$

### Restrições

Restrições são critérios de engenharia que delimitam os valores possíveis das variáveis de projeto de forma a tornar seus resultados mais próximos da realidade.

Inicialmente são definidas três restrições de natureza não linear, comumente encontradas na literatura. Duas são critérios de integridade estrutural, sendo a primeira a tensão máxima de serviço ao longo do riser ( $T_{max}$ ), que não pode ultrapassar a tensão máxima admissível do aço ( $T_{adm}$ ), ou seja,

$$T_{max} \leq T_{adm} \quad (7)$$

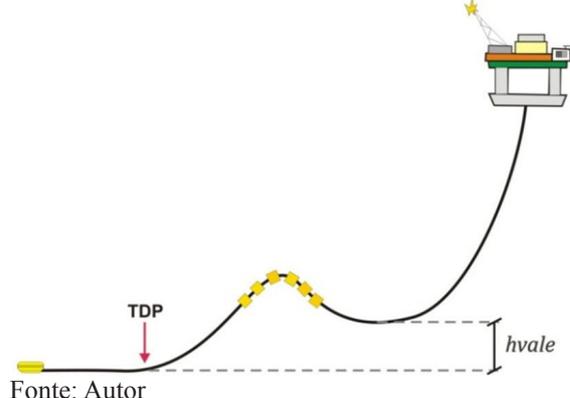
A segunda, também conhecida como *payload*, consiste na restrição quanto ao máximo esforço de tração que o riser pode exercer na conexão com a unidade flutuante ( $Tracao_{Topo}$ ), já que esta possui uma capacidade de carga máxima ( $Tracao_{Topomax}$ ), o que leva a

$$Tracao_{Topo} \leq Tracao_{Topomax} \quad (8)$$

A última restrição não linear é a cota mínima do vale do riser em relação ao solo ( $h_{valemín}$ ). Essa restrição (Figura 4) é denominada altura do vale ( $h_{vale}$ ) e garante que a linha não entra em contato com o solo no trecho após os flutuadores, evitando assim um segundo ponto de contato com o solo (TDP). Portanto,

$$h_{vale} \geq h_{valemín} \quad (9)$$

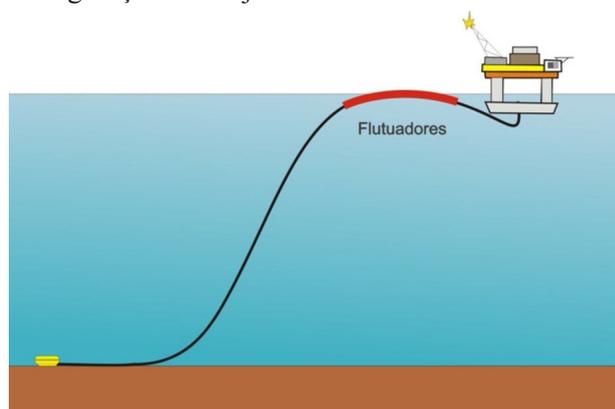
Figura 4 - Indicação da altura do vale.



A partir da avaliação de exemplos preliminares de *risers* em catenária com configuração complexa, são incorporadas mais três restrições relevantes que não são diretamente abordadas na literatura.

Com base nessa avaliação, percebe-se que o posicionamento dos flutuadores muito próximo à conexão superior gera configurações inadequadas, nas quais o *riser* chega a atingir a superfície marítima. Esse tipo de situação deve ser evitado por razões técnicas (Figura 5).

**Figura 5** - *Riser* em catenária com configuração complexa com flutuadores próximos do topo: configuração indesejável.



Fonte: Autor

Assim, é definido um valor percentual que, associado à altura de lâmina d'água, limita a profundidade mínima em que os flutuadores podem ser instalados, sendo, portanto, o limite superior das variáveis de projeto. Inicialmente esse valor é estabelecido em 50%. Analogamente, o limite inferior definido corresponde ao comprimento de um elemento finito da malha (*Lelem*) para o posicionamento inicial (*Lfi*), obtendo-se a restrição

$$Lelem \leq Lfi \leq L - 0,5LV \quad (10)$$

e de dois elementos para o posicionamento final (*Lff*) do trecho flutuado, ou seja,

$$2Lelem \leq Lff \leq (L - 0,5LV) + Lelem \quad (11)$$

As simulações preliminares revelam ainda que o comprimento do trecho flutuado ótimo nunca atinge grandes valores. Assim, define-se também como restrição que o valor máximo que o comprimento dos flutuadores pode assumir é uma taxa de 20% do comprimento total do *riser*, ou seja,

$$Lff - Lfi \leq 0,2L \quad (12)$$

Se após simular um caso o valor ótimo encontrado estiver dentro desse intervalo, esse valor, necessariamente, é um ótimo global. Essa restrição promove eficácia no processo de otimização, pois evita o custo computacional da análise de modelos que não trarão um bom resultado.

Quanto às restrições lineares, neste trabalho elas são puramente geométricas. Além das apresentadas nas Eqs. 10, 11 e 12, há a exigência de que a posição inicial dos flutuadores deve ser menor que sua posição final, ou seja,

$$Lfi \leq Lff \quad (13)$$

## O Aplicativo

O aplicativo desenvolvido neste trabalho é composto pela incorporação do *framework* DOOLINES na *toolbox* de otimização do MATLAB®, e tem como objetivo encontrar uma configuração de *riser* com o menor volume possível de flutuador e que seja capaz de atender às restrições impostas. Para tanto, de acordo com a metodologia implementada, é feita uma busca por este resultado que consiste basicamente em propor soluções viáveis e, a partir de seus respectivos resultados, refiná-las tendo em vista a obtenção do resultado ótimo.

### As funções de otimização

São utilizadas duas funções de otimização da *toolbox* do MATLAB® para esta aplicação: *ga* e *fmincon*, em uma abordagem conhecida como metodologia híbrida. A primeira encontra

o mínimo de uma função através dos Algoritmos Genéticos, que é aplicada inicialmente no processo de otimização por possuir a capacidade de examinar todo o domínio de soluções possíveis, procurando assim pela região que apresenta melhores resultados a nível global. Após sua finalização, o resultado é refinado por meio da função *fmincon*, que tem a propriedade de apresentar um resultado ótimo com maior precisão, a partir do valor inicial obtido pela *ga*, aplicando o método SQP para a resolução de problemas de otimização não linear com restrições lineares e não lineares, de igualdade e desigualdade, a exemplo do problema apresentado neste trabalho.

### *A relação entre os sistemas MATLAB® e DOOLINES*

A relação entre o MATLAB®, que gerencia o processo de otimização, e o DOOLINES, que realiza a análise estática de cada modelo, acontece da seguinte maneira: com os parâmetros que caracterizam a configuração da linha, gerados e fornecidos pelo aplicativo, o modelo é montado em um arquivo de entrada de dados para o simulador. Após a simulação da análise estática, um arquivo de saída é elaborado com as informações de interesse como tensão máxima de serviço ao longo do *riser*, tração no topo e dados necessários para o cálculo da altura do vale.

### *O fluxo do aplicativo*

O procedimento inicial da aplicação é a definição dos parâmetros geométricos do problema, das propriedades dos materiais constituintes do *riser* e dos parâmetros de origem ambiental. Com essas informações é feita a modelagem do *riser* em catenária simples. Uma análise estática é realizada nesse tipo de configuração como forma de verificar se há a necessidade de lançar mão do *riser* em catenária com configuração complexa, ou seja, essa análise é realizada preliminarmente

ao início do processo de otimização. Dessa forma, se a tensão máxima de serviço não ultrapassar a tensão admissível do material e a tração no topo for menor que o *payload* da unidade flutuante, não é necessária a utilização de flutuadores para minimizar esse efeito, assim, para as condições ambientais e de utilização do *riser* estabelecidas, a opção em catenária já atende aos critérios de projeto.

Caso o critério estrutural do *riser* não seja atendido pelo arranjo em catenária simples, o processo de otimização é iniciado: a função de otimização em uso propõe uma possível solução, essa é transformada em um modelo para ser analisado pelo DOOLINES e, com os resultados obtidos, a solução é avaliada quanto a viabilidade em relação às restrições impostas. Esse processo se repete até que um critério de parada seja atingido, ou seja, quando o resultado ótimo é encontrado.

### **Estudo de caso**

Com a finalidade de demonstrar a funcionalidade da aplicação desenvolvida para otimização de *risers* em catenária com configuração complexa, um estudo de caso é apresentado.

### **Dados de entrada**

#### *Dados do problema*

Os dados de entrada desta etapa são definidos com base na literatura, por meio de recomendações técnicas e visando um ambiente semelhante ao encontrado no pré-sal brasileiro. O comprimento total do *riser* ( $L$ ) é definido de forma que um *riser* modelado em catenária simples atenda à restrição do ângulo no topo recomendada: entre 5° e 18°.

Dessa forma, os dados iniciais das informações referentes ao ambiente de instalação e ao *riser* são apresentados na Tabela 1.

**Dados do processo de otimização**

Para o processo de otimização, realizado inicialmente por meio de um algoritmo genético através da função *ga*, são definidos os valores dos parâmetros desse método: função objetivo (Eq.6); número de variáveis de decisão (duas, *Lfi* e *Lff*); matriz e vetor representativos das restrições de desigualdade lineares (Eqs. 12 e 13); vetores representativos dos limites inferiores e superiores das variáveis de decisão (Eqs. 10 e 11); nome do arquivo com as restrições não lineares e nome da estrutura de opções de *ga* denominada *gaoptimset*, onde, por exemplo, são definidas as características

dos operadores de seleção e reprodução.

A definição de alguns parâmetros de otimização é feita com base no estudo da influência de cada parâmetro dos algoritmos genéticos realizado por Tanaka (2009), a saber: número de gerações e de indivíduos, função de seleção, probabilidade de reprodução, número de indivíduos de elite, função de mutação e probabilidade de mutação. Os demais parâmetros do processo adotados são *default* de *gaoptimset*. Na Tabela 2 apresentam-se os referidos dados organizados segundo a estrutura da *toolbox* de otimização do MATLAB®.

**Tabela 1** - Dados para modelagem do *riser*.

| <b>Dados geométricos</b>                              |                     |                   |
|---|---------------------|-------------------|
| Projeção vertical do <i>riser</i> – <i>LV</i>         | 2200,0              | m                 |
| Projeção horizontal do <i>riser</i> – <i>LH</i>       | 4000,0              | m                 |
| Comprimento do <i>riser</i> – <i>L</i>                | 5200,0              | m                 |
| Diâmetro interno do <i>riser</i> – <i>dint</i>        | 0,181               | m                 |
| Diâmetro externo do <i>riser</i> – <i>dext</i>        | 0,219               | m                 |
| Comprimento do módulo flutuador – <i>Lm</i>           | 0,50                | m                 |
| Diâmetro do módulo flutuador – <i>dextf</i>           | 1,00                | m                 |
| <b>Dados do material - aço X-52</b>                   |                     |                   |
| Peso específico – <i>gaço</i>                         | 78,5                | kN/m <sup>3</sup> |
| Módulo de Young – <i>MY</i>                           | 210000000           | kN/m <sup>2</sup> |
| Tensão de escoamento – <i>fy</i>                      | 359000              | kN/m <sup>2</sup> |
| Coeficiente de segurança                              | 1,5                 | -                 |
| Tensão admissível – <i>Tadm</i>                       | 239333,33           | kN/m <sup>2</sup> |
| <b>Dados do material - módulos flutuadores</b>        |                     |                   |
| Peso específico – <i>gflut</i>                        | 5,529               | kN/m <sup>3</sup> |
| <b>Dado para definição dos segmentos</b>              |                     |                   |
| Comprimento do elemento – <i>Lelem</i>                | 100,0               | m                 |
| <b>Dados ambientais – perfil da corrente marítima</b> |                     |                   |
| Profundidade (m)                                      | Velocidade<br>(m/s) | Ângulo            |
| 0,0   | 2,0                 | 0,0               |
| 2200,0  | 0,0                 | 0,0               |

Fonte: Dados do autor

**Tabela 2** - Dados de entrada da função de otimização *ga* via *gaoptimset*.

| Parâmetro                 | Descrição   | Valor                     |
|---------------------------|---|---------------------------|
| <i>CreationFcn</i>        | População inicial                                   | <i>gacreationuniform</i>  |
| <i>CrossoverFcn</i>       | Função que realiza o cruzamento                     | <i>crossoverscattered</i> |
| <i>CrossoverFraction</i>  | Probabilidade de reprodução                         | 0,9                       |
| <i>DistanceMeasureFcn</i> | Função de medida da distância de indivíduos         | <i>phenotype</i>          |
| <i>EliteCount</i>         | Número de indivíduos de elite                       | 2                         |
| <i>FitnessLimit</i>       | Valor limite de aptidão                             | -inf                      |
| <i>FitnessScalingFcn</i>  | Função que escala os valores da função de aptidão   | <i>fitscalingrank</i>     |
| <i>Generations</i>        | Número de gerações                                  | 30                        |
| <i>HybridFcn</i>          | Função de otimização após o término de <i>ga</i>    | <i>fmincon</i>            |
| <i>InitialPenalty</i>     | Penalidade inicial                                  | 10                        |
| <i>MigrationDirection</i> | Direção da migração                                 | <i>forward</i>            |
| <i>MigrationFraction</i>  | Fração de indivíduos que migram                     | 0,2                       |
| <i>MutationFcn</i>        | Função de mutação                                   | <i>fmuationuniform</i>    |
| <i>PenaltyFcn</i>         | Fator de atualização de penalidade                  | 100                       |
| <i>PopInitRange</i>       | Variação da população inicial                       | [0;1]                     |
| <i>PopulationSize</i>     | Tamanho da população                                | 50                        |
| <i>SelectionFcn</i>       | Função de seleção                                   | <i>selectionroulette</i>  |
| <i>PenaltyFcn</i>         | Fator de atualização de penalidade                  | 100                       |
| <i>UseParallel</i>        | Processamento paralelo                              | always                    |
| <i>TolFun</i>             | Tolerância para não melhoramento da função objetivo | 10 <sup>-6</sup>          |

**Fonte:** Dados do autor

## Resultados

### *Comentários sobre o processo de otimização*

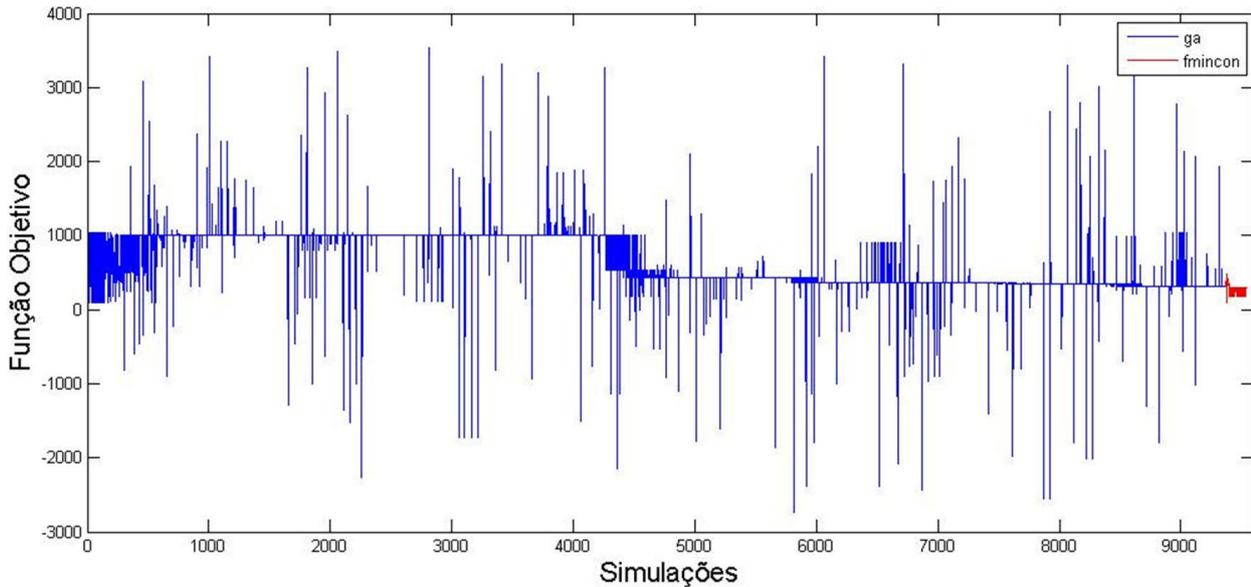
A Figura 6 apresenta o histórico do valor da função objetivo (Eq. 6) durante o processo híbrido de otimização. Verifica-se que até a simulação 9369, as respostas obtidas oscilam significativamente o seu valor: esse comportamento se deve ao funcionamento do algoritmo genético pelos operadores de reprodução e mutação, que combinam

e alteram, respectivamente, de forma aleatória os valores das variáveis na composição de um novo indivíduo. Após a finalização do algoritmo genético, o modelo otimizado apresenta um trecho flutuado de 400 m. Quando o processo de otimização tem continuidade com a função *fmincon*, refinando-se o resultado definido por *ga*, o comprimento do conjunto de flutuadores diminui para 300 m no *riser* otimizado.

Ainda em referência à Figura 6, nota-se a ocorrência de valores negativos para a função objetivo, o que contraria a restrição geométrica que diz que o comprimento de arco inicial do trecho flutuado deve ser menor que o comprimento final desse trecho (Eq. 13). Essas ocorrências indicam que nem sempre a função de otimização *ga* propõe soluções que respeitam as restrições lineares, mas é certo que essas soluções são posteriormente avaliadas quanto à aptidão e, conseqüentemente, são associadas a um baixo valor desse parâmetro.

Ao longo do processo, é possível observar que há alguns patamares aos quais os valores da função objetivo parecem tender. No primeiro, o comprimento do trecho flutuado assume cerca de 1000 m; a partir aproximadamente da simulação 6000, seu comprimento reduz para cerca de 400 m e, já no final, após um decréscimo nas últimas 800 simulações, a função objetivo oscila em torno de 300 m. Assim, observa-se que o algoritmo de otimização trabalha no sentido de sempre reduzir o volume total de flutuadores – conforme esperado.

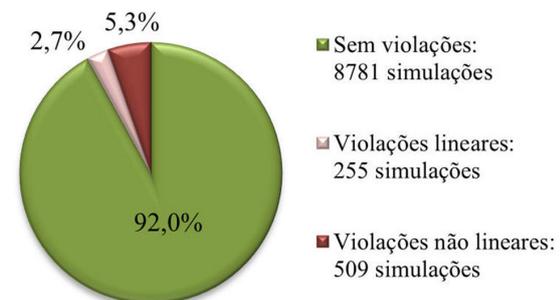
**Figura 6** - Evolução da função objetivo ao longo do processo de otimização.



Fonte: Dados do autor

Para avaliar as restrições e verificar quais são mais difíceis de serem atendidas, contabiliza-se a violação de cada uma delas ao longo do processo. Os resultados gerais obtidos seguem na Figura 7 e, sobre cada restrição individualmente, na Figura 8. É importante lembrar que todo modelo analisado estruturalmente – para serem avaliadas as restrições não lineares – atendeu previamente às restrições geométricas lineares.

**Figura 7** - Quantidade de restrições atendidas e violadas.



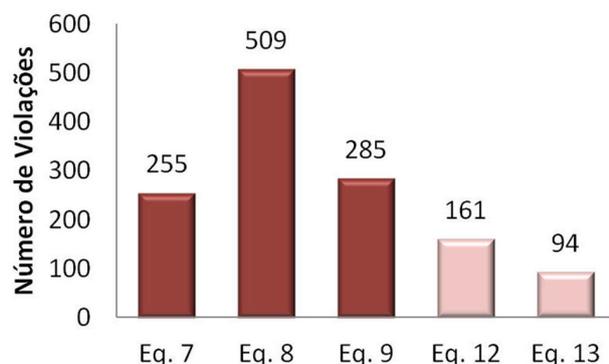
Fonte: Dados do autor

De acordo com a Figura 7 observa-se que o processo de otimização propõe soluções nas quais a grande maioria atende a todos os critérios geométricos e estruturais: 92,0%. Dos 8,0% de modelos que violam alguma restrição, percebe-se que cerca de 1/3 desses (2,7% do total de simulações) não respeita restrições lineares e a maioria, cerca de 2/3 (5,3% do total), viola as restrições não lineares. A minoria de violações lineares se justifica pelo fato de que o algoritmo é capaz de identificar com mais facilidade uma região que não produza resultados viáveis com base no histórico do processo de otimização.

Na Figura 8 são detalhadas as informações sobre as violações das restrições. Nas restrições lineares, o número de violações do critério  $Lfi \leq Lff$  (Eq. 13) é inferior à quantidade de indivíduos que violam o critério  $Lff - Lfi \leq 0,2L$  (Eq. 12). Por serem responsáveis por apenas 2,7% do número total de soluções avaliadas, pode-se dizer que essas restrições não geraram grandes dificuldades na busca pelo resultado ótimo.

Adicionalmente, percebe-se que a restrição não linear de tensão máxima de serviço (Eq. 7) é violada em uma quantidade um pouco inferior que o número de violações do critério de altura do vale (Eq. 9). Quanto ao critério de tração máxima no topo (Eq. 8), destaca-se que em todas as 509 violações de restrições não lineares essa condição não é atendida, sendo a de maior dificuldade para ser contornada.

**Figura 8** - Violações das restrições não lineares e lineares.



Fonte: Dados do autor

### *Análise do riser em catenária simples*

A primeira etapa do aplicativo desenvolvido é a verificação se um *riser* em catenária livre atende aos critérios de tensão máxima de serviço ao longo do *riser*, tração máxima na conexão superior e o ângulo entre essa e a vertical. A Figura 9 apresenta, na coloração azul, a configuração de equilíbrio deste *riser* e a Tabela 3 apresenta os resultados dessa análise preliminar.

**Tabela 3** - Resultados da análise do *riser* em catenária simples.

|                                      |           |                   |
|--------------------------------------|-----------|-------------------|
| Comprimento do <i>riser</i> – $L$    | 5200      | m                 |
| Tensão máxima de serviço – $T_{max}$ | 182036,74 | kN/m <sup>2</sup> |
| Localização de $T_{max}$             | Topo      | -                 |
| Tração no topo – $Tracao_{Topo}$     | 2144,53   | kN                |
| Ângulo no topo – $\theta$            | 18,74     | Graus             |

Fonte: Dados do autor

Da Tabela 3, percebe-se que para esse caso específico a Tabela 4 - Resultados da análise do *riser* em catenária com configuração complexa otimizado em catenária livre respeita o critério da tensão máxima de serviço (menor que 239333,33 kN/m<sup>2</sup>), mas não consegue transmitir um esforço de tração menor que 1500 kN para a unidade flutuante. Assim, torna-se justificável o uso de um trecho flutuado para que o empuxo atuante alivie esse esforço no topo. Quanto às conexões, tanto a da base quanto a do topo estão consoantes com os critérios técnicos: a inferior está na horizontal e a superior em um ângulo próximo de 18°.

### *Análise do riser em catenária com configuração complexa otimizado*

Decorrido o processo de otimização, os parâmetros do *riser* em catenária com configuração complexa otimizado seguem na Tabela 4 e sua configuração de equilíbrio é apresentada na Figura 9.

**Tabela 4** - Resultados da análise do *riser* em catenária com configuração complexa otimizado

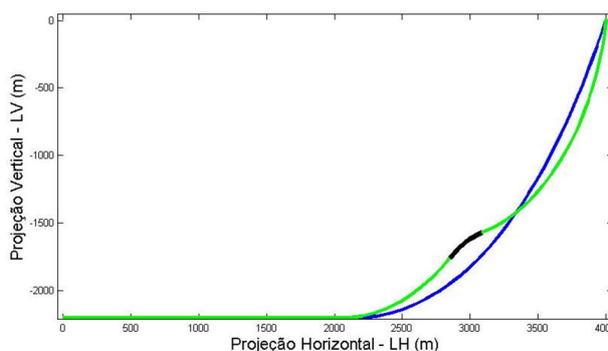
|  |           |                   |
|--|-----------|-------------------|
| Comprimento do <i>riser</i> – $L$        | 5200      | m                 |
| Comprimento do trecho inicial            | 3000      | m                 |
| Comprimento do trecho flutuado           | 300       | m                 |
| Comprimento do trecho final              | 1900      | m                 |
| Tensão máxima de serviço – $T_{max}$     | 218565,45 | kN/m <sup>2</sup> |
| Localização de $T_{max}$                 | Topo      | -                 |
| Tração no topo – $Tracao_{Topo}$         | 1419,76   | kN                |
| Altura do vale – $h_{vale}$              | 755,27    | m                 |
| Ângulo no topo com a vertical – $\theta$ | 4,98      | graus             |

Fonte: Dados do autor

Os resultados do modelo ótimo observados na Tabela 4 confirmam que foi encontrado um *riser* que atende aos critérios estruturais: tensão máxima de serviço, apesar de superior ao modelo em catenária, inferior à admissível (239333,33 kN/m<sup>2</sup>); tração na conexão superior menor que 1500 kN e altura do vale muito superior ao mínimo de 20 m. Percebe-se também que o ângulo do topo com a vertical está dentro do intervalo mínimo recomendado (próximo de 5°). Embora esse quesito não tenha sido imposto como restrição, foi modelado com a finalidade de transmitir uma maior fidelidade ao problema real.

Os comprimentos ótimos dos segmentos também são apresentados e atendem às restrições geométricas (lineares) assim como os objetivos desse processo: o comprimento do trecho flutuado é de 300 m posicionado a partir do comprimento de arco de 3000 m partindo da base ao longo do *riser*.

A Figura 9 apresenta o *riser* otimizado, em verde com trecho flutuado em preto, e o modelo em catenária simples, em azul, para efeito de comparação.

**Figura 9** - *Riser* em catenária com configuração complexa otimizado e *riser* em catenária simples do estudo de caso.

Fonte: Dados do autor

A configuração de equilíbrio do modelo otimizado apresenta-se coerente com os dados de resposta da aplicação (Tabela 4). Pela Figura 9 também é possível observar que o *riser* otimizado possui um comprimento apoiado no solo apenas um pouco inferior do que o *riser* em catenária simples e que o ângulo da conexão com a vertical diminuiu.

A localização do trecho flutuado está consoante com a seguinte ideia: o *riser* em catenária simples, a base do problema, possui um trecho suspenso e um trecho apoiado no solo; se no topo do *riser* é onde se localiza o ponto crítico da estrutura (maiores esforços de tração e tensão), então é justo que os flutuadores sejam dispostos na região suspenso a fim de provocar a diminuição dos esforços no topo, sendo necessário suspender um mínimo do comprimento apoiado por consequência. Dessa forma, é como se o problema se restringisse somente ao trecho suspenso.

## Conclusões

O presente trabalho propôs a aplicação de técnicas de otimização no pré-dimensionamento dos módulos flutuadores de *risers* em catenária

com configuração complexa. Esse propósito, como metodologia de projeto preliminar, decorre do fato de que um *riser* com essa configuração apresenta uma série de variáveis de projeto, dificultando a realização dessa atividade pelo projetista. O aplicativo de otimização desenvolvido e seus resultados apresentados, para um estudo de caso, atestam que essa metodologia é válida, chegando assim em melhores resultados de acordo com uma medida objetiva de eficiência e de maneira rápida e automática.

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP –, da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP – e do Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT – por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCT.

### Referências

- AMERICAN BUREAU OF SHIPPING. *Guide for Building and Classing Subsea Riser Systems*. Houston, 2005.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *API-RP-1111: design, construction, operation, and maintenance of offshore hydrocarbon pipelines (Limit State Design)*. Washington, 1999.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *API-RP-2RD: design of risers for floating production systems (FPSs) and tension-leg platforms (TLPs)*. Washington, 1998.
- ANDRADE, E. Q.; AGUIAR, L. L.; SENRA, S. F.; SIQUEIRA, E. F. N.; TORRES, A. L. F. L.; MOURELLE, M. M. Optimization procedure of steel lazy-wave riser configuration for spread moored FPSOs in deepwater offshore Brazil. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 2010, Houston. *Proceedings...* Houston: Offshore Technology Conference, 2010.
- BAI, Y. *Pipeline and risers*. Houston: American Bureau of Shipping, Elsevier, 2001. v. 3.
- BELL, J. M.; CHIN, Y. D.; HANRAHAN, S. State-of-art of ultra deepwater production technologies. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 2005, Houston. *Proceedings...* Houston: Offshore Technology Conference, 2005.
- CHAKRABARTI, S. K. *Handbook of offshore engineering*. Amsterdam: Elsevier, 2005. v. 2.
- DET NORSKE VERITAS. Offshore standard DNV-OS-F201: dynamic risers. Hovik, 2001.
- FERREIRA, F. M. G. *Desenvolvimento e aplicações de um framework orientado a objetos para análise dinâmica de linhas de ancoragem e de risers*. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió.
- FROUFE, L. *Análise Comparativa de Critérios de Dimensionamento de Risers Rígidos*. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Oceânica) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- GHADIMI, R. A simple and efficient algorithm for the static and dynamic analysis of flexible marine risers. *Computers and Structures*, Elmsford, v. 28, n. 4, p. 541-555, 1988.
- GOLDBERG, D. E. *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Boston: Addison-Wesley Pub, 1989.
- HOLLAND, J. H. *Adaptation in natural and artificial systems*. Michigan: University of Michigan Press, 1975.
- 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, p. 203–211, 2002.
- OTTER, J. R. H.; DAY, A. S. Tidal flow computations. *The Engineer*, London, v. 209, p. 177-182, 1960.
- PINA, A. A.; LIMA, B. S. L. P.; ALBRECHT, C. H.; JACOB, B. P. Parameter selection and convergence analysis of the PSO algorithm applied to the design of risers. In: EngOpt - INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING OPTIMIZATION, 2008, Rio de Janeiro. *Proceedings...* Rio de Janeiro, 2008.
- RAO, S. S. *Engineering optimization: theory and practice*. 4. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.
- SILVEIRA, E. S. S.; LAGES, E. N.; FERREIRA, F. M. G. DOOLINES: an object-oriented framework for non-linear static and dynamic analyses of offshore lines. *Engineering with Computers*, New York, v. 28, n. 2, p. 149-159, 2012.

TANAKA, R. L. *Otimização da configuração de risers rígidos*. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia de Controle e Automação Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, São Paulo.

TANAKA, R. L.; MARTINS, C. A. Parallel dynamic optimization of steel risers. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, New York, v. 133, n. 1, 2011.

VIEIRA, I. N. *Algoritmos Bio-inspirados aplicados à otimização de risers rígidos em Catenária*. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

VIEIRA, L. T. *Otimização de sistemas de risers para exploração de petróleo offshore através de algoritmos genéticos paralelos*. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. *The Finite Element Method*, 6. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2005.

*Recebido em 29 Março 2012- Received on March 29, 2012.*

*Aceito em 3 Julho, 2012 - Accepted on July 3, 2012.*