

6º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Técnicas de otimização aplicadas no dimensionamento de *risers* verticais complacentes

AUTORES:

Michele Agra de Lemos Martins

Eduardo Setton Sampaio da Silveira

Eduardo Nobre Lages

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal de Alagoas

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 6º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 6º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 09 a 13 de outubro de 2011, em Florianópolis-SC. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 6ºPDPETRO.

TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO APLICADAS NO DIMENSIONAMENTO DE RISERS VERTICAIS COMPLACENTES

Abstract

In offshore oil production activities, special pipes, called risers, are employed to connect the wellheads at the sea-bottom to a floating platform unit. The design of risers is a challenging task, due to the continuous increase in exploitation depth, as at pre-salt fields. Conventionally, risers are used in a free-hanging catenary configuration, however at deep and ultra-deep waters the use of such a configuration can become infeasible, due to the excessive tension at top connection with the platform. The compliant vertical-access riser (CVAR) is a relatively new alternative that has been in study for oil exploitation at ultra-deep water fields. It has a different geometrical configuration that can improve the structural performance of the production system by reducing the dynamic effect of the riser and providing several facilities such as the use of dry completion and the possibility of direct access to the wellbore for well intervention through the production riser. The geometrical configuration of the CVAR is obtained by the use of a heavy weight coating over part length of the riser pipe, buoyancy modules attached over part length of the riser pipe and a stress joint at bottom and top of the riser. The CVAR design involves the definition of the geometrical characteristics of these components, thus adding several more variables to the design. Additionally, a riser must be designed to fulfill engineering criteria under several environmental conditions, requiring time consuming numerical simulations. With the increasing complexity of the risers design and the constant challenge of minimizing costs and improving the performance of structures, the optimization methodology comes out as an efficient alternative. Based on this motivation, this paper presents the optimum design approach of compliant vertical-access risers. Thus, the importance and effectiveness of the use of optimization techniques in the preliminary design of risers is discussed and the applicability of this concept in the design of CVAR is emphasized.

Introdução

A configuração de *riser* complacente vertical (CVAR) avaliada no presente trabalho consiste em uma alternativa relativamente recente para a exploração de petróleo em águas profundas, como é o caso dos campos do pré-sal. Esse tipo de configuração ainda não foi instalada e usada na prática de exploração de petróleo e gás, mas alguns estudos já foram desenvolvidos que comprovam sua viabilidade técnica e econômica. A concepção do arranjo foi proposta por Pearce *et al.* (1988), que patentearam a ideia de uma configuração de *riser* flexível associada a equipamentos capazes de viabilizar acesso vertical ao poço de produção. Ishida *et al.* (2001) estudaram a aplicação da configuração CVAR acoplada a um FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*), demonstrando a viabilidade da mesma e ainda a possibilidade de utilizá-la com completação seca nesse tipo de embarcação.

O *riser* vertical complacente aqui estudado consiste em um *riser* rígido com uma geometria diferenciada (Figura 1), obtida pela disposição de módulos de flutuadores e de peso adicional nas extremidades inferior e superior do duto, respectivamente. A utilização desses módulos garante que as extremidades do *riser* permaneçam predominantemente verticais, permitindo acesso direto ao poço.

Além disso, os flutuadores impõem uma tração na seção inferior suficientemente elevada para garantir a ausência de elevadas curvaturas e, conseqüentemente, tensões excessivas na base do *riser*.

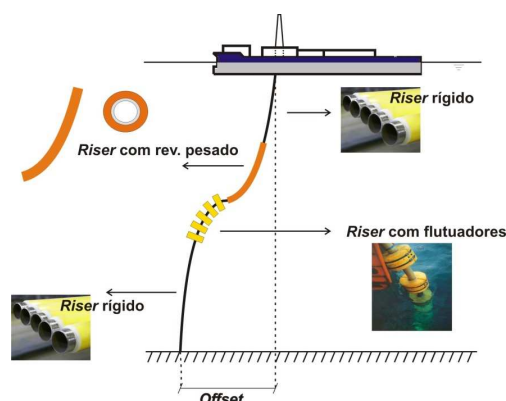


Figura 1 – Riser Vertical complacente.

A geometria do sistema permite também procedimentos de intervenção direta no poço, viabilizando as operações de *workover* direto da plataforma. Essa facilidade dispensa a contratação de unidades específicas para esse tipo de serviço, tornando a configuração em estudo atrativa também economicamente. Ishida *et al.* (2001) descrevem o sistema de *workover* com aplicação em um CVAR-FPSO.

A complacência característica da configuração é obtida por uma diferença de cota horizontal entre as conexões de topo e base, denominado *offset* horizontal, juntamente com a adoção de um excesso de comprimento de *riser*, denominado *overlength*, que consiste em um comprimento de *riser* além da distância em linha reta entre os pontos de conexão com a plataforma e com o poço. Outro parâmetro associado à complacência da configuração é o *Overlength Fraction* (OF), que é definido como a razão entre o *overlength* e a distância entre o topo e a base. Esse parâmetro define o grau de complacência da configuração CVAR. Para um alto valor de OF o *riser* apresenta uma maior capacidade de manter as tensões extremas dentro dos limites, para unidades flutuantes com maior movimento, como é o caso dos navios, pois o excesso de comprimento do duto é capaz de absorver o movimento da plataforma sem causar grandes esforços de tração. Dessa forma, a complacência do sistema se revela como um dos mais relevantes parâmetros de dimensionamento da estrutura. O comprimento da estrutura é limitado ainda pelo critério de interferência entre *risers* e desses com as linhas de ancoragem.

Os flutuadores são montados sobre o *riser* em módulos. Cada módulo do flutuador é caracterizado por seu diâmetro e comprimento, estando os módulos, em geral, igualmente espaçados. O peso adicional consiste em um trecho de *riser* com um revestimento pesado contínuo, com densidade maior que a do aço.

Com base nas características geométricas da configuração CVAR, no conhecimento do comportamento estrutural desse tipo de estrutura e tendo em mente as medidas de eficiência de interesse que se deseja avaliar, é possível equacionar seu dimensionamento em termos de um problema de otimização. Para tanto, inicialmente são definidas as variáveis de projeto. A adequada definição das variáveis do problema é de fundamental importância para a correta avaliação de otimização do dimensionamento da estrutura. Quanto mais variáveis, mais complexo se torna o problema de otimização. Por outro lado, a não consideração de variáveis significativas pode prejudicar a solução do problema, pois a falta de variáveis restringe o espaço de busca, podendo excluir soluções viáveis que, eventualmente, podem determinar a solução ótima. Dessa forma, é necessário avaliar cuidadosamente as variáveis de projeto, selecionando apenas as mais representativas.

Além das variáveis que caracterizam geometricamente cada trecho do *riser* existem outras duas variáveis do arranjo: o *offset* horizontal do poço e o comprimento total do *riser*, que pode ser representado pelo *overlength fraction*. Em resumo, é possível representar globalmente uma configuração CVAR a partir das seguintes variáveis: *overlength fraction*, comprimento do trecho de flutuadores, diâmetro dos flutuadores, comprimento do trecho de revestimento pesado, espessura do revestimento pesado e *offset* do poço.

A otimalidade de cada configuração analisada é avaliada por meio de uma medida de eficiência de interesse, que caracteriza a função, ou funções, objetivo do problema de otimização. A adequada definição dessa função objetivo é determinante sobre os resultados da otimização. A maior parte dos estudos já desenvolvidos sobre a otimização do dimensionamento de *risers* rígidos utiliza o custo do material como função de mérito a ser minimizada, a exemplo de Larsen e Hanson (1999). No entanto, a composição de custos de uma configuração de *risers* não é facilmente representada, vai além da quantidade de material utilizada, devendo também contemplar várias fases como: transporte, lançamento e instalação, operação e manutenção. Tanaka (2009) ressalta que, como a expectativa de vida útil de um *riser* é normalmente de cerca de 20 anos, estes custos de manutenção e operação, que se dão ao longo de sua vida, tendem a ser maiores que a parcela devida ao preço do material e da instalação, que é despendida antes do início da produção comercial. Além disso, a otimização com base em uma função objetivo de custo tende a levar apenas a soluções com o mínimo comprimento de *riser* capaz de satisfazer as restrições impostas.

Na prática, no entanto, um maior alívio de tensão no topo, proporcionado pela utilização de maiores trechos de flutuadores, e que resultaria em um custo mais elevado, pode prolongar a vida útil da estrutura e reduzir a necessidade de operações de manutenção, reduzindo consequentemente o custo global do sistema. Pensando dessa forma, torna-se mais adequado adotar funções objetivo baseadas em critérios estruturais.

Com base nos argumentos exposto, o presente trabalho aborda o dimensionamento de *risers* verticais complacentes aplicando uma metodologia de otimização multiobjetivo considerando como funções objetivo a minimização da máxima tensão ao longo do *riser* e a maximização do menor raio de curvatura ao longo do *riser*. A partir dessa abordagem busca-se minimizar o desgaste do *riser* e, consequentemente, aumentar sua vida útil, chegando-se ainda um raio de curvatura capaz de possibilitar as operações de intervenção através do próprio *riser* de produção. Inicialmente são consideradas apenas as análises estáticas dos casos de carregamento mais críticos da região considerada. Em uma próxima etapa do trabalho serão também incorporadas as análises dinâmicas.

No presente trabalho as restrições consideradas se baseiam em critérios estruturais do sistema, a partir da avaliação da máxima tensão combinada e da mínima tração efetiva ao longo do *riser*, com o objetivo de garantir a integridade da estrutura.

Para cada conjunto de variáveis avaliado no processo de otimização são realizadas simulações estáticas no programa Anflex (Anflex, 2009). Os valores das respostas de interesse obtidos são então comparados com os valores limites definidos pelas restrições, avaliando dessa forma a viabilidade da configuração em questão. Segundo o critério de tensão, a máxima tensão ao longo de todo o *riser* não deve ultrapassar 80% da tensão de escoamento do aço para as análises extremas. Para as análises em condições de operação essa tensão admissível a ser respeitada é de 67% da tensão de escoamento do aço. Quanto à verificação da tração efetiva, devem ser evitados valores muito baixos para que não ocorra compressão no *riser*, uma situação altamente indesejável uma vez que favorece a flambagem do duto.

Metodologia

Para o desenvolvimento do trabalho proposto, visando à aplicação de técnicas de otimização, é necessário inicialmente formular o projeto de um *riser* como um problema de otimização. Para tanto se faz necessária a definição adequada das variáveis de projeto envolvidas, das restrições impostas por normas ou condições de operação previstas, e da medida objetiva de eficiência, caracterizada por uma ou mais funções objetivo. A obtenção da formulação mais adequada é feita por meio do estudo das características e do comportamento estático e dinâmico da estrutura analisada.

Em seguida é necessário ainda estudar os métodos de otimização aplicáveis e mais adequados para a resolução do problema de otimização formulado. Com a formulação do problema e método de solução definidos, os mesmos são modelados no aplicativo modeFRONTIER®, que consiste em um programa comercial de otimização multiobjetivo com larga aplicação em diversas áreas. As análises estáticas do *riser* são realizadas no programa Anflex, software desenvolvido pela PETROBRAS e utilizado nos cálculos estruturais de linhas de ancoragem e *risers*.

Definida a modelagem do problema, a análise de otimização é realizada e os resultados obtidos são apresentados, levantando considerações relevantes quanto ao dimensionamento do *riser* em estudo.

Resultados e Discussão

Seguindo a metodologia descrita nas seções anteriores, a definição da configuração geométrica de um *riser* vertical complacente foi formulada em termos de um problema de otimização, já detalhado na seção de Introdução deste trabalho. A estrutura aqui avaliada consiste em um *riser* rígido de aço em configuração vertical complacente garantindo acesso vertical ao poço sem comprometer a liberdade de movimento da estrutura. Assume-se que o *riser* encontra-se instalado em uma lâmina d'água de 2.200 m, conectado com no ponto central inferior de uma monocoluna. O azimuth da linha é definido equivalente a 135° (SW). O trecho com revestimento pesado é considerado contínuo e o trecho de *riser* com flutuadores é considerado composto por 5 segmentos com módulos de flutuadores com diferentes diâmetros, decrescentes da base para o topo do *riser*, de modo a garantir mais suavidade à região curva intermediária característica da configuração em estudo.

Com o auxílio do programa modeFRONTIER®, foi modelado o fluxo da análise de otimização, incorporando as variáveis de projeto, funções objetivo, restrições, módulo de análise estrutural (Anflex) e módulo de solução do problema de otimização. Apresenta-se na Figura 3 o fluxo construído no programa modeFRONTIER®. Consideram-se como variáveis de projeto: diâmetro externo do *riser* (dext), diâmetro do flutuador 1, de maior diâmetro (dflut1), diâmetro do flutuador 2 (dflut2), diâmetro do flutuador 3 (dflut3), diâmetro do flutuador 4 (dflut4), diâmetro do flutuador 5, de menor diâmetro (dflut5), espessura do revestimento pesado (e_peso), *overlength fraction* (OF), porcentagem do comprimento do *riser* com flutuadores (flut_tot), porcentagem do comprimento do *riser* com revestimento pesado (peso), porcentagem do trecho de flutuadores com flutuador 1 (flut1), porcentagem do trecho de flutuadores com flutuador 2 (flut2), porcentagem do trecho de flutuadores com flutuador 3 (flut3), porcentagem do trecho de flutuadores com flutuador 4 (flut4), *offset* horizontal do poço (poffset) (em termos de porcentagem da lâmina d'água).

O fluxo de otimização modelado é iniciado com a definição das variáveis de projeto. A partir dos valores dessas variáveis são calculados outros parâmetros do *riser* necessários para construção do arquivo de entrada (CVAR_aml) do programa Anflex que realiza as análises estruturais pertinentes. Após as análises são gerados arquivos de saída com as envoltórias das respostas de interesse, que são posteriormente analisados e dos quais são extraídas as respostas extremas a serem verificadas nas restrições e analisadas nas funções objetivo.

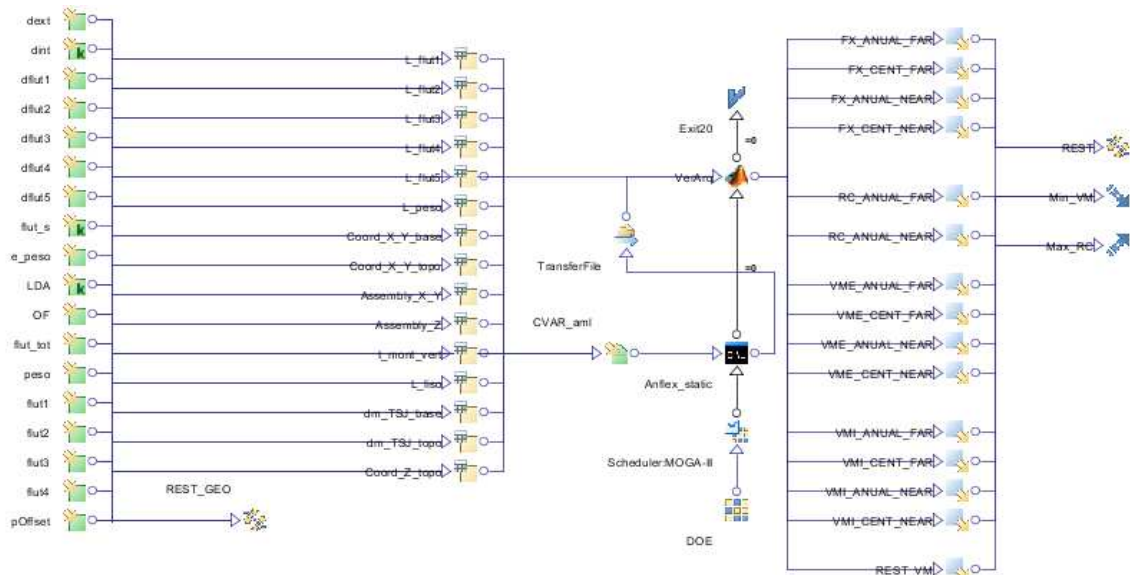


Figura 3 – Fluxo de otimização modelado no modeFRONTIER.

Em uma pré-análise foi feito um estudo de sensibilidade e avaliação de correlação entre as variáveis de projeto consideradas. A partir da análise de sensibilidade é possível identificar quais variáveis são mais significativas no dimensionamento do riser em estudo. Adicionalmente a avaliação de correlação das variáveis permite identificar se as variáveis consideradas possuem alguma dependência entre si. Essas duas avaliações contribuem no entendimento do comportamento do sistema em análise, uma vez que mostram quais variáveis possuem mais impacto nas respostas de interesse. A depender dos resultados obtidos nessas análises é possível eliminar algumas variáveis de projeto consideradas desnecessariamente, caso estejam correlacionadas ou possuam pouca contribuição nas respostas do riser. Para o caso de análise considerado neste trabalho, a Figura 4 e a Figura 5 apresentam, respectivamente, os resultados das análises de sensibilidade e correlação das variáveis de projeto.

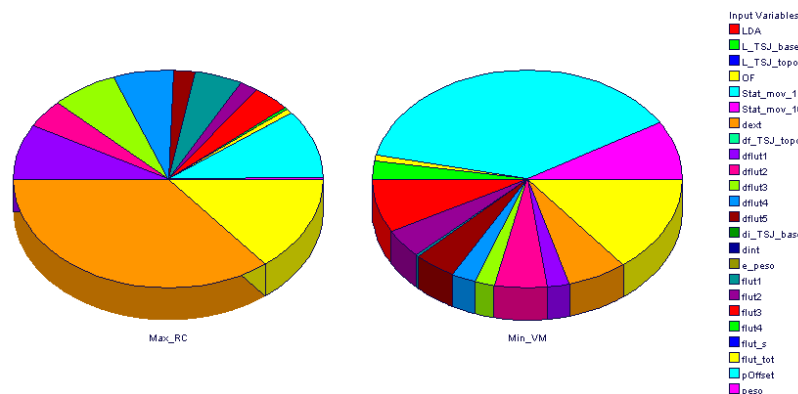


Figura 4 – Análise de sensibilidade das variáveis de projeto em relação às funções objetivo.

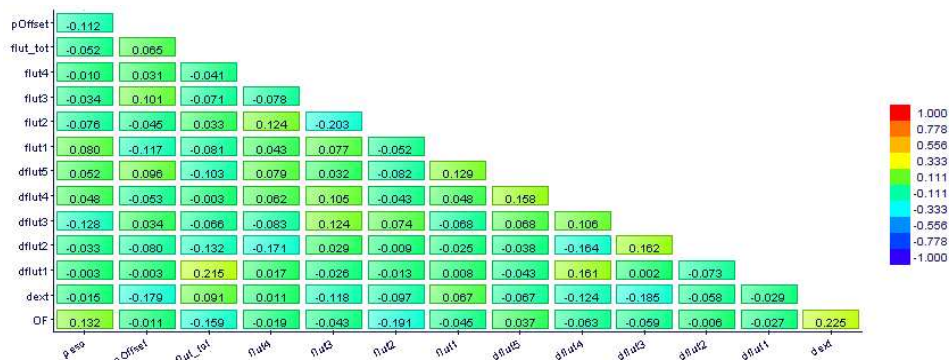


Figura 5 – Análise de correlação entre as variáveis de projeto.

Nos gráficos da Figura 4 destaca-se a expressiva contribuição do diâmetro externo, do *offset* horizontal do poço e do *overlength fraction* no cálculo do raio de curvatura do *riser*. Por outro lado, a porcentagem dos trechos de flutuadores utilizados apresentou pouca contribuição na determinação do raio de curvatura da configuração analisada. Em relação às tensões máximas, é possível observar expressiva contribuição das variáveis *offset* horizontal do poço, *overlength fraction* e comprimento do trecho com revestimento pesado.

O gráfico de correlação da Figura 5, devido aos baixos valores encontrados, demonstra que as variáveis de projeto consideradas não estão correlacionadas e podem então ser consideradas independentes.

A análise de otimização foi feita utilizando o método dos Algoritmos Genéticos que consiste em um eficiente método para solução de problemas multiobjetivo com as características do problema abordado. Esse método procura reproduzir o fenômeno de seleção natural, conservando ao longo das gerações os indivíduos com as características desejadas (fortes) e diminuindo a probabilidade de reprodução das características indesejadas (indivíduos mais fracos). A aplicação do Método dos Algoritmos Genéticos requer a definição de determinados parâmetros. Na análise de otimização aqui realizada foi considerada uma população de 30 indivíduos e 15 gerações. Considerou-se ainda uma probabilidade de *cross-over* de 50%, probabilidade de seleção de 5% e probabilidade de mutação de 10%. Os resultados da otimização obtidos em termos das funções objetivo consideradas são apresentados na Figura 6. A Tabela 1 apresenta os valores das variáveis de projeto da configuração ótima encontrada.

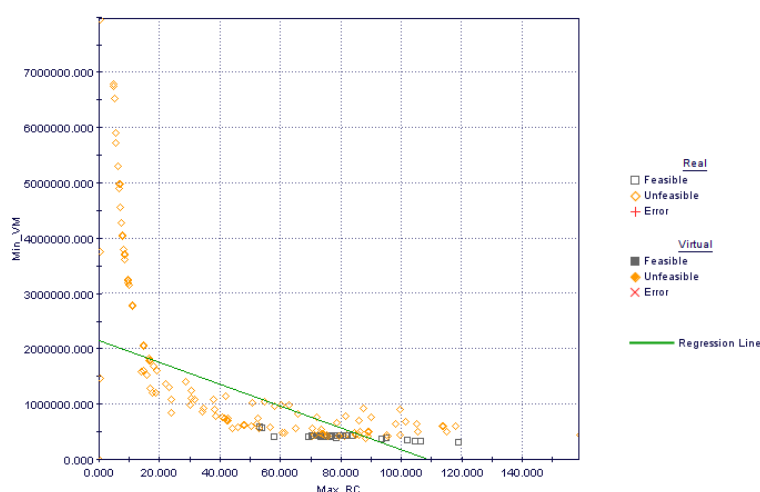


Figura 6 – Resultados da análise de otimização.

Tabela 1 – Variáveis de projeto da configuração ótima.

OF	dext	dflut1	dflut2	dflut3	dflut4	dflut5	e_peso	flut1	flut2	flut3	flut4	flut_tot	pOffset	peso
0.0157	0.316	1.7	1.5	1.7	1	0.9	0.09	0.475	0.1	0.05	0.2	0.45	0.3	0.2

Conclusões

Em uma avaliação inicial do problema, realizou-se uma análise prévia de sensibilidade da resposta do arranjo CVAR em relação às variáveis características do dimensionamento do mesmo, além da análise de correlação dessas variáveis. Essa avaliação possibilitou uma melhor compreensão do comportamento da estrutura e da representatividade das variáveis de projeto analisadas.

Possibilitando uma futura redução da quantidade de variáveis consideradas no projeto.

Entre as variáveis de projeto analisadas, o *overlength fraction*, que determina o comprimento total do *riser*, e o *offset* horizontal do poço apresentam-se como os parâmetros mais determinantes no comportamento do arranjo CVAR. O Método dos Algoritmos Genéticos foi aplicado na otimização da configuração do *riser* em estudo, obtendo-se a solução ótima do problema dentro do domínio analisado.

Agradecimentos

Os autores agradecem à PETROBRAS pela permissão de uso do programa ANFLEX, empregado nas simulações numéricas. Agradecemos também à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP, a Financiadora de estudos e projetos – FINEP e ao Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT pela formação e financiamento da pesquisa por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o setor Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCT.

Referências Bibliográficas

- ANFLEX, 2009. *Análise não Linear de Risers e Linhas de Ancoragem*. Versão 7.1.1; r2.2, PETROBRAS / CENPES, Rio de Janeiro, RJ.
- ISHIDA, K., OTOMO, K., HIRAYAMA, H., OKAMOTO, N., NISHIGAKI, M., OZAKI, M., 2001. *An FPSO with Surface Wells and Workover System in Deepwater*, “Annual Offshore Technology Conference”, OTC Paper No. 12990, Houston, Texas, EUA.
- LARSEN, C.M.; HANSON, T., 1999. *Optimization of catenary risers*: “Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering”, v.121(2), p.90-94.
- PEARCE, J.L., SIZER, P.S., GANO, J.C., YONKER, J.H., THURMAN, R.L., O'SULLIVAN, J.F., SIMPSON, D.M., ROBERTS, R.A., HEALEY, A.J., NOOTEBOOM, U.G., 1988. *Method and system for maintenance and servicing of subsea wells*. United States Patent 4,730,677.
- TANAKA, R.L., 2009. *Otimização da configuração de risers rígidos*. Tese de D.Sc., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, São Paulo, Brasil.