

# TOWARDS A METHODOLOGY FOR THE OPTIMAL DETERMINATION OF SAFE OPERATIONAL REGIONS FOR OFFSHORE DRILLING OPERATIONS

## UMA METODOLOGIA PARA A DETERMINAÇÃO ÓTIMA DE REGIÕES OPERACIONAIS SEGURAS PARA A OPERAÇÃO DE PERFURAÇÃO OFFSHORE

Grasiele R. Duarte<sup>1</sup>, Fabrício N. Corrêa<sup>1</sup>, Beatriz S. L. P. de Lima<sup>1</sup>, Breno P. Jacob<sup>1</sup>, João C. R. Plácido<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/Programa de Engenharia Civil  
Rio de Janeiro, 21941-596, Rio de Janeiro – Brasil

grasiele.duarte@coc.ufrj.br, fabricio@lamcso.coppe.ufrj.br, bia@coc.ufrj.br, breno@lamcso.coppe.ufrj.br

<sup>2</sup>Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello  
Rio de Janeiro, 21941-915, Rio de Janeiro – Brasil  
jcrp@petrobras.com.br

**Resumo.** Na indústria para a produção de óleo *offshore*, o projeto do sistema de perfuração e completação de poços através de Unidades Móveis para Perfuração *Offshore* (MODU – do inglês *Mobile Offshore Drilling Units*) normalmente envolve análises computacionais baseadas em simulações numéricas. Um desses tipos de análise, conhecida como “análise de operabilidade”, tem como objetivo indicar a região segura e operável para o sistema, com base na avaliação de um conjunto de critérios a serem atendidos durante a operação. A análise considera um conjunto de posições que o equipamento pode assumir durante a atividade, sob um conjunto de valores de pré-tração no *riser*. Cada posição assumida sob cada tração no *riser*, que pode chegar a centenas ou milhares, requer a simulação do comportamento do sistema para avaliação dos critérios. Desta forma, uma das características da análise de operabilidade é o seu alto custo computacional. Com o objetivo de reduzir o custo computacional, este trabalho propõe uma estratégia para reduzir o número total de avaliações necessárias para encontrar os limites da região operável, empregando o método da bisseção para selecionar as simulações a serem executadas com base nos resultados obtidos de simulações anteriores.

**Palavras-chave:** Sistemas *Offshore*, Perfuração de Poços, Análise de Operabilidade, Métodos de Aproximação.

## 1 Introdução

A indústria para a produção de óleo *offshore* normalmente requer análises computacionais baseadas em simulações numéricas para o projeto de diversos sistemas estruturais. Uma das operações mais críticas é a perfuração e completação de poços de óleo através de MODUs, composta por uma embarcação especializada conectada a um *riser* vertical rígido. Neste contexto, a análise de operabilidade é aplicada para avaliação da região considerada segura e operável dentro da qual a embarcação deve ser mantida durante a operação, para assegurar a integridade do sistema evitando a violação de qualquer critério de projeto.

A análise de operabilidade é realizada através de um *grid* formado por centenas ou até milhares de pontos definidos pelos valores de duas variáveis principais: o deslocamento da embarcação a partir da sua posição inicial, e a pré-tração imposta ao *riser*. Para cada ponto é requerida uma simulação não-linear do comportamento do sistema no domínio do tempo, sob diferentes condições ambientais. Os resultados são comparados com limites definidos previamente, correspondentes aos critérios de projeto. Os pontos do *grid* cujas simulações não violam qualquer critério compõem a região operável para o MODU. Portanto, a análise de operabilidade pode demandar um alto custo computacional.

Este trabalho propõe uma nova metodologia para a análise de operabilidade, onde os pontos do *grid* (simulação numérica) são selecionados de forma adaptativa através do método da bisseção. A seleção é feita de acordo com os

resultados de simulações executadas previamente para alguns dos pontos. O principal objetivo com a metodologia aqui apresentada é reduzir o número de simulações e consequentemente o custo computacional da análise de operabilidade de sistemas *offshore* para perfuração de poços. Os resultados obtidos nos estudos de caso demonstraram bom desempenho do método proposto.

## 2 Análise de operabilidade de sondas de perfuração

### 2.1 Operabilidade no contexto de Perfuração

No cenário de intervenção, completação e perfuração de poços de petróleo *offshore*, as empresas vêm incentivando o desenvolvimento de novas metodologias para modelagem e dimensionamento de colunas de *riser*, SCPS (Sistema de Cabeça de Poço Submarina) e outros componentes, visando garantir e aprimorar cada vez mais, e em menor tempo possível, seus projetos.

A Fig. 1 apresenta os principais componentes de um sistema de perfuração. O MODU é a plataforma flutuante, que pode ser por exemplo um navio-sonda, ou uma sonda semi-submersível. Na análise operacional a plataforma pode ser modelada através de seus operadores de amplitude de resposta (RAO - do inglês *Response Amplitude Operators*), calculados por análises hidrodinâmicas especializadas, gerando movimentos que se somam aos *offsets* impostos para verificação do passeio limite operacional. Na figura também constam o sistema de tracionamento, onde cada tracionador é modelado por uma curva de rigidez não-linear que representa o deslizamento do barrilete interno no externo, como também é feito para o caso do deslizamento vertical do *slip joint*. No caso das juntas flexíveis, elas são modeladas com elemento de pórtico com rigidez flexional constante. As juntas de *risers*, com ou sem flutuador, são tratadas através de elementos de pórtico com não-linearidade geométrica. Na Fig. 1 também estão ilustrados o sistema LMRP (*Lower Marine Riser Package*), o BOP (*Blow Out Preventer*) e o condutor no solo.

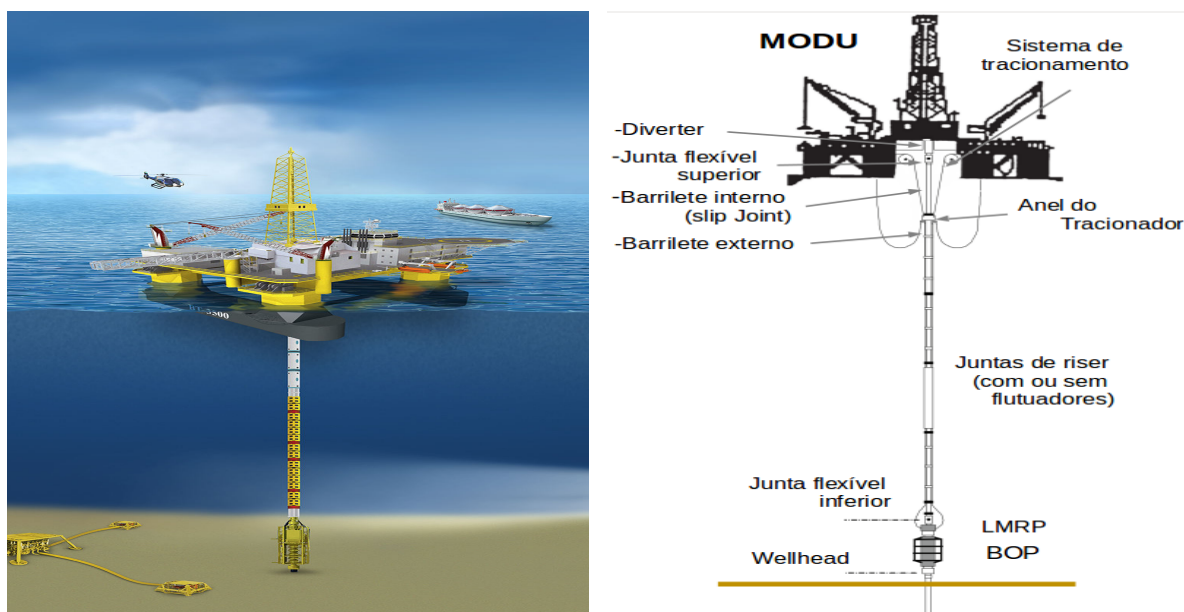


Figura 1. Sistema de Perfuração.

Dentre as diversas análises necessárias para o projeto de operações de perfuração, a análise de operabilidade tem como objetivo principal indicar as posições aceitáveis de operação de sonda de perfuração, para um conjunto de combinações ambientais, para garantir a integridade do sistema e assim evitar acidentes que acarretem impactos ao meio ambiente e comprometam a segurança das pessoas envolvidas na operação.

Para a análise de operabilidade, são realizadas centenas ou até milhares de simulações estáticas e dinâmicas envolvendo um conjunto de pares de *offset* (deslocamento da embarcação em relação à posição inicial, fornecido na forma de percentual da Lâmina d'água – LDA) e tração do *riser* de perfuração.

Dentre os resultados de cada simulação destacam-se: tensões na parede ao longo do *riser* e esforços globais no BOP e na cabeça do poço. Em suma, a análise de operabilidade é realizada para garantir que o sistema de perfuração, sonda, *riser* e SCPC possam permanecer operando no modo conectado, o LMRP possa ser conectado,

desconectado e reconectado, sobretudo em condições de emergência e que a tração de topo aplicada pelos tracionadores seja suficiente para manter o *riser* tracionado, com um *overpull* para garantir a elevação do LMRP durante a desconexão de emergência. Os principais limites operacionais são: Tração máxima (TMAX) e mínima (TMIN), definidas pela norma API RP 16Q [1], e passeio máximo (*offset*) tolerado, sem comprometer o sistema.

O principal resultado da análise de operabilidade é um gráfico conhecido como envelope de operabilidade, como o ilustrado na Fig. 2, envolvendo os limites operacionais, os passeios em que algum critério foi atingido para cada nível de tração aplicado no anel do *riser* de perfuração.

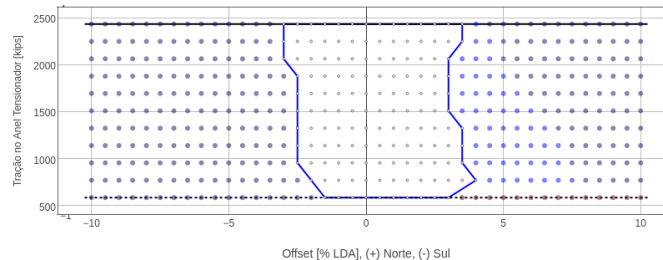


Figura 2. Envelope de operabilidade.

## 2.2 Metodologia de Modelagem Empregada nas Análises de Operabilidade

No contexto do projeto de *risers* verticais de perfuração, onde o interesse das análises reside em sua resposta estrutural, a análise individual global do *riser* é feita montando um sistema de equações decorrente de um procedimento de discretização espacial por uma malha de Elementos Finitos de pórtico espacial. A plataforma é representada como condição de contorno do topo do *riser*, assumindo que seus movimentos são conhecidos. Neste tipo de abordagem, o nível de tração do *riser* não interfere no movimento dinâmico da plataforma – os domínios são desacoplados.

No contexto da análise de sistemas de perfuração, as metodologias que descrevem a interação entre a coluna de revestimento e o solo são apresentadas na norma ISO/TR 13624-2:2009 [2]. Pela norma, o sistema de perfuração pode ser subdividido em dois domínios: acima do sistema BOP, da junta flexível inferior para cima, e abaixo deste, envolvendo principalmente a interação solo-coluna de revestimento. A ISO/TR 13624-2:2009 [2] não trata a forma de acoplamento casco-*riser*, focando unicamente no domínio do *riser*.

A metodologia acoplada envolve o modelo completo do *riser*, BOP e coluna de revestimento, considerando a influência do solo na resposta do conjunto. Esta abordagem é mais realista e foi escolhida para os estudos apresentados neste trabalho.

## 3 Análise de operabilidade baseada no Método da Bisseção

O método clássico da bisseção em geral é aplicado para a busca do valor aproximado da raiz de uma função em um determinado intervalo de um domínio contínuo Bachrathy and Stépán [3], Chapra [4]. Basicamente, o método divide o intervalo em duas seções através da inclusão do ponto médio entre os dois extremos. A existência de raiz em uma das seções é garantida se o produto entre os valores da função nos seus pontos limitantes é  $< 0$ . Então, tal seção é definida como o novo intervalo de busca, que é dividido em duas novas seções a serem avaliadas para definição de um novo intervalo. O processo é repetido até que seja atendido um critério de parada pré-definido, de forma que ao final o valor aproximado da raiz é o ponto médio entre as duas seções.

No contexto das análises de operabilidade, é importante ressaltar a possibilidade de deslocamentos da sonda em uma única direção, em dois sentidos opostos. Valores negativos da distância correspondem a deslocamentos para o Sul, positivos para o Norte e o valor 0 é o posicionamento inicial da sonda, correspondente à localização geográfica do poço.

No método proposto, para cada valor de tração do *riser* que compõe o *grid*, devem ser encontrados dois valores correspondentes aos limites de *offset* para os dois sentidos, para que a sonda seja mantida dentro da região operável. Por conveniência, fica definido que cada ponto do *grid* é dado pela forma  $(o, t)$ , onde  $o$  é o valor do respectivo *offset* e  $t$  é o valor da tração.

Na análise de operabilidade, após a execução de cada simulação numérica referente a um ponto  $(o, t)$  do *grid*, a possível violação  $v_i$  de cada critério  $c_i$ , onde  $i = 1, 2, \dots, C$  e  $C$  é o total de critérios considerados na análise, é avaliada na forma

$$v_i = cp_i/cl_i, \quad (1)$$

onde  $cl_i$  é o limite definido para o critério  $c_i$ , a partir do qual é considerado violado,  $cp_i$  é o valor do parâmetro de simulação a ser comparado com  $cl_i$ . Neste caso, se qualquer  $v_i \geq 1$ , o critério  $c_i$  é considerado violado e  $(o, t)$  é inadequado para a estrutura, tornando-a inoperável. Por outro lado, se  $0 \leq v_i < 1$ , para todos os  $C$  critérios, sob os valores definidos para o ponto  $(o, t)$ , a estrutura é mantida operável.

Note que o termo região operável remete a uma área geográfica em que a embarcação deve ser mantida para que continue operável. Neste caso, para cada valor de tração é natural que quanto mais distante a sonda esteja da sua posição inicial, mais esforço seja imposto à estrutura e maior seja a probabilidade de violação a algum critério. Assim, é esperado que o resultado da análise indique que região operável seja um conjunto de pontos próximos à posição inicial ( $offset = 0$ ).

No método proposto, a função  $f(o, t)$  que modela a ocorrência ou não de violação a qualquer critério e correspondente nível de violação caso ocorra, em uma simulação referente a um ponto  $(o, t)$  do *grid*, para que seja identificado como operável ou não, é dada por

$$f(o, t) = \sum_{i=1}^C y_i, \quad y_i = \begin{cases} v_i, & \text{se } v_i \geq 1 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad (2)$$

onde  $v_i$  é dado pela eq. (1).

Com a definição de  $f(o, t)$  é possível estabelecer os passos para a seleção de simulações pelo *grid*, demonstrados no Algoritmo 1. No Algoritmo 1,  $o_L$ ,  $o_M$  e  $o_U$  são respectivamente os valores mínimo, médio e máximo de *offset*, que definem as duas seções a cada iteração,  $\min(offset)$  e  $\max(offset)$  são funções que retornam respectivamente os valores mínimo e máximo de *offset* no *grid*,  $\max(offset \leq ((o_L + o_U)/2))$  é uma função que retorna o valor máximo de *offset* no *grid*, entre aqueles que sejam  $\leq$  a um determinado valor, no caso, a média entre  $o_L$  e  $o_U$ . Similarmente,  $\min(offset \geq ((o_L + o_U)/2))$  é uma função que retorna o valor mínimo de *offset* entre aqueles que sejam  $\geq$  a um determinado valor,  $f(o_L, t)$ ,  $f(o_M, t)$  e  $f(o_U, t)$  são dados pela eq. (2),  $\Delta_o$  é a diferença entre os valores de *offset*, que são equidistantes. O passo executar\_simulacao( $o_i, t, \mathbf{S}$ ), onde  $i \in \{L, M, U\}$ , é a função que executa a simulação do comportamento da estrutura no ponto  $(o_i, t)$ , sujeita à avaliação da matriz  $\mathbf{S}$  descrita a seguir. Adicionalmente, as condições para alguns dos passos do Algoritmo 1 são necessárias para que o método seja aplicado em domínio discreto. O ajuste de alguns passos a diferentes situações que o método está sujeito, garante o máximo de acurácia possível ao método de aproximação aqui apresentado, através da extensão máxima do domínio de *offset* ao movimentar os pontos de referência e prioridade de seção de acordo com o limite da região a ser encontrado. Ao final do processo, o limite pode ser  $o_L$ ,  $o_M$  ou  $o_U$ , de acordo com os valores  $prod_1 = 0$  e/ou  $prod_2 = 0$ ,  $f(o_L, t) = 0$ ,  $f(o_M, t) = 0$  e/ou  $f(o_U, t) = 0$ . Caso  $prod_1 \neq 0$  e  $prod_2 \neq 0$ , assume-se que a referida tração  $t$  não se aplica ao projeto.

No Algoritmo 1, ao movimentar os pontos  $o_L$  ou  $o_U$ , eles podem assumir valores que referida simulação já tenha sido executada na iteração anterior. Por esse motivo, o método incorpora a matriz  $\mathbf{S}$ , incluída nos passos das linhas 6 e 24 do Algoritmo 1, de dimensão  $O \times T$ , onde  $O$  é o total de valores definidos para *offset* e  $T$  é o total de valores de tração, inicializada na forma  $S_{i,j} = -1$ , onde  $i$  corresponde à linha referente ao valor de *offset* localizada na posição  $i$  do conjunto desses valores, ordenados de forma crescente, e  $j$  é a coluna referente ao valor de tração na posição  $j$  no conjunto desses valores, ordenados de forma crescente, tal que  $i = 1, 2, \dots, O$  e  $j = 1, 2, \dots, T$ . Ao longo da execução,  $\mathbf{S}$  vai assumindo a forma

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} f(o_1, t_1) & -1 & f(o_1, t_3) & -1 & \dots & f(o_1, t_T) \\ f(o_2, t_1) & -1 & f(o_2, t_3) & f(o_2, t_4) & \dots & f(o_2, t_T) \\ & & \ddots & & & \\ f(o_O, t_1) & f(o_O, t_2) & f(o_O, t_3) & -1 & \dots & f(o_O, t_T) \end{bmatrix},$$

onde cada  $f(o_i, t_j)$  é dado pela eq. (2) à medida que as referidas simulações são executadas. Desta forma, para todo  $t$ , se  $o_L$ ,  $o_M$  ou  $o_U$  assumirem valores correspondentes a  $S_{i,j} > -1$ , a simulação não será realizada.

## 4 Estudos de Caso

Para a avaliação do método proposto foram considerados três estudos de casos, distintos entre si pelo projeto de sistema de perfuração de poço representado ou pelo refinamento do *grid* da análise de operabilidade. Para todos os modelos foram consideradas condições ambientais e geológicas compatíveis com a costa brasileira.

O primeiro estudo de caso, identificado como EC1, considera a perfuração de um poço a uma LDA de 2233.0m. Foi considerado o uso de um navio-sonda equipado com 2 tracionadores de trações mínima e máxima de 1143.0kips e 3200.0kips respectivamente. Para o segundo estudo de caso, identificado como EC2, foi considerada a perfuração de um poço a uma LDA de 495.91m. No EC2 foi considerado um navio-sonda equipado com 2

**Algoritmo 1:** Análise de Operabilidade baseada no Método da Bisseção

---

```

1 para limite ∈ {inferior, superior} faça
2   para cada tração t faça
3     oL ← min(offset);    oU ← max(offset);
4     se limite = inferior então oM ← max(offset ≤ ((oL + oU)/2));
5     senão oM ← min(offset ≥ ((oL + oU)/2));
6     executar_simulacao(oL, t, S);    executar_simulacao(oM, t, S);    executar_simulacao(oU, t, S);
7     prod1 ← f(oL, t) × f(oM, t);    prod2 ← f(oM, t) × f(oU, t);    dist1 ← oM - oL;    dist2 ← oU - oM;
8     enquanto (prod1 ≠ 0 e prod2 ≠ 0 e (dist1 > Δo ou dist2 > Δo)) ou
9       (prod1 = 0 e dist1 > Δo) ou (prod2 = 0 e dist2 > Δo) faça
10      se (prod1 ≠ 0) e (prod2 ≠ 0) então
11        se prod1 < prod2 então oU ← min(offset ≥ (oU - dist2));
12        senão se prod2 < prod1 então oL ← max(offset ≤ (oL + dist1));
13        senão se limite = inferior então oL ← max(offset ≤ (oL + dist1));
14        senão oU ← min(offset ≥ (oU - dist2));
15      senão
16        se limite = inferior então
17          se prod1 = 0 então oU ← min(offset ≥ (oU - dist2));
18          senão oL ← max(offset ≤ (oL + dist1));
19        senão
20          se prod2 = 0 então oL ← max(offset ≤ (oL + dist1));
21          senão oU ← min(offset ≥ (oU - dist2));
22        se limite = inferior então oM ← max(offset ≤ ((oL + oU)/2));
23        senão oM ← min(offset ≥ ((oL + oU)/2));
24        executar_simulacao(oL, t, S);    executar_simulacao(oM, t, S);    executar_simulacao(oU, t, S);
25        prod1 ← f(oL, t) × f(oM, t);    prod2 ← f(oM, t) × f(oU, t);    dist1 ← oM - oL;    dist2 ← oU - oM;

```

---

tracionadores de trações mínima e máxima de 584.0kips e 2560.0kips respectivamente. O terceiro estudo de caso, identificado como EC3, consiste do mesmo projeto de sistema de perfuração considerado no EC2. A diferença entre os dois é o refinamento do *grid* utilizado na análise de operabilidade, descritos a seguir.

Para os três estudos de caso foram considerados três casos de carregamento ambiental, respectivamente identificados como EC1-CC1, EC1-CC2, EC1-CC3, EC2-CC1, EC2-CC2, EC2-CC3, EC3-CC1, EC3-CC2 e EC3-CC3, de acordo com o estudo de caso EC1, EC2 ou EC3, sujeito ao caso de carregamento CC1, CC2 ou CC3. A diferença entre os casos de carregamento diz respeito à intensidade de vento, onda e corrente de superfície.

Sobre os parâmetros da análise de operabilidade, foi considerado *offset* máximo de 10% da LDA, tanto para o Sul quanto para o Norte. No EC1 a discretização de *offset* foi feita em 91 pontos, separados igualmente por aproximadamente 0.22% da LDA, correspondente a uma distância geográfica de aproximadamente 4.96m. A discretização dos valores de tração foi feita em 16 pontos, assumindo os valores de 1143.0kips a 3040.0kips (95% da tração máxima), separados igualmente por 126.0kips. A discretização resulta em um *grid* composto por 1456 pontos para cada um dos 3 casos de carregamento. Para as simulações foi definido o tempo de 1000s de operação.

Para o EC2 a discretização de *offset* foi feita em 41 pontos, separados igualmente por 0.5% da LDA, correspondente à distância geográfica de aproximadamente 2.48m. No caso da tração, a discretização foi feita em 11 pontos, assumindo os valores de 584.0kips a 2432.0kips (95% da tração máxima), separados igualmente por 185.0kips. Neste caso o *grid* da análise é composto por 451 pontos.

No caso do EC3, a discretização de *offset* foi feita em 51 pontos, separados igualmente por 0.4% da LDA, correspondente à distância geográfica de aproximadamente 1.98m. A discretização dos valores de tração foi feita em 16 pontos, separados igualmente por 123.0kips. Nestas condições, o *grid* do EC3 é composto por 816 pontos. Para as simulações de EC2 e EC3 foi definido o tempo de 2000s de operação.

Neste trabalho foram considerados 10 critérios de projeto na análise: Ângulos Máximo e Médio da Junta Flexível Superior, Ângulos Máximo e Médio da Junta Flexível Inferior, Momento Máximo no Alojador de Alta Pressão, *Stroke* Máximo no *Slip Joint* e em cada tracionador, Tensão de Von Mises Máxima no Condutor e no *Riser*.

## 5 Resultados

Esta seção apresenta os resultados obtidos com base nos estudos de caso apresentados na Seção 4. Para efeito de comparação, para todos os casos de carregamento de todos os estudos de caso, a análise de operabilidade foi realizada através do método proposto (indicado como OMB) e pelo procedimento tradicional (identificado como OT, onde são executadas as simulações de todos os pontos do *grid*).

Entre as Fig. 3 e 5 são apresentados resultados de análise de operabilidade de alguns dos casos de carregamento dos estudos de caso considerados neste trabalho. Cada figura apresenta lado a lado os resultados obtidos através da OT e da OMB, devidamente identificados. No caso das análises OMB, os gráficos apresentam apenas os pontos do *grid* selecionados para a execução da simulação.

Lembrando que a diferença de EC2 para EC3 é a precisão definida para o *grid* da análise de operabilidade, considerando apenas os resultados obtidos através da OT, entre os pares de Fig. 4(a) e 5(a) é possível observar que a geometria do envelope realmente pode ser alterada com o refinamento do *grid*, em geral aumentando a região operável, como esperado. Note que ao alterar de EC2 para EC3, a diferença da distância entre os pontos na discretização de *offset*, promovida pelo refinamento do *grid*, ao ser convertida em distância geográfica corresponde a aproximadamente 0.5m a menos. Ainda assim a geometria do envelope foi alterada. Assim sendo, a precisão do *grid* é relevante para a qualidade do resultado da análise de operabilidade. Provavelmente, alguns projetos são mais sensíveis do que outros. Considerando por exemplo o alto custo monetário envolvido na atividade em questão e possibilidade de escolha entre projetos de estrutura distintos para um mesmo poço, sobre o papel da análise de operabilidade na tomada de decisão, é importante que seja feita de forma precisa quanto ao *grid* utilizado.

A partir deste ponto, considerando também os resultados das análises OMB entre as Fig. 3 e 5, comparando os pares de gráficos em cada figura é possível observar que a OMB é capaz de obter envelopes muito próximos daqueles obtidos pela OT. No caso de EC2-CC1 são idênticos, como ilustra a Fig. 4. Também é possível observar que houve uma redução considerável no número de simulações pelo *grid* e que a OMB selecionou pontos entre as regiões operável e não operável.

Sobre os estudos de caso em que o OMB não produziu o mesmo envelope da OT, nas Fig. 3 e 5, note que no domínio de *offset*, nos valores de tração em que houve diferença em qualquer limite da região operável ou ambos, ela foi de apenas um ponto. Neste caso, o método aqui proposto é tido como eficiente para a análise de operabilidade. O possível erro de *offset*, quando convertido em distância geográfica, pode ser pequeno o suficiente para justificar a redução do custo computacional.

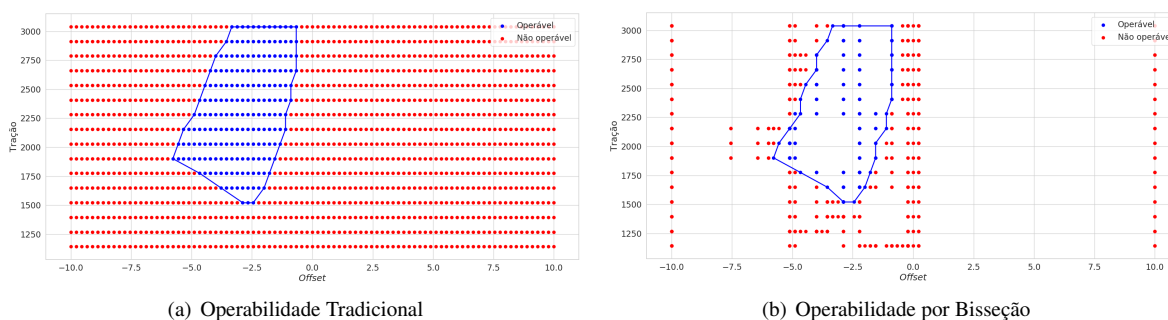


Figura 3. Resultado Análise de Operabilidade EC1-CC1.

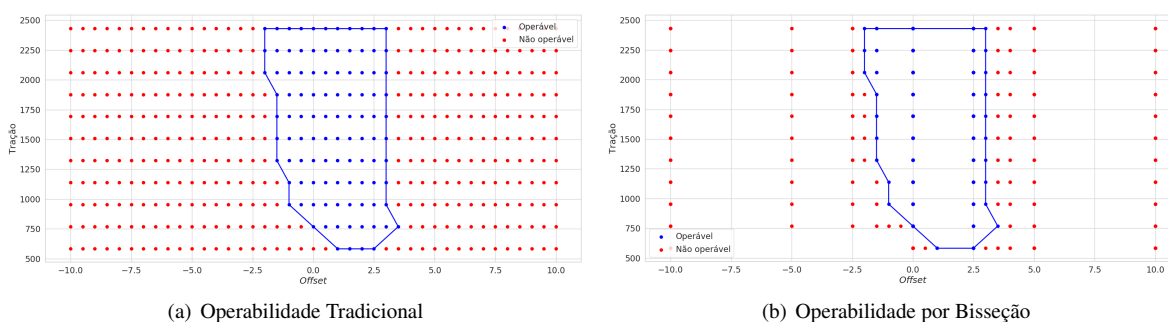


Figura 4. Resultado Análise de Operabilidade EC2-CC1.

A Tabela 1 apresenta dados que demonstram precisamente a redução do custo computacional promovida pela OMB em alguns dos estudos de caso. Note que para um mesmo estudo de caso, em que foi definido o mesmo *grid* para todos os casos de carregamento, o número de simulações foi diferente em cada um deles, ainda que esses valores tenham sido relativamente próximos. Esta informação demonstra uma característica da OMB. Não é possível conhecer previamente o número de simulações que serão executadas em um determinado *grid*. Este valor também tem relação com o envelope de operabilidade do projeto em avaliação e o fato de se tratar de um

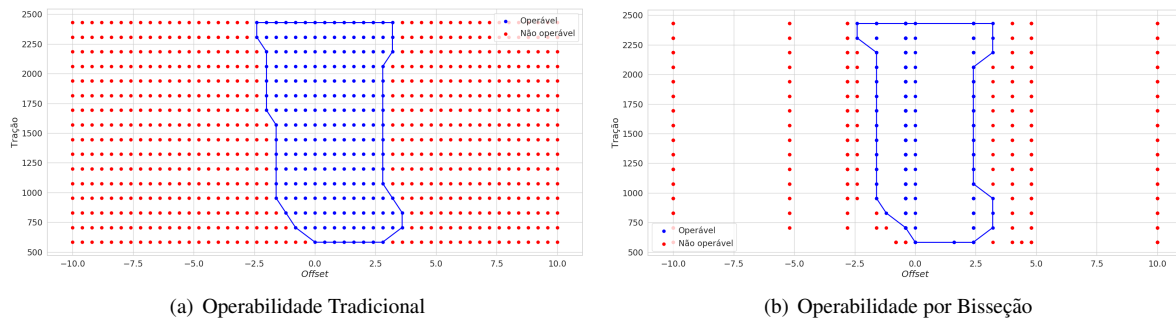


Figura 5. Resultado Análise de Operabilidade EC3-CC1.

domínio discreto. Dependendo da posição de um determinado limite da região operável no *grid*, é possível que seja selecionada uma seção mais extensa que a outra, o que aumenta o número de simulações da busca se comparado ao uso da seção menos extensa. Na Tabela 1 também é possível observar que quanto mais refinado o *grid*, maior é o número de simulações na OMB. No entanto, a taxa de redução relativa também aumenta, motivando o uso de *grid* refinado, com o objetivo de melhorar a qualidade do resultado da análise.

Tabela 1. Taxa de redução do número de simulações com a OMB. Na tabela, Simulações = total de simulações realizadas com a OMB, Taxa de Redução (%) = percentual do total de pontos no *grid* que não foi realizada simulação.

	Total Pontos <i>Grid</i>	Simulações	Taxa de Redução (%)
EC1-CC1	1456	230	84.2033
EC1-CC2	1456	227	84.4093
EC1-CC3	1456	224	84.6154
EC3-CC1	816	191	76.5931
EC3-CC2	816	188	76.9608
EC3-CC3	816	190	76.7157

## 6 Conclusão

Este trabalho apresentou um novo procedimento para as análises de operabilidade de sistemas para perfuração de poços *offshore*. O principal objetivo é reduzir o custo computacional da análise.

Foi verificada a relevância do uso de *grid* refinado na análise de operabilidade de interesse neste trabalho. Os resultados obtidos com o método proposto demonstraram sua eficiência para produzir o envelope de operabilidade. A redução do custo computacional proporcionada varia de acordo com o *grid* aplicado na análise, sendo mais expressiva em *grids* mais refinados, podendo chegar a 4/5 do total de simulações previstas.

Como trabalhos futuros estão sendo consideradas novas metodologias para a seleção de pontos pelo *grid* para a execução de simulações, combinadas a métodos de aproximação mais eficientes, possivelmente alguns baseados em aprendizado de máquina, para a predição dos valores referentes às simulações não executadas.

## Referências

- [1] API RP 16Q, 2017. Design, selection, operation, and maintenance of marine drilling riser systems. Standard, American Petroleum Institute.
- [2] ISO/TR 13624-2:2009, 2009. Petroleum and natural gas industries — drilling and production equipment — part 2: Deepwater drilling riser methodologies, operations, and integrity technical report. Standard, Technical Committee ISO/TC 67.
- [3] Bachrathy, D. & Stépán, G., 2012. Bisection method in higher dimensions and the efficiency number. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, vol. 56, n. 2, pp. 81–86.
- [4] Chapra, S. C., 2013. *Métodos Numéricos Aplicados com Matlab® para Engenheiros e Cientistas*. AMGH Editora Ltda, Porto Alegre, 3 edition.