

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Isabella Viana da Silva**

**Aplicação de Técnicas de Otimização em  
Operações de Conexão Vertical Direta de 1ª  
Extremidade**

**Projeto de Graduação**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia  
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Ivan Fabio Mota de Menezes

Rio de Janeiro  
Junho de 2021

ISABELLA VIANA DA SILVA

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO EM OPERAÇÕES DE CONEXÃO  
VERTICAL DIRETA DE 1ª EXTREMIDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, como requisito  
parcial para obtenção do grau de Engenheiro  
Mecânico.

Orientador:  
Ivan Fabio Mota de Menezes

Rio de Janeiro, RJ  
2021

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à minha família, que viabilizou essa trajetória, proporcionando uma educação de qualidade desde o início da minha vida acadêmica.

Ao meu irmão, Gabriel, pela amizade e contribuição no desenvolvimento do código.

Agradeço também à PUC, em especial à Vice-Reitoria Comunitária, que desempenha um trabalho de fundamental importância ao acolher alunos que não teriam a oportunidade de ingressar na Instituição sem uma bolsa.

Aos meus amigos, que estiveram ao meu lado ao longo dessa jornada, e forneceram suporte nos momentos mais difíceis. Em especial ao meu amigo Lucas, que compartilhou essa trajetória acadêmica comigo e, além do apoio emocional, foi fundamental para que eu conseguisse concluir o curso com êxito.

Agradeço ao meu orientador, por todo o auxílio durante a realização desse trabalho, assim como pelas excelentes aulas proporcionadas durante o curso, e ao corpo docente do DEM por todo conhecimento compartilhado ao longo dos últimos anos.

Aos meus colegas da Subsea 7, por contribuírem de maneira significativa com meu desenvolvimento profissional.

Por fim, gostaria de agradecer a todas as pessoas que acreditaram em mim e, mesmo não me conhecendo, contribuíram de alguma forma para a realização desse sonho, em especial aos colegas que estudaram comigo na EFOMM e me apoiaram para que eu desse o primeiro passo.

## RESUMO

### **Aplicação de Técnicas de Otimização em Operações de Conexão Vertical Direta de 1ª Extremidade**

A elevada demanda envolvendo a atividade de exploração em condições inóspitas tem exigido novas soluções, que viabilizem os projetos por meio da diminuição de custos. No que diz respeito à instalação, é interessante que as operações sejam realizadas no menor tempo possível. O atual projeto visa o desenvolvimento de um algoritmo para minimizar o número de flutuadores necessários durante a verticalização de um Módulo de Conexão Vertical em uma operação de Conexão Vertical Direta de 1ª Extremidade. Os resultados apresentados indicam que a rigidez à flexão da estrutura é o principal fator que impacta a configuração final, o que justifica o uso de um *software* de elementos finitos nas análises de verticalização. No que diz respeito ao tempo computacional, a metodologia desenvolvida se mostrou satisfatória. Entretanto, em casos em que é necessário um maior número de flutuadores, isso passa a se tornar uma variável importante ao avaliarmos a aplicabilidade da ferramenta. Dessa maneira, torna-se importante e até mesmo necessário a utilização de um método de otimização mais eficiente.

Palavras-chave: Conexão Vertical Direta. Otimização. Módulo de Conexão Vertical.

## **ABSTRACT**

### **Application of Optimization Techniques in Direct Vertical Connection Operations**

The high demand involving exploration activity in inhospitable conditions has required new solutions that make projects viable by reducing costs. Regarding installation, it is of interest that the operations are performed in the shortest time possible. The current project aims to develop an algorithm to minimize the number of floats required during the verticalization of a Vertical Connection Module in a Direct Vertical Connection operation. The results presented indicate that the bending stiffness of the structure is the main factor impacting the final configuration, which justifies the use of finite element software in verticalization analyses. With respect to computational time, the developed methodology proved satisfactory. However, in cases where a larger number of floats is required, this becomes an important variable when evaluating the applicability of the tool. Thus, it becomes important and even necessary to use a more efficient optimization method.

**Keywords:** Direct Vertical Connection. Optimization. Vertical Connection Module.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Oferta Interna de energia 2010-2019. ....	11
Figura 2. Exemplo de <i>Layout</i> Submarino [6] .....	12
Figura 3. PLSV Seven Waves – Método vertical <i>Flex lay</i> com <i>moonpool</i> . ....	14
Figura 4. Tensionador de 4 lagartas.....	15
Figura 5. Módulo de Conexão Vertical Direta.....	16
Figura 6. Conexão Vertical Direta de 1ª Extremidade [7] .....	17
Figura 7. Flutuadores submarinos.....	17
Figura 8. Conexão Vertical Direta de 2ª Extremidade [7] .....	18
Figura 9. Verticalização do MCV na CVD de 2ª [7] .....	19
Figura 10. Camadas do duto flexível [6].....	20
Figura 11. Seção transversal do perfil de uma carcaça de dutos flexíveis [17] .....	20
Figura 12. Gráfico do momento fletor no flexível em função da curvatura [9] .....	21
Figura 13. Conector flangeado. ....	22
Figura 14. Restritor de Curvatura. ....	23
Figura 15. Representação geométrica de um problema de PL [10] .....	25
Figura 16. Árvore de enumeração [10].....	27
Figura 17. Modelo discreto da linha no OrcaFlex [13] .....	30
Figura 18. Modelagem no OrcaFlex [13] .....	31
Figura 19. Esquema representativo do algoritmo utilizado.....	32
Figura 20. Referências das cotas para modelagem do MCV. ....	35
Figura 21. Curva de rigidez à flexão da estrutura flexível – Teste 1.....	36
Figura 22. Configuração final do <i>base case</i> do Teste 1 [13] .....	37
Figura 23. Configuração final de contingência do Teste 1 [13].....	38
Figura 24. Curva de rigidez à flexão da estrutura flexível – Teste 2.....	40
Figura 25. Configuração final do <i>base case</i> do Teste 2 [13] .....	41
Figura 26. Configuração final de contingência do Teste 2 [13].....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros considerados para o MCV – Teste 1.....	34
Tabela 2. Parâmetros considerados para o conector – Teste 1.....	35
Tabela 3. Parâmetros considerados para a vértebra – Teste 1.....	35
Tabela 4. Parâmetros considerados para a estrutura flexível – Teste 1 .....	36
Tabela 5. Resultado ótimo – <i>base case</i> do Teste 1 .....	37
Tabela 6. Resultado ótimo - Contingência do Teste 1.....	38
Tabela 7. Parâmetros considerados para o MCV – Teste 2.....	39
Tabela 8. Parâmetros considerados para o conector – Teste 2.....	39
Tabela 9. Parâmetros considerados para a vértebra – Teste 2.....	39
Tabela 10. Parâmetros considerados para a estrutura flexível – Teste 2 .....	40
Tabela 11. Resultado ótimo – <i>base case</i> do Teste 2 .....	41
Tabela 12. Resultado ótimo - Contingência do Teste 2.....	42
Tabela 13. Resultados obtidos para o <i>base case</i> do Teste 1.....	47
Tabela 14. Resultados obtidos para a contingência do Teste 1 .....	47
Tabela 15. Resultados obtidos para o <i>base case</i> do Teste 2.....	48
Tabela 16. Resultados obtidos para a contingência do Teste 2.....	50

## LISTA DE ABREVIATURAS

PLSV – *Pipe Laying Suport Vessel*

CVD – Conexão Vertical Direta

FPSO - *Floating Production Storage and Offloading*

ANM – Árvore de Natal Molhada

BAP – Base Adaptadora de Produção

UEP – Unidade Estacionária de Produção

CAPEX – *Capital Expenditure*

ROV - *Remotely Operated Vehicle*



## SUMÁRIO

1 . INTRODUÇÃO	11
1.1. A INDÚSTRIA DE ÓLEO E GÁS NO BRASIL	11
1.2. MOTIVAÇÃO	12
1.3. OBJETIVOS	13
1.4. METODOLOGIA	13
2 . FUNDAMENTOS TEÓRICOS	14
2.1. PIPE LAYING SUPORT VESSEL	14
<b>2.1.1. Conexão Vertical Direta</b>	15
2.2. DUTOS FLEXÍVEIS	19
<b>2.2.1. Camadas do Duto Flexível</b>	19
<b>2.2.2. Rigidez à Flexão</b>	21
<b>2.2.3. Acessórios</b>	22
2.3. TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO	23
<b>2.3.1. Classificação dos Problemas de Otimização</b>	24
<b>2.3.2. Solução por Enumeração</b>	27
<b>2.3.3. O método <i>Branch and Bound</i></b>	27
3 . ESTUDO DE CASO	29
3.1. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	29
3.2. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	29
<b>3.2.1. Modelagem no OrcaFlex</b>	29
<b>3.2.2. Algoritmo em Python</b>	31
3.3. CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS	32
4 . RESULTADOS	34
4.1. TESTE 1	34
<b>4.1.1. Base Case</b>	36
<b>4.1.2. Contingência</b>	37
4.2. TESTE 2	38
<b>4.2.1. Base Case</b>	40
<b>4.2.2. Contingência</b>	41

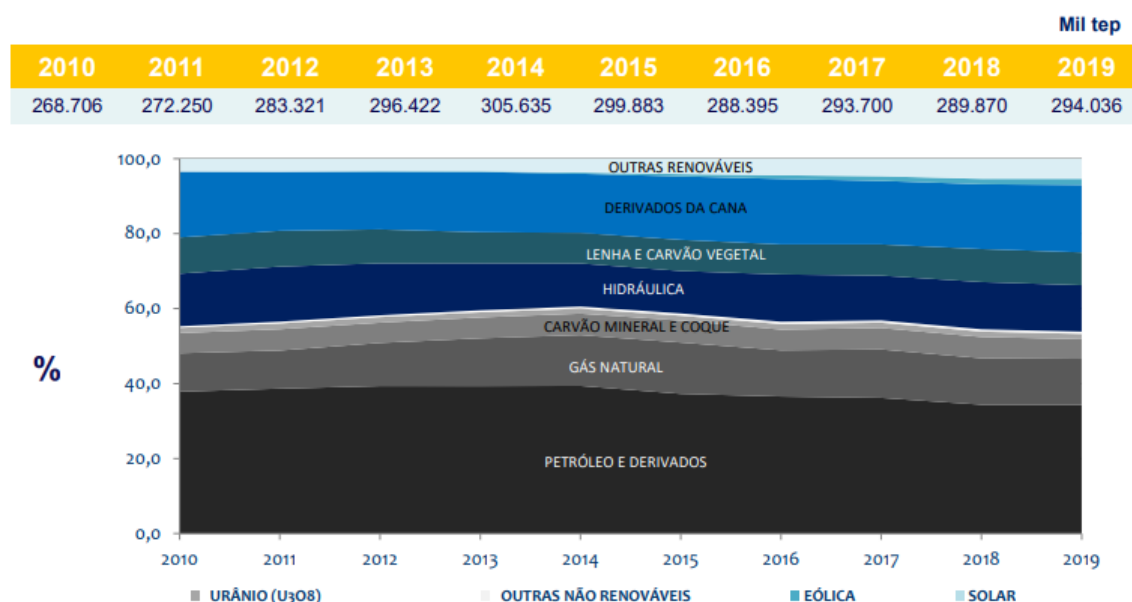
5 . CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	43
6 . REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
APÊNDICE A – RESULTADOS OBTIDOS	47

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. A INDÚSTRIA DE ÓLEO E GÁS NO BRASIL

O Ministério de Minas e Energia do Brasil, em 2020, divulgou o Balanço Energético Nacional, que mostra a Oferta Interna de Energia entre o ano de 2010 e 2019. É possível observar, no gráfico da Figura 1, a dependência de fontes não-renováveis, como o gás natural, petróleo e derivados, no que tange à movimentação da economia brasileira, especialmente no período entre 2011 e 2014, quando houve uma redução na participação dos renováveis, em decorrência da queda de oferta hidráulica.

Figura 1. Oferta Interna de energia 2010-2019



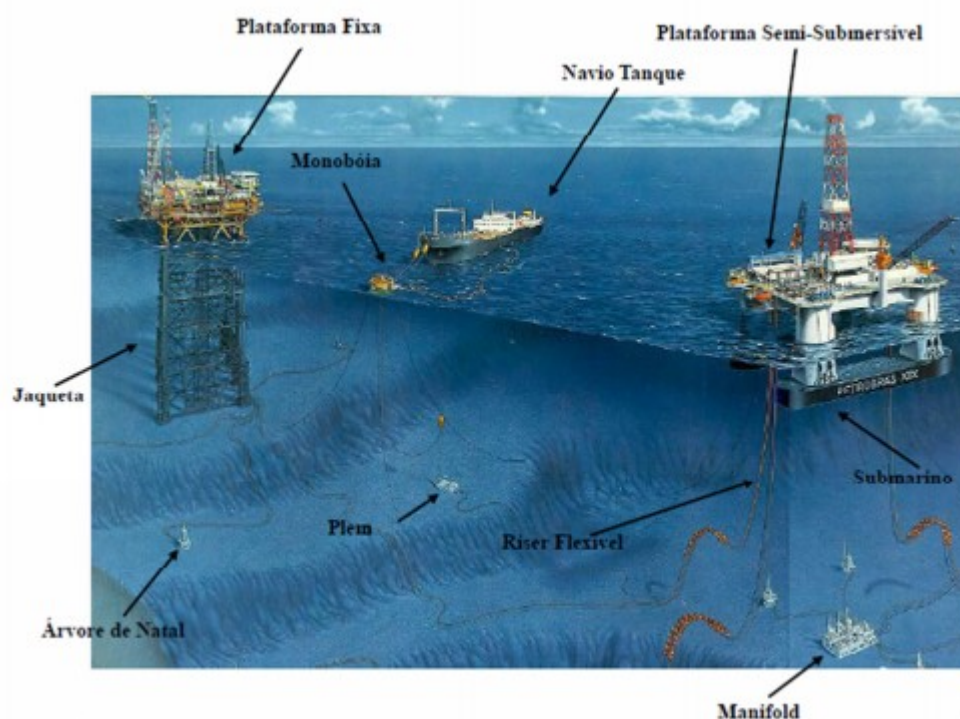
Fonte: Ministério de Minas e Energia – Balanço Energético Nacional (ano base 2020).

As recentes descobertas no pré-sal brasileiro, compostas por grandes acumulações de óleo leve, com alto valor comercial, foram vistas como um grande desafio para a indústria *offshore* no Brasil, que tem desenvolvido projetos em lâminas d'água cada vez mais profundas. O aumento das cargas envolvidas na instalação de dutos e equipamentos exige mais tecnologia e maior controle, durante o lançamento, de parâmetros associados a dutos e equipamentos.

A elevada demanda envolvendo a atividade de exploração em condições inóspitas tem exigido novas soluções, que viabilizem os projetos por meio da

diminuição de custos. No que diz respeito à instalação, o tempo de realização do projeto *offshore* representa uma variável que contribui expressivamente para o aumento do CAPEX (*Capital Expenditure*) e, por isso, é de interesse das operadoras que as operações sejam realizadas no menor tempo possível.

Figura 2. Exemplo de *Layout* Submarino [6]



## 1.2. MOTIVAÇÃO

Nos últimos anos, a opção pela utilização de dutos flexíveis foi uma decisão estratégica da Petrobras, fazendo com que diversos equipamentos fossem desenvolvidos para atender essa demanda. Para interligar o duto flexível com o poço, é necessário o uso de um Módulo de Conexão Vertical (MCV), que se conecta à Árvore de Natal Molhada (ANM), fazendo com que a produção escoe em direção ao FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*). Para tal, é necessária a realização de uma operação denominada Conexão Vertical Direta (CVD).

Na operação de Conexão Vertical Direta de 1ª Extremidade, o Módulo de Conexão Vertical é conectado à extremidade inicial da linha, em uma embarcação do tipo PLSV (*Pipe Laying Support Vessel*), e o conjunto é conduzido em direção à

Base Adaptadora de Produção (BAP) da ANM. Para a realização dessa operação, é necessário que o MCV esteja verticalizado e, para isso, podem ser utilizados flutuadores conectados à linha com o objetivo de diminuir o ângulo do equipamento com a vertical. Além disso, existem restrições quanto ao momento fletor e ao esforço axial no flange do Módulo de Conexão Vertical, assim como em relação ao raio de curvatura da linha, que não pode ser infringido.

A instalação de flutuadores é um passo crítico na operação, e, por isso, é de grande interesse que o número de flutuadores seja o menor possível a fim de diminuir a exposição dos operadores na mesa de trabalho, assim como o tempo de operação da embarcação durante a operação de CVD.

### 1.3. OBJETIVOS

Esse projeto pretende utilizar técnicas de otimização com o objetivo de minimizar o número de flutuadores durante a instalação do Módulo de Conexão Vertical, definindo a cota de instalação que atende às restrições do problema.

### 1.4. METODOLOGIA

O projeto baseia-se no desenvolvimento de um código em Python, utilizando bibliotecas que se comunicam com o *software* OrcaFlex, com o objetivo de simular diferentes configurações, em equilíbrio estático, numa operação de Conexão Vertical Direta de 1ª Extremidade. O parâmetro a ser minimizado é o número de flutuadores para verticalizar o MCV, caso seja necessário, e, para isso, o código simula diferentes combinações possíveis aumentando progressivamente o número de módulos. Para validar os resultados encontrados, serão utilizadas diferentes análises de operações já realizadas pelas embarcações da Subsea 7, para entender se o método proposto fornece resultados coerentes com o que é observado na prática.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1. PIPE LAYING SUPORT VESSEL

Navios especialmente desenvolvidos para lançamento de dutos no leito marinho são chamados de *Pipe Laying Support Vessel* e ao longo desse trabalho, serão referenciados pela sigla PLSV. Os PLSVs contam com equipamentos específicos que viabilizam o lançamento de dutos, rígidos e flexíveis, e podem ser classificados conforme o método de lançamento (*J lay*, *S lay*, *Flex lay*, *Reel lay*, etc.). Segundo Ribeiro (2020) [15], é possível classificar as embarcações de acordo com o posicionamento do sistema de lançamento:

- *Horizontal Lay System* (HLS): sistema horizontal de instalação, onde os tensionadores estão posicionados na direção horizontal e o *overboard* é realizado com o auxílio de uma calha.
- *Vertical Lay System* (VLS): sistema de instalação vertical, com a utilização de uma torre, na qual os tensionadores encontram-se posicionados.

Figura 3. PLSV Seven Waves – Método vertical *Flex lay* com *moonpool*

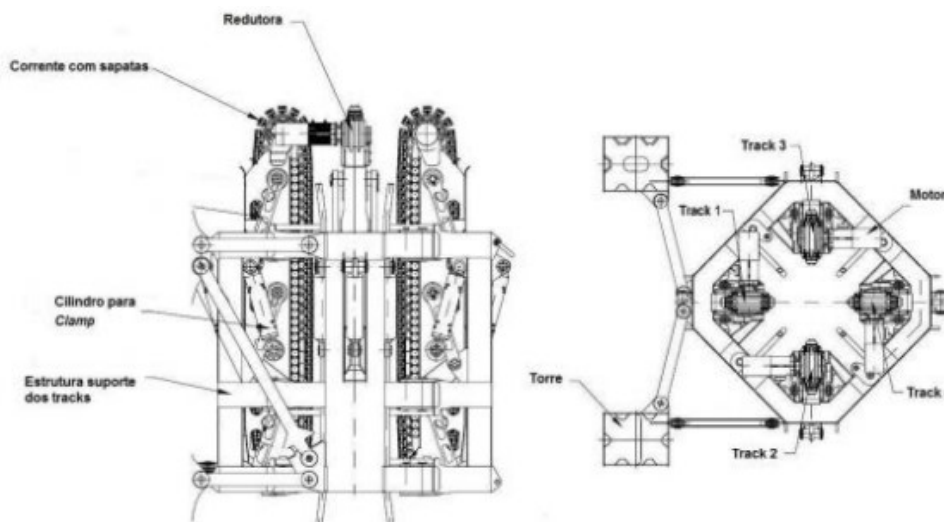


Fonte: Subsea 7

No presente trabalho, destacam-se os navios especializados na instalação de dutos flexíveis, que, por meio de tensionadores, lançam e recolhem linha durante a

operação. Os tensionadores ficam localizados na torre de lançamento e tem seu comprimento proporcional à capacidade de carga.

Figura 4. Tensionador de 4 lagartas



Fonte: <http://www.huisman.com>, acessado em 20/04/2021.

As sapatas, representadas na Figura 4, são elementos formados por materiais polímeros, que geram uma força de atrito com a capa externa do flexível, e são responsáveis por sustentar a carga durante o lançamento e recolhimento,

Nos últimos anos, a instalação de dutos flexíveis no Brasil tem sido impulsionada principalmente pela Petrobras e, para isso, as instaladoras devem garantir a integridade dos equipamentos, acessórios, assim como das linhas flexíveis, priorizando o desempenho operacional.

As principais operações incluem a transferência da extremidade da linha para a UEP (Unidade Estacionária de Produção), instalação de *Lazy Wave*, abandono, recolhimento, pescaria, assim como desmobilizações. O foco desse projeto diz respeito à conexão do MCV ao poço ou equipamento submarino, por meio de uma operação de CVD de 1ª Extremidade.

### 2.1.1. Conexão Vertical Direta

Na operação de CVD, o duto ou umbilical é conectado à BAP ou equipamento submarino. Essa operação tem início após a conexão do MCV à extremidade do duto e tem como objetivo acoplar o equipamento ao *hub* da BAP do poço ou

equipamento submarino. Dependendo do sentido de lançamento, a operação pode ser realizada com a 1ª ou a 2ª extremidade.

Figura 5. Módulo de Conexão Vertical Direta



Fonte: Subsea 7

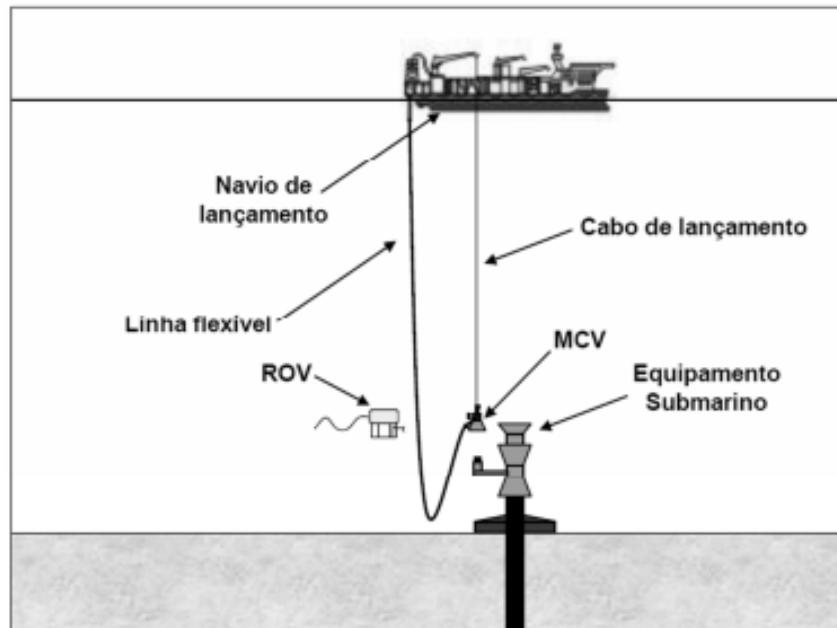
#### 2.1.1.1. Conexão Vertical Direta de 1ª Extremidade

A operação CVD de 1ª Extremidade ocorre tipicamente quando o lançamento do duto é iniciado no poço e o lançamento é realizado em direção à UEP. Após a conexão do equipamento à 1ª extremidade, o conjunto desce com as estruturas flexíveis sustentadas pelos tensionadores do PLSV, conforme representado na Figura 6. Quando o conjunto se aproxima do leito marinho, o ROV (Veículo Submarino Operado Remotamente) realiza a conexão do guindaste à lingada previamente instalada ao MCV, transferindo a carga ao guindaste e permitindo que o conjunto seja verticalizado.

Em muitos casos, é necessária a utilização de flutuadores, que auxiliam na verticalização do equipamento e garantem que a curvatura do duto seja respeitada, assim como minimizam os esforços gerados no flange do MCV. Conforme discutido anteriormente, a instalação desses módulos representa um passo crítico na operação e, por isso, é de grande interesse que o número de boias necessárias para verticalizar o equipamento seja minimizado.



Figura 6. Conexão Vertical Direta de 1ª Extremidade [7]



Os flutuadores são amarrados à estrutura flexível por meio de cabos de polipropileno, gerando o empuxo necessário para que o conjunto seja verticalizado. Em geral, as cotas de amarração dos flutuadores variam, dependendo da estrutura flexível, assim como dos acessórios e equipamentos. Cada embarcação conta com um conjunto de flutuadores modulares, caracterizados por diferentes empuxos resultantes.

Figura 7. Flutuadores submarinos.

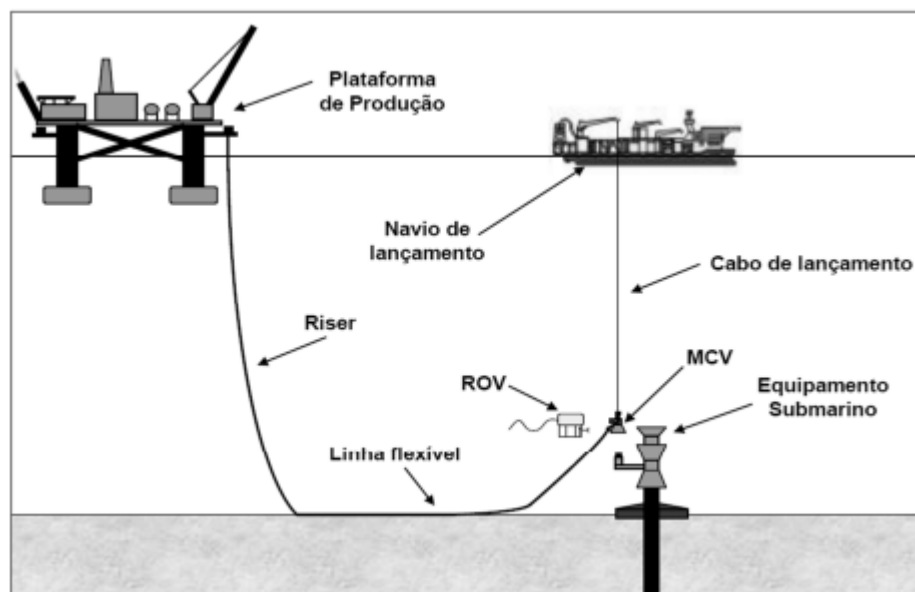


Fonte: <http://www.brastech.net.com.br/>, acessado em 27/05/2021.

#### 2.1.1.2. Conexão Vertical Direta de 2ª Extremidade

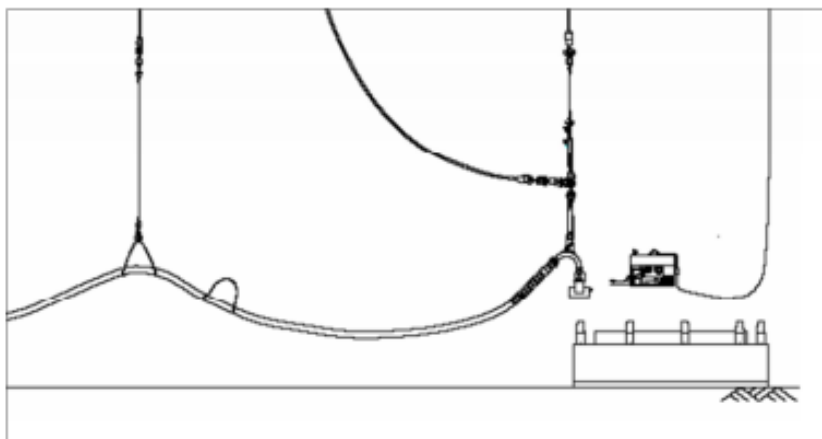
Essa operação é realizada quando o lançamento é iniciado pela UEP e segue em direção ao poço ou equipamento submarino. Após a conexão do equipamento, é realizado o *overboarding* do conjunto e, com o equipamento sustentado pelo guincho e a corcova presa ao guindaste, é iniciada a verticalização do equipamento e o posterior acoplamento ao equipamento submarino.

Figura 8. Conexão Vertical Direta de 2ª Extremidade [7]



A corcova facilita a movimentação do conjunto e auxilia na dissipação do movimento imposto pela embarcação. Quando a corcova não é suficiente para garantir a verticalização do MCV, respeitando as restrições da operação, são utilizados flutuadores, similares ao representado na Figura 7.

Figura 9. Verticalização do MCV na CVD de 2ª [7]



## 2.2. DUTOS FLEXÍVEIS

Os dutos flexíveis são classificados em *flowlines*, *risers* e *jumpers* e são utilizados tanto para transporte de óleo do poço à plataforma, como para injeção de fluidos, tais como água e gás. As aplicações incluem trechos de linhas sobre o solo marinho (*flowlines*) e trechos dinâmicos, como *risers* e *jumpers*, que conectam os equipamentos e *flowlines* ao FPSO.

Esse tipo de duto tem como características baixa rigidez à flexão e alta rigidez à deformação axial, assim como um fator de amortecimento estrutural elevado, sendo formados por camadas de metal e polímero termoplásticos justapostas. Outra vantagem diz respeito à capacidade de acomodação no leito marinho, possibilidade de realizar curvas de raios menores, além de maior facilidade de armazenamento e instalação [17].

### 2.2.1. Camadas do Duto Flexível

Segundo Thorley (2015) [16], a carcaça é formada por uma camada metálica de aço inoxidável com intertravamentos, o que oferece resistência ao colapso devido à pressão. O intertravamento proporciona alta rigidez axial e maior resistência ao colapso, o que implica em um maior limite de compressão da estrutura.

Figura 10. Camadas do duto flexível [6]



Já a armadura de pressão, usualmente fabricada em aço carbono, também formada por uma camada com intertravamentos, oferece resistência à pressão interna. A armadura de tração, por sua vez, tem como função resistir à tração e à torção. Essa camada, helicoidal, permite o deslizamento dos arames quando estão submetidos a esforços de flexão [16].

Figura 11. Seção transversal do perfil de uma carcaça de dutos flexíveis [17]



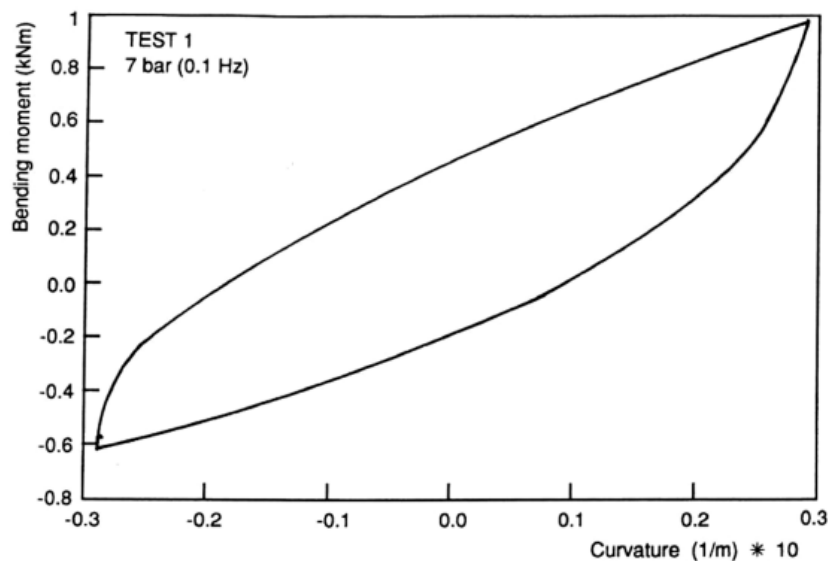
Além das camadas metálicas, o duto conta com algumas camadas poliméricas. A interna é geralmente composta de poliamida e tem como função garantir a estanqueidade do duto, enquanto a externa, além de impedir a invasão de agentes externos, auxilia no isolamento térmico e proporciona uma melhor acomodação entre as camadas plásticas e metálicas. A região situada entre a camada plástica externa e interna constitui o que, ao longo desse trabalho, será chamado de anular. Já as fitas poliméricas e camadas anti-atrito são geralmente formadas por fibras de

aramida e posicionadas sobre as camadas de tração, porém não influenciam na resistência do flexível [16].

### 2.2.2. Rigidez à Flexão

Segundo Lopes (2005) [1], apesar de sua elevada rigidez torcional e axial, esta estrutura é altamente complacente à flexão e possui um comportamento complexo que depende da interação entre suas camadas. Quando as camadas sofrem movimento relativo entre si, a rigidez à flexão diminui, já quando submetido a uma curvatura pequena, nenhum escorregamento ocorre entre as camadas, uma vez que a força cortante é menor do que a força de atrito interno.

Figura 12. Gráfico do momento fletor no flexível em função da curvatura [9]



O gráfico representado na Figura 12 mostra o comportamento típico do momento fletor em função da curvatura do duto flexível onde a rigidez à flexão é encontrada calculando-se o coeficiente angular da curva, que varia de acordo com a curvatura. Além da curvatura, a rigidez à flexão depende também da profundidade na qual o duto se encontra. Segundo Lopes (2005) [1], as baixas temperaturas agem diretamente no módulo de elasticidade de polímeros, tornando-os mais rígidos. Além disso, com maiores profundidades de trabalho, o aumento da pressão de contato entre as suas camadas se dá devido ao aumento da pressão hidrostática no duto

flexível. A princípio, o efeito prático de uma maior pressão de contato se dá por redução do raio crítico de escorregamento entre as camadas.

De maneira geral, o fabricante fornece curvas de rigidez à flexão em função da curvatura para diferentes lâminas d'água e condições de operação, que influenciam diretamente a pressão exercida no duto. Além disso, outra variável importante é a condição do anular, que pode estar na condição estanque ou alagado (presença de água do mar). O alagamento do anular costuma estar associado a uma ruptura na capa externa de vedação e afeta de maneira significativa o comportamento do flexível no que diz respeito à rigidez flexional.

### **2.2.3. Acessórios**

Os acessórios possuem funções específicas, tanto durante a instalação do flexível, quanto durante toda sua vida útil. Em uma operação de CVD, destacam-se dois acessórios, que influenciam diretamente o comportamento do conjunto: o conector e a vértebra.

#### **2.2.3.1. Conector**

Os conectores são utilizados para estabelecer uma ligação entre diferentes tramos ou entre um tramo e um equipamento e devem garantir a estanqueidade, a fim de evitar possíveis vazamentos. Esses acessórios são formados por um corpo metálico forjado e uma jaqueta externa, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13. Conector flangeado.



Fonte: <http://simeros.com/>, acessado em 03/05/2021.

### 2.2.3.2. Restritor de Curvatura

Outro acessório importante é o restritor de curvatura, ou vértebra, que tem como objetivo garantir a integridade do duto flexível, a fim de evitar o infringimento do raio mínimo de curvatura na região próxima ao conector. Esse acessório, ilustrado na Figura 14, é fabricado em peças bipartidas de aço ou polímero e tem como objetivo proteger o flexível por meio do travamento de seus elementos.

Figura 14. Restritor de Curvatura.



Fonte: <https://www.trelleborg.com/> acessado em 03/05/2021.

## 2.3. TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO

A Programação Matemática (PM) trata dos problemas de minimização de uma função de uma ou mais variáveis em um determinado domínio. Segundo Bastos (2004) [4], as seguintes definições envolvem um problema de otimização:

- Variáveis de projeto: são aquelas que se alteram durante o processo de otimização, podendo ser contínuas ou discretas.
- Restrições: são funções de igualdade ou desigualdade sobre as variáveis de projeto que definem uma região na qual se localizam os candidatos a solução do problema de otimização.
- Espaço de busca: é o conjunto que compreende as soluções possíveis ou viáveis sobre as variáveis de projeto do problema a ser otimizado, sendo delimitado pelas funções de restrição.
- Função objetivo: é a função de uma ou mais variáveis de projeto que se deseja otimizar.

- Ponto ótimo: ponto formado pelas variáveis que minimizam a função objetivo e satisfaz as restrições.
- Valor ótimo: é o valor da função objetivo no ponto ótimo.

### **2.3.1. Classificação dos Problemas de Otimização**

Em geral, as técnicas de programação matemática para solução de problemas de otimização são divididas em dois grandes grupos: programação não linear e programação linear.

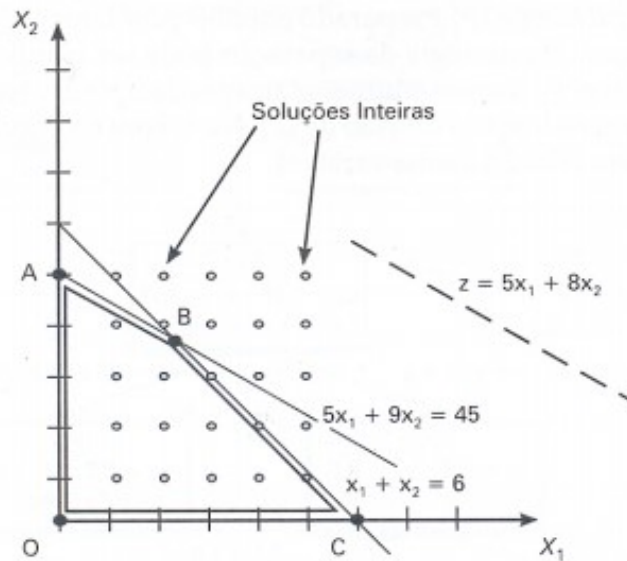
Na programação não linear, pelo menos uma das funções envolvidas (seja a função objetivo ou as restrições) é não linear em relação às variáveis de projeto. Nesse grupo de problemas, mais comumente encontrados na Engenharia Mecânica, existem diversos algoritmos conhecidos na literatura que podem ser utilizados na solução dos problemas, tais como Newton-Raphson, BFGS, Programação Quadrática Sequencial, dentre outros.

A Programação Linear trata de problemas de otimização nos quais tanto a função objetivo, como as restrições, envolvem funções lineares. Dentre os algoritmos mais conhecidos na literatura para a solução de problemas lineares, destacam-se o Simplex e o Algoritmo de Pontos Interiores.

A Figura 15 representa geometricamente um problema com restrições lineares. Uma vez que a função objetivo é linear, o ótimo local é, por consequência, um ótimo global [10].



Figura 15. Representação geométrica de um problema de PL [10]



Quando as variáveis podem assumir apenas valores inteiros, o problema é dito de Programação Inteira (PI). Essas variáveis, quando do tipo binárias, são utilizadas frequentemente em problemas de decisão. O problema de PI ainda pode ser classificado como um problema de Programação Inteira Total, onde todas as variáveis de decisão são do tipo inteiro, ou como de Programação Inteira Mista, onde parte das variáveis pode assumir valor real [10].

A PI é uma ferramenta amplamente utilizada para resolver problemas de otimização combinatória.

Dependendo das informações utilizadas na solução dos problemas de otimização, os algoritmos para solução desses problemas podem ser classificados em dois grandes grupos: probabilísticos e determinísticos.

#### 2.3.1.1. Métodos determinísticos

Os métodos determinísticos geram uma sequência determinística de soluções possíveis. Nesse caso, as funções objetivo e as restrições são dadas por funções matemáticas e relações funcionais. Segundo Bastos (2004) [4], a função objetivo deve ser contínua e diferenciável no espaço de busca. Esse tipo de problema pode ser representado matematicamente da seguinte maneira:

Minimizar  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

Satisfazendo:

$$\begin{cases} g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \{ \leq = \geq \} b_1 \\ \vdots \\ g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \{ \leq = \geq \} b_m \end{cases}$$

Em que:

$x_1, x_2, \dots, x_n$  são as variáveis de projeto;

$f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  é a função objetivo;

$g_1, g_2, \dots, g_m$  são as restrições.

Nesse caso, o espaço de busca do problema considera variáveis contínuas e, após a otimização, são fornecidas aproximações das variáveis para que se enquadrem no espaço discreto.

#### 2.3.1.2. Métodos probabilísticos

Segundo Holtz (2005) [11], os métodos de otimização baseados nos algoritmos probabilísticos usam somente a avaliação da função objetivo e introduzem no processo de otimização dados e parâmetros estocásticos. Os algoritmos genéticos são os exemplos de métodos probabilísticos mais conhecidos na literatura. Por não utilizarem a derivada da função objetivo, são considerados métodos de ordem zero.

Segundo Bastos (2004) [4], algumas vantagens desses métodos são:

- a função objetivo e as restrições não precisam necessariamente ter uma representação matemática;
- não requerem que a função objetivo seja contínua ou diferenciável;
- trabalham adequadamente, tanto com parâmetros contínuos quanto com discretos, ou ainda com uma combinação deles;
- não necessitam de formulações complexas ou reformulações para o problema;
- não há restrição alguma quanto ao ponto de partida dentro do espaço de busca da solução;
- realizam buscas simultâneas no espaço de possíveis soluções por meio de uma população de indivíduos;

- Otimizam muitas variáveis, desde que a avaliação da função objetivo não tenha um custo computacional demasiadamente alto.

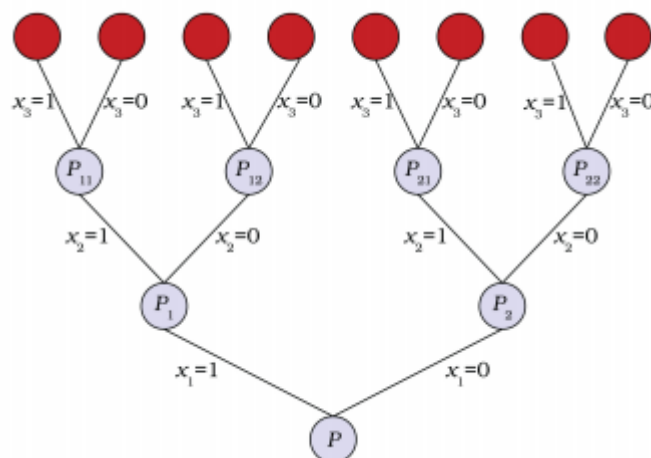
### 2.3.2. Solução por Enumeração

Uma maneira de se encontrar a solução para um problema de Programação Inteira é enumerar todas as possíveis soluções e, calculando os possíveis valores para a função objetivo, escolher aquela que apresenta o valor mínimo. Essa abordagem é considerada ineficiente, mas pode ser aplicada a problemas com poucas variáveis, em um espaço de busca limitado.

### 2.3.3. O método *Branch and Bound*

Segundo Blazewicz (1996) [5], o princípio desse método consiste na enumeração de todas as soluções viáveis de um problema de otimização combinatorial, tal que propriedades ou atributos não compartilhados por qualquer solução ótima sejam detectados previamente. Um atributo, chamado também de ramo da árvore de enumeração, define um subconjunto do conjunto de todas as soluções viáveis do problema original onde cada elemento do subconjunto satisfaz este atributo.

Figura 16. Árvore de enumeração [10]



De acordo com Render (1997) [14], o algoritmo busca uma solução ótima por meio do exame de somente uma parcela do número total de possíveis soluções.

Para tal, o método efetua partições no espaço das soluções, dividindo-o em problemas menores (*branch*) até que a solução ótima seja encontrada. Segundo Santos [10], a fixação recursiva de variáveis discretas cria uma árvore, semelhante ao esquema representado na Figura 16, onde é possível identificar:

- Nós internos: representam as soluções que podem ser obtidas respeitando-se as variáveis já fixadas.
- Folhas: representam soluções completas.

A grande diferença desse método para um problema de enumeração consiste no descarte de alguns ramos por meio do uso de limites calculados ao longo da enumeração (*bound*).

Um problema de enumeração com  $k$  variáveis de decisão (binárias), por exemplo, gera  $2^k$  soluções, e a ausência de um método que venha a descartar algumas possibilidades seria ineficiente, mesmo que fornecesse uma solução ótima para o problema em um número finito de passos.

### 3. ESTUDO DE CASO

#### 3.1. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Realizada uma introdução às operações executadas por um navio do tipo PLSV, é possível formular o problema de otimização que envolve a verticalização do MCV durante uma operação de CVD de 1ª Extremidade. O problema a ser estudado visa o desenvolvimento de um código em Python que tem como objetivo minimizar o número de flutuadores na operação, quando necessária a utilização de flutuadores para verticalização do equipamento.

Para tal, o código se comunica com o *software* OrcaFlex e, por meio de uma estrutura iterativa, gera diferentes configurações até encontrar a solução ótima. A interface de programação, OrcFxAPI, é implementada como uma DLL do Windows que exporta funções desenvolvidas especialmente para automatizar o uso do *software*.

#### 3.2. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

##### 3.2.1. Modelagem no OrcaFlex

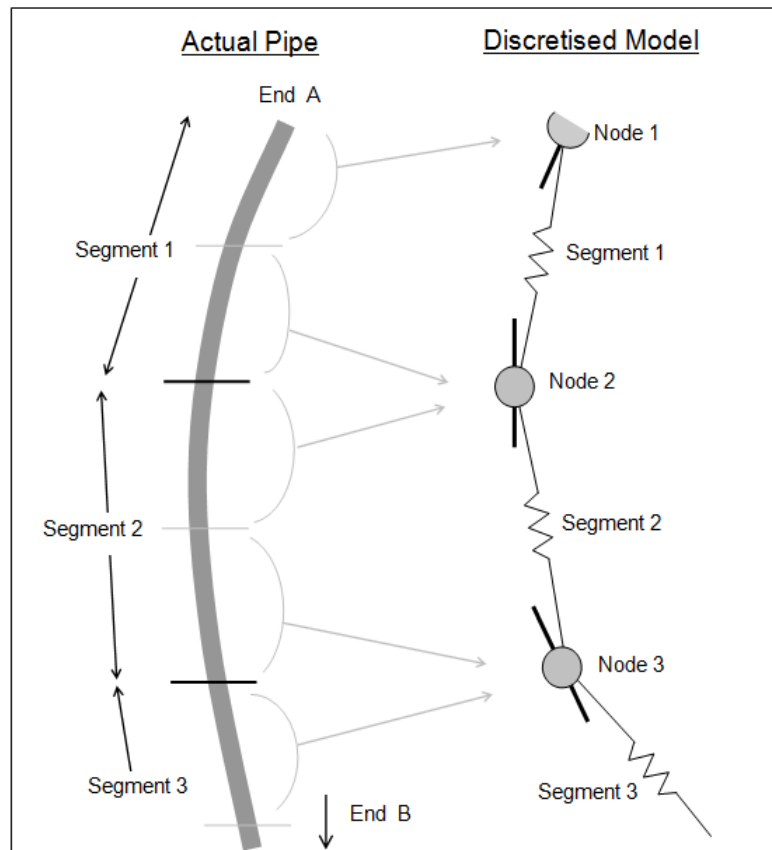
O OrcaFlex, desenvolvido pela Orcina Ltd. [13], é uma ferramenta de análise de elementos finitos utilizada principalmente para engenharia *offshore*. Conforme discutido na seção **Rigidez à Flexão**, quando o duto flexível está submetido a grandes curvaturas, a sua rigidez possui um comportamento não-linear, de acordo com a curva representada na Figura 12. Essa característica faz com que um cálculo analítico não seja representativo em uma operação como a de CVD, que apresenta elevadas curvaturas na região próxima ao conector. Por isso, optou-se pela utilização de um *software* de elementos finitos para simulação de uma operação de CVD de 1ª.

As linhas e acessórios foram modelados por elementos finitos, já os equipamentos foram definidos como corpos rígidos, modelados no OrcaFlex, versão 10.3c, a partir de uma boia 6D. As linhas são elementos lineares flexíveis utilizados para modelar cabos, mangueiras, correntes e dutos, rígidos ou flexíveis. Esses elementos são representados no OrcaFlex por uma série de elementos de massa unidos por molas sem massa. Os elementos de massa são chamados nós e as

molasses que os unem são chamadas de segmentos, conforme representado na Figura 17 [13].

Cada elemento é dividido em duas metades e suas propriedades são agrupadas e atribuídas ao nó naquela extremidade. Forças e momentos são aplicados nos nós, com exceção do peso, que pode ser aplicado em um *offset*. Já os segmentos são elementos sem massa que modelam apenas as propriedades axiais e de torção da linha. As propriedades de flexão da linha são representadas por elementos mola-amortecedor rotacionais em cada extremidade do segmento, situados entre o nó e o segmento [13].

Figura 17. Modelo discreto da linha no OrcaFlex [13]

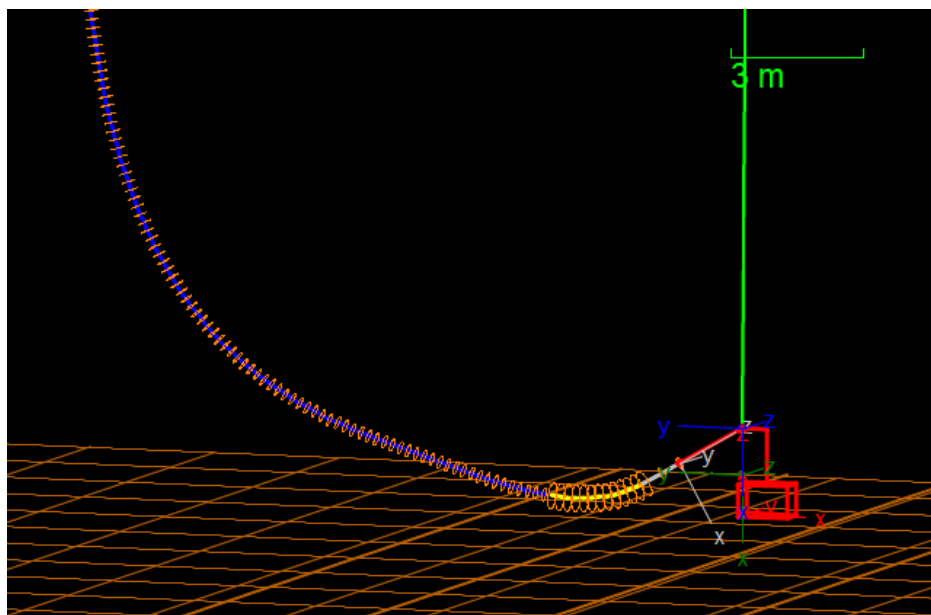


Já as boias 6D são corpos rígidos com seis graus de liberdade: três de translação (X,Y,Z) e três de rotação (*Rotation* 1,2,3). As boias são caracterizadas tanto pela massa como seu momento de inércia e podem ser divididas em três tipos: *lumped buoys*, *spar buoys* e *towed fish*, que diferem basicamente na maneira em que a geometria da boia é definida e, conseqüentemente, no cálculo de efeitos

dinâmicos. No caso estudado, optou-se por uma modelagem mais simples, já que os efeitos dinâmicos não foram levados em consideração no estudo da verticalização do equipamento. Sendo assim, o MCV foi modelado como uma boia 6D do tipo *lumped buoy*, sendo representado por uma geometria abstrata [13].

É importante ressaltar que, como esse trabalho simula configurações estáticas da operação, não foram levadas em consideração as características da embarcação, ou até mesmo o efeito de ondas ou correntezas.

Figura 18. Modelagem no OrcaFlex [13]



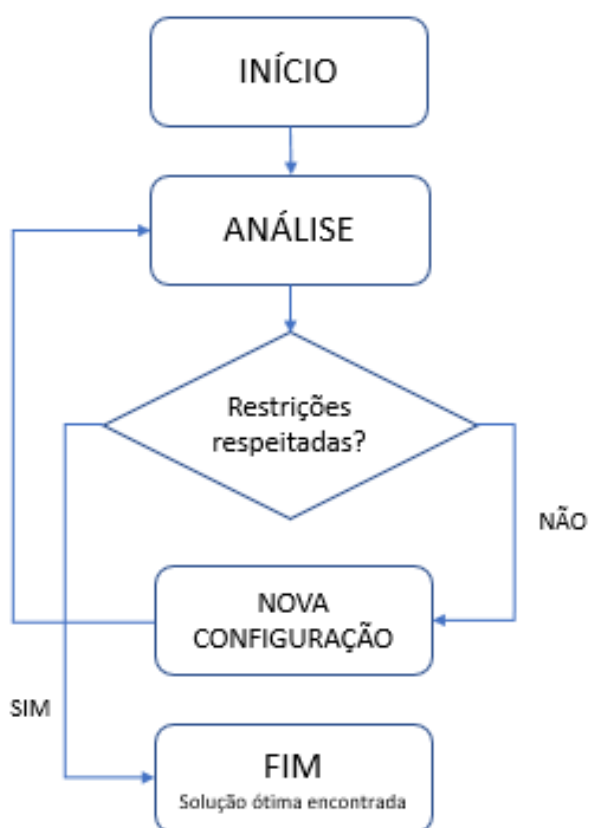
### 3.2.2. Algoritmo em Python

Python é uma linguagem de programação de alto nível, gratuita e amplamente utilizada em diferentes campos de aplicação. Muitos pacotes de extensão encontram-se disponíveis para realizar tarefas como processamento de sinais, de imagem, programação GUI e programação envolvendo bancos de dados.

O código desenvolvido se comunica com o *software* OrcaFlex por meio de uma biblioteca específica, e, por meio de uma lista ordenada, simula diferentes configurações, até que as restrições do problema sejam respeitadas. O esquema da Figura 19 representa a estrutura lógica desenvolvida para solucionar o problema em questão.

O bloco ANÁLISE representa uma série de funções que, inicialmente, adiciona os flutuadores correspondentes ao modelo definido em INÍCIO e, posteriormente, verticaliza o equipamento, alterando o comprimento de linha suspensa no modelo por meio de uma função que utiliza o método de Newton-Raphson. Após a verticalização do MCV, o código realiza uma simulação estática no OrcaFlex, e a partir da verificação dos parâmetros resultantes fornece a solução ótima do problema.

Figura 19. Esquema representativo do algoritmo utilizado



### 3.3. CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS

Conforme discutido anteriormente, durante a instalação do MCV, é necessário que alguns critérios sejam respeitados, a fim de que o duto flexível e o equipamento não sejam danificados.

Nas análises realizadas nesse trabalho, foi considerada uma série de restrições, definidas conforme as boas práticas indicadas pela Petrobras. Dentre



elas, é possível destacar o não-infringimento da curvatura máxima definida pelo fabricante do duto flexível, assim como o não-travamento da vértebra na análise estática. Além disso, a distância máxima considerada entre o solo e o duto flexível foi de pelo menos 0,5m.

Além das restrições mencionadas acima, é importante ressaltar que, do ponto de vista operacional, é importante considerar uma distância de pelo menos 3m entre cada um dos flutuadores. Além disso, considera-se uma boa prática instalar o primeiro módulo a pelo menos 3 m do conector.

## 4. RESULTADOS

Para validação do programa de otimização, foram executadas duas análises, previamente realizadas pela Subsea 7, levando em consideração duas possíveis condições: anular estanque e alagado. Conforme explicado na seção **Rigidez à Flexão**, a condição do anular afeta diretamente a rigidez do duto flexível e, consequentemente, os parâmetros avaliados na análise estática. Por isso, para cada uma das análises, é necessário avaliar as duas condições.

Vale ressaltar que, ao longo da apresentação dos resultados, configurações de  $n$  flutuadores serão representadas a partir de uma expressão do tipo  $(empuxo_1, z_1), \dots, (empuxo_n, z_n)$ , onde  $z$  é a coordenada, em metros, medida ao longo do comprimento da linha, a partir do conector.

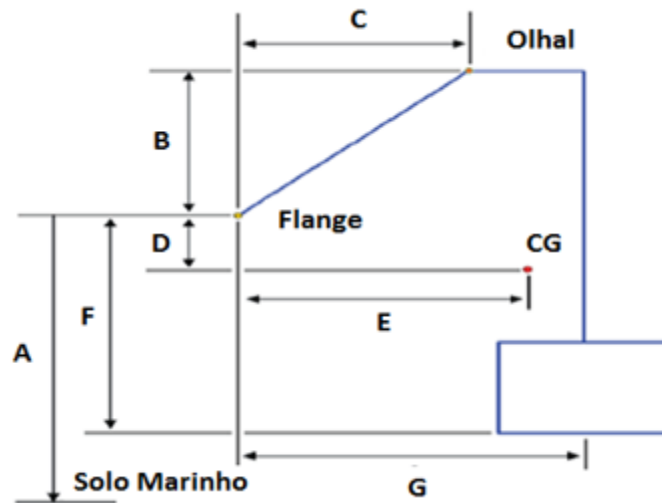
### 4.1. TESTE 1

A primeira análise de CVD de 1ª utilizou como parâmetros para modelagem no OrcaFlex os dados representados na Tabela 1. A modelagem do MCV foi realizada considerando o equipamento uma boia 6D, as cotas correspondentes encontram-se representadas na Figura 20. Vale ressaltar que a cota E, que representa a distância do flange ao CG do equipamento, afeta diretamente a verticalização do equipamento.

Tabela 1. Parâmetros considerados para o MCV – Teste 1

<b>Ângulo do gooseneck [°]</b>	60
<b>A – Distância do flange ao solo [mm]</b>	4234
<b>B - Distância vertical do olhal ao flange [mm]</b>	1156
<b>C – Distância horizontal do olhal ao flange [mm]</b>	2002
<b>D – Distância vertical do flange ao CG [mm]</b>	194
<b>E – Distância horizontal do flange ao CG [mm]</b>	1832
<b>F – Distância vertical do flange a base do MCV [mm]</b>	1587
<b>G – Distância horizontal do flange ao centro do MCV [mm]</b>	2170
<b>Peso na água [kgf]</b>	6057
<b>Peso no ar [kgf]</b>	6940

Figura 20. Referências das cotas para modelagem do MCV



Fonte: Subsea 7

Já os acessórios foram modelados como elementos de linha equivalente e os parâmetros encontram-se representados nas Tabela 2 e Tabela 3.

Tabela 2. Parâmetros considerados para o conector – Teste 1

<b>Peso no ar [kgf]</b>	1240
<b>Peso na água [kgf]</b>	1030
<b>Comprimento [m]</b>	1,42

Tabela 3. Parâmetros considerados para a vértebra – Teste 1

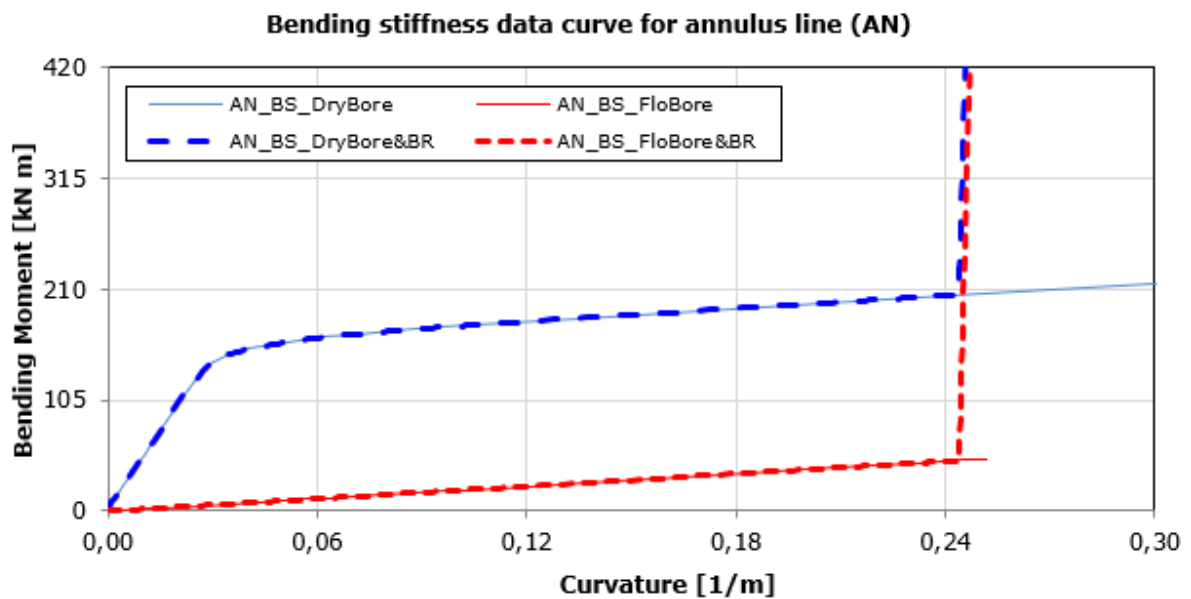
<b>Peso no ar [kgf]</b>	1270
<b>Peso na água [kgf]</b>	1104,9
<b>Comprimento [m]</b>	5,48
<b>Diâmetro extremo [m]</b>	0,576
<b>Raio de travamento [m]</b>	4,10

A estrutura flexível, por sua vez, foi definida a partir de uma malha heterogênea, mais refinada na região crítica, próxima ao conector e, para cada uma das análises, foi considerada uma curva de rigidez à flexão conforme representado pelo gráfico da Figura 21. As propriedades da linha encontram-se na Tabela 4, considerando-se temperatura e pressão associadas à máxima profundidade especificada.

Tabela 4. Parâmetros considerados para a estrutura flexível – Teste 1

<b>Diâmetro interno [m]</b>	0,1524
<b>Diâmetro externo [m]</b>	0,2794
<b>Peso na água [kgf/m]</b>	105,8
<b>Peso no ar [kgf/m]</b>	168,6
<b>Raio admissível [m]</b>	2,27
<b>Rigidez axial [kNm<sup>2</sup>]</b>	686106

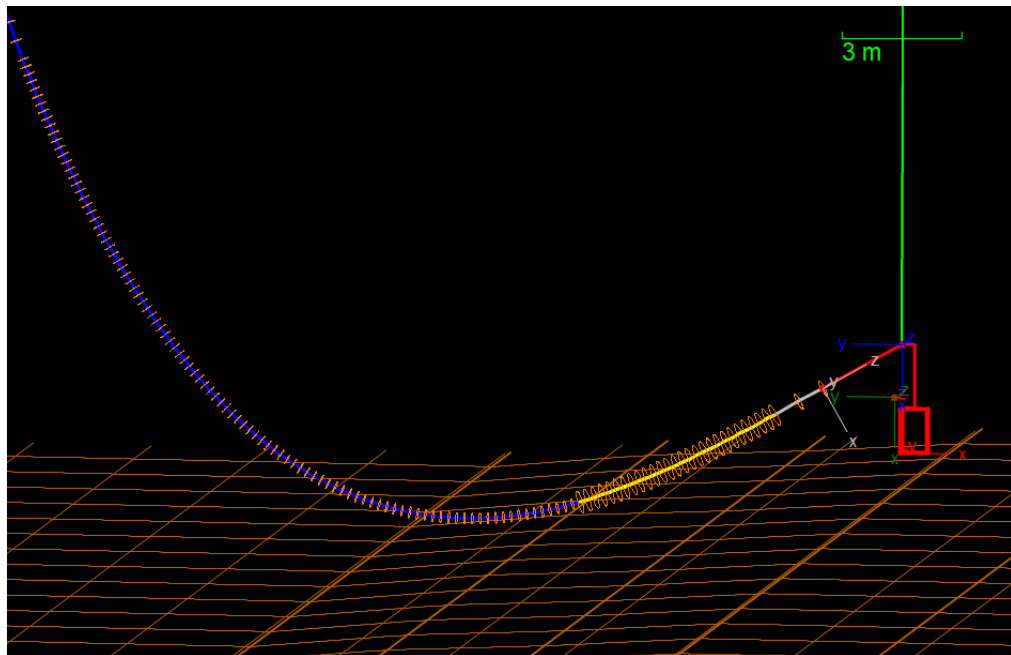
Figura 21. Curva de rigidez à flexão da estrutura flexível – Teste 1



#### 4.1.1. Base Case

Levando em consideração os parâmetros apresentados para modelagem e condição do anular estanque foram obtidos os resultados representados na Tabela 5. A configuração final no OrcaFlex encontrada pelo algoritmo pode ser visualizada na Figura 22.

Figura 22. Configuração final do *base case* do Teste 1 [13]



Nesse caso, numa primeira tentativa, sem o uso de flutuadores, todas as restrições foram respeitadas. Como a solução ótima foi encontrada em apenas uma iteração, o tempo de execução do problema foi bastante reduzido.

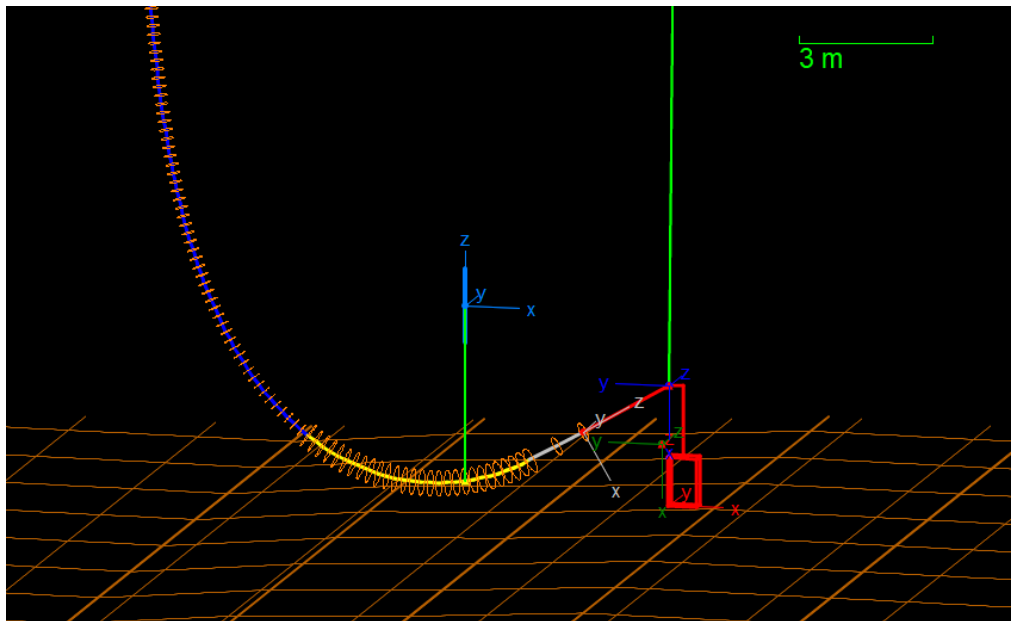
Tabela 5. Resultado ótimo – *base case* do Teste 1

Número de iterações	1
Configuração final	Sem flutuadores
Número de Flutuadores	0

#### 4.1.2. Contingência

Já na análise da configuração de contingência, que apresenta um comportamento mais flexível, como é possível observar pelo gráfico da Figura 21, as restrições não foram respeitadas sem o uso de flutuadores e um número maior de iterações foi necessário para encontrar a solução ótima do problema.

Figura 23. Configuração final de contingência do Teste 1 [13]



Nesse caso, foi necessário o uso de um flutuador de empuxo igual a 754kgf, a 3m do conector, para que o equipamento fosse verticalizado respeitando as restrições do problema. Os resultados apresentados na Tabela 14 do APÊNDICE A – RESULTADOS OBTIDOS mostram que a vértebra apresentou travamento nas primeiras tentativas, o que é coerente ao avaliarmos a menor rigidez à flexão quando comparado ao *base case*.

Tabela 6. Resultado ótimo - Contingência do Teste 1

<b>Número de iterações</b>	6
<b>Configuração final</b>	(754kgf, 3)
<b>Número de Flutuadores</b>	1

#### 4.2. TESTE 2

Uma segunda análise foi realizada, com uma estrutura flexível de outro fabricante, cujo *base case*, segundo a Petrobras, é melhor representado pela curva com anular alagado, ou seja, em que a estrutura apresenta maior flexibilidade.

Os parâmetros do Módulo de Conexão Vertical, também modelado como uma boia 6D, são apresentados na Tabela 7, de acordo com as cotas definidas na Figura 20. Já os acessórios, conforme mencionado anteriormente, foram representados como elementos de linha, com uma malha definida conforme o modelo do Teste 1.

Vale destacar que, nesse caso, a massa do equipamento é consideravelmente menor quando comparada à do teste anterior.

Tabela 7. Parâmetros considerados para o MCV – Teste 2

<b>Ângulo do <i>gooseneck</i> [°]</b>	60
<b>A – Distância do flange ao solo [mm]</b>	4000
<b>B - Distância vertical do olhal ao flange [mm]</b>	862
<b>C – Distância horizontal do olhal ao flange [mm]</b>	1510
<b>D – Distância vertical do flange ao CG [mm]</b>	206
<b>E – Distância horizontal do flange ao CG [mm]</b>	1508
<b>F – Distância vertical do flange a base do MCV [mm]</b>	1122
<b>G – Distância horizontal do flange ao centro do MCV [mm]</b>	1811
<b>Peso na água [kgf]</b>	3692
<b>Peso no ar [kgf]</b>	4244

Já os parâmetros que caracterizam o conector e a vértebra estão apresentados nas Tabela 8 e Tabela 9.

Tabela 8. Parâmetros considerados para o conector – Teste 2

<b>Peso no ar [kgf]</b>	470
<b>Peso na água [kgf]</b>	408,9
<b>Comprimento [m]</b>	0,99

Tabela 9. Parâmetros considerados para a vértebra – Teste 2

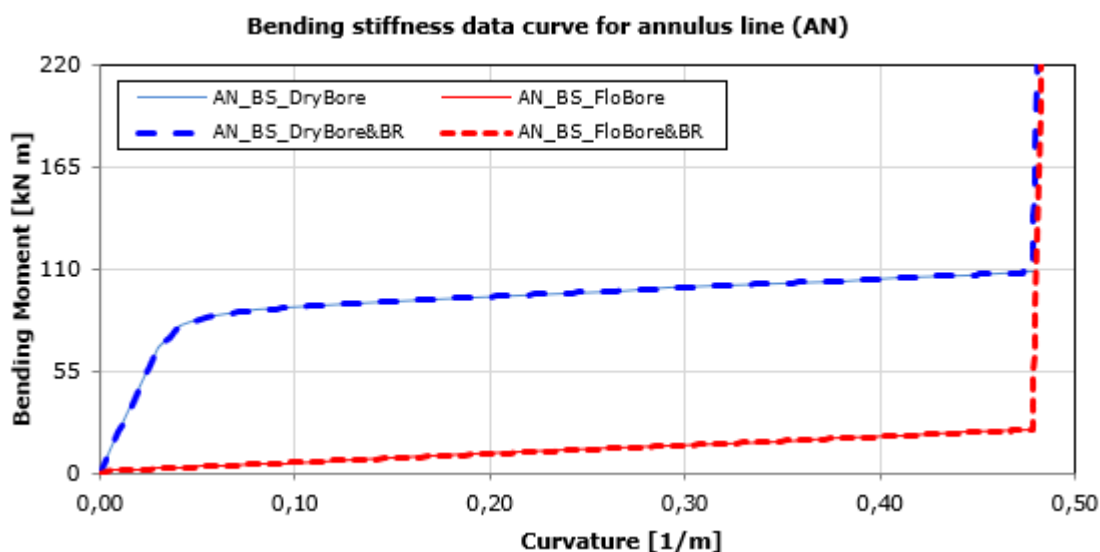
<b>Peso no ar [kgf]</b>	1900
<b>Peso na água [kgf]</b>	1653
<b>Comprimento [m]</b>	2,30
<b>Diâmetro extremo [m]</b>	0,61
<b>Raio de travamento [m]</b>	2,09

Apesar de a estrutura flexível possuir um peso menor, ela apresenta uma diferença sensível no que diz respeito à rigidez flexional, consideravelmente menor quando comparada à estrutura do Teste 1. De acordo com a escala do gráfico apresentado na Figura 24, é possível esperar, em ambos os casos, um comportamento mais flexível quando comparado à mesma condição estudada no primeiro teste.

Tabela 10. Parâmetros considerados para a estrutura flexível – Teste 2

<b>Diâmetro interno [m]</b>	0,1524
<b>Diâmetro externo [m]</b>	0,2944
<b>Peso na água [kgf/m]</b>	60,80
<b>Peso no ar [kgf/m]</b>	130,60
<b>Raio admissível [m]</b>	2,87
<b>Rigidez axial [kNm<sup>2</sup>]</b>	405641

Figura 24. Curva de rigidez à flexão da estrutura flexível – Teste 2



Fonte: Subsea 7

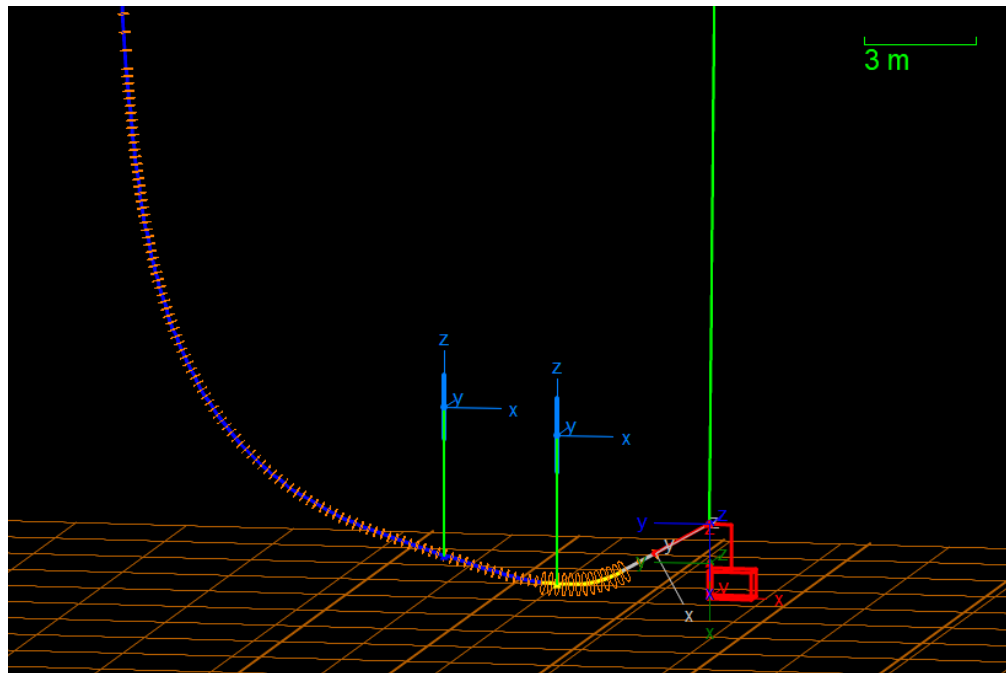
#### 4.2.1. Base Case

Conforme discutido anteriormente, na análise do *base case*, considerou-se o anular alagado, caso análogo à contingência do Teste 1. A configuração final é ilustrada na Figura 25 e mostra que, para verticalizar o equipamento respeitando as restrições definidas, foi necessário o uso de dois flutuadores: um de empuxo de 1151kgf, localizado a 3m do conector, e um de 754kgf localizado a 6m do conector.

Diferentemente do que foi observado no teste anterior, no qual as soluções foram encontradas a partir de um pequeno número de tentativas, nesse caso foram necessárias 78 iterações para que o resultado fosse encontrado, fazendo com que o tempo de execução do problema aumentasse em torno de 25 minutos. Isso reforça o que foi discutido na seção TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO e mostra como um aumento no número de variáveis impacta de maneira significativa o tempo computacional.



Figura 25. Configuração final do base case do Teste 2 [13]



Conforme os resultados apresentados na Tabela 15 do APÊNDICE A – RESULTADOS OBTIDOS, a curvatura da linha foi infringida em todas as tentativas anteriores à configuração apresentada como solução ótima. Esse comportamento é similar ao observado na contingência do Teste 1 e mostra que, quanto mais flexível a estrutura, menor o comprimento de linha para verticalização do equipamento, o que implica em maiores curvaturas na região próxima ao conector.

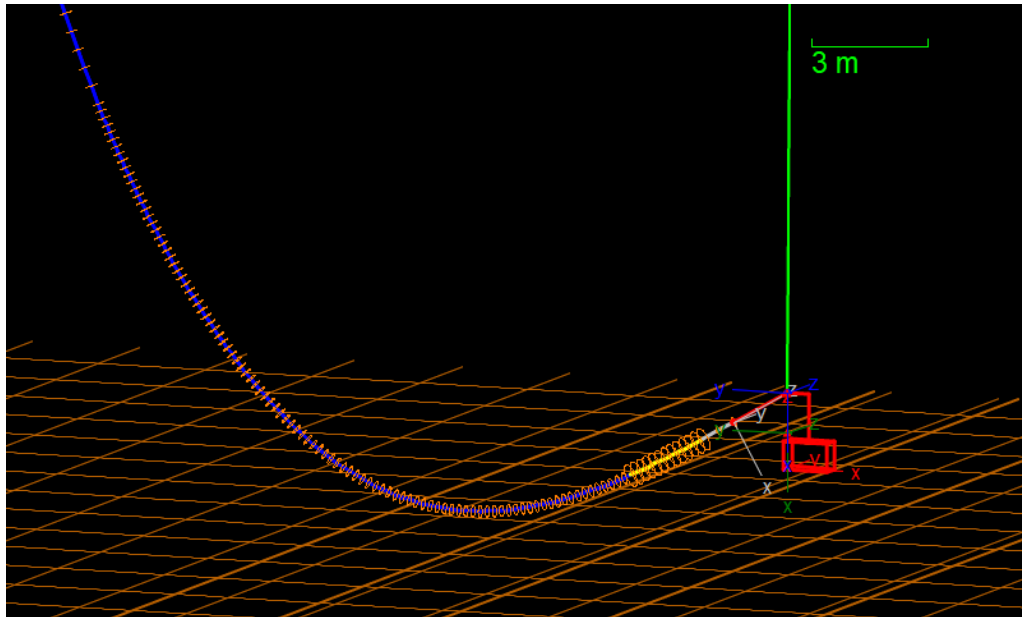
Tabela 11. Resultado ótimo – *base case* do Teste 2

<b>Número de iterações</b>	78
<b>Configuração final</b>	(1151kgf, 3), (754kgf, 6)
<b>Número de Flutuadores</b>	2

#### 4.2.2. Contingência

Já para o caso de contingência, que apresenta maior rigidez quando comparado ao *base case* do Teste 2, não foi necessário o uso de flutuadores para verticalização do conjunto. Essa configuração é análoga ao *base case* do Teste 1 e mostra que, mesmo que parâmetros como a massa do equipamento e dos acessórios tenham influência sobre o comportamento do conjunto, o parâmetro que exerce maior influência sobre as configurações é a rigidez à flexão do duto.

Figura 26. Configuração final de contingência do Teste 2 [13]



Conforme discutido anteriormente, como a solução ótima foi encontrada em apenas uma iteração, o tempo de execução do problema foi consideravelmente menor quando comparado às análises em que foi necessário o uso de flutuador. De forma geral, é possível afirmar que um comportamento mais rígido auxilia a verticalização do equipamento.

Tabela 12. Resultado ótimo - Contingência do Teste 2

<b>Número de iterações</b>	1
<b>Configuração final</b>	Sem flutuadores
<b>Número de Flutuadores</b>	0

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A opção pela utilização de dutos flexíveis, impulsionada pela Petrobras no Brasil nos últimos anos, fez com que diversas tecnologias fossem desenvolvidas para atender essa demanda. Uma das vantagens que pode justificar essa decisão é a maior facilidade de armazenamento e instalação. Além disso, a utilização de estruturas flexíveis permite a reutilização de dutos em outros projetos após a desmobilização de um campo ou poço.

Uma característica importante de estruturas como essas, que as diferem de dutos rígidos, é a grande capacidade de acomodar taxas de deformação associadas à flexão sem levar à falha. Essa propriedade é influenciada por fatores como temperatura, pressão (interna e externa), assim como pela condição do anular. A correta modelagem e análise de operações envolvendo a instalação dessas estruturas é de grande importância, já que garante a segurança e otimiza o desempenho das embarcações responsáveis pela instalação.

Nesse trabalho, foi apresentada uma metodologia baseada em técnicas de otimização que teve como objetivo minimizar o número de flutuadores em uma operação de CVD de 1ª Extremidade. Os resultados apresentados foram bastante coerentes com análises realizadas pela Subsea 7 e, em alguns casos, chegaram a configurações com um número de flutuadores inferior quando comparados a estudos realizados previamente pela empresa. Isso demonstra como a utilização de algoritmos de otimização em determinadas etapas da elaboração de documentos de Engenharia mostra-se vantajosa, podendo chegar a resultados que otimizam não só o tempo de elaboração como o de execução do projeto.

O OrcaFlex é uma ferramenta de análise de elementos finitos utilizada para engenharia *offshore* e conta com uma série de bibliotecas desenvolvidas por usuários que buscam automatizar o uso do *software* de diversas maneiras. Para algumas aplicações, o uso de uma linguagem como o C++ é mais interessante em razão de uma melhor performance. O Python, entretanto, apresenta como vantagens uma linguagem mais simples, bem documentada e acessível, além de possuir uma série de bibliotecas desenvolvidas especialmente para análise de dados.

O uso de um *software* como o OrcaFlex é justificado pelos resultados apresentados já que, como foi possível observar, a rigidez à flexão da estrutura é um dos principais fatores que influencia a verticalização do equipamento. Conforme

discutido anteriormente, esse parâmetro varia de maneira não linear em função da curvatura, o que deve ser levado em consideração na modelagem de operações como a de CVD. Além disso, a condição do anular, conforme discutido anteriormente, afeta de maneira significativa o comportamento da estrutura e, conseqüentemente, o número de flutuadores necessários para verticalização do MCV.

No que diz respeito ao tempo computacional, é possível concluir que o aumento no número de flutuadores e, conseqüentemente, o aumento no número de combinações possíveis tem como consequência um aumento significativo no tempo de execução do problema. Em casos em que é necessário um maior número de flutuadores, isso passa a se tornar uma variável importante ao avaliarmos a aplicabilidade da ferramenta. Dessa maneira, torna-se importante e até mesmo necessário a utilização de um método de otimização mais eficiente, o que abre caminho para o desenvolvimento de futuros trabalhos.

Além disso, vale ressaltar que as análises realizadas não levaram em consideração o comportamento dinâmico do sistema. Em análises de Conexão Vertical Direta, são avaliadas duas etapas. Inicialmente é verificada a verticalização do equipamento, de acordo com o que foi apresentado ao longo desse trabalho. Posteriormente, é avaliado o comportamento dinâmico do conjunto após o travamento do equipamento no *hub* da BAP. Nessa etapa, é aplicado um *heave-up*, que representa a movimentação da embarcação, para que os esforços no flange do MCV sejam avaliados. Para definir uma configuração ótima de flutuadores que atendam todas as restrições consideradas no problema, é interessante que o desenvolvimento de trabalhos futuros inclua a execução de análises dinâmicas.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 LOPES, V., 2005, Influência da Rigidez à Flexão de Duto Flexível na Instalação de Módulos de Conexão Vertical em Águas Profundas. Dissertação de M.Sc., PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- 2 L. E. Vaz, A. Pereira e I. F. M. Menezes, Notas de Aula, 2012.
- 3 G. Vanderplaats, Numerical Optimization Techniques for Engineering Design with Applications, McGraw-Hill, 1984
- 4 Bastos, E.A., 2004, Otimização de seções retangulares de concreto armado submetidas à flexo-compressão oblíqua utilizando Algoritmos Genéticos. Dissertação de Mestrado, COPPE, Programa de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- 5 J. Blazewicz, K. H. Ecker, E. Pesch, G. Schmidt, and J. Weglarz, Scheduling Computer and Manufacturing Process, 2, Ed. Springer-Verlag, 1996.
- 6 Apostila de Engenharia Submarina – LabEco, UFRJ, 2013, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. ORCINA, *Orcaflex Manual User*, UK, 2015.
- 7 GUO, B., SONG, S., GHALAMBOR, A., LIN, R., 2014, Offshore Pipelines: Design, Installation and Maintenance. 2 ed. Oxford, UK, Elsevier.
- 8 API-RP-17B, Recommended Practice for Flexible pipe. 1998, American Petroleum Institute.
- 9 TELLIER, E., THETHI, R., Offshore Inc. “The Evolution of Freestanding Risers”. Offshore and Arctic Engineering, OMAE 79487, Honolulu, Hawaii, USA, 2009.
- 10 Antônio, Rafael & Gomes, Marques & Santos, Haroldo. (2021). Branch-and-Bound para problemas de Otimização Combinatória.
- 11 Holtz, G.C., 2005, Traçado automático de envoltórias de esforços em estruturas planas utilizando um algoritmo evolucionário. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- 12 EPE. Balanço Energético Nacional 2020: Ano base 2019. Rio de Janeiro: EPE. Rio de Janeiro: [s.n.].
- 13 ORCINA, L. T. C. OrcaFlex User Manual: OrcaFlex Version 10.3c. Daltongate Ulverston Cumbria, UK, 2019.

- 14 B. Render and R. M. Stair, Quantitative Analysis for Management, 6, Ed. New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1997.
- 15 Ribeiro, F.O., 2020, Influência da rigidez à flexão não linear de dutos flexíveis em análises globais de instalação em águas ultraprofundas. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica da Universidade Federal Fluminense. Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, Brasil.
- 16 Thorley, R.F., 2015, Análise de instalação de dutos flexíveis por Conexão Vertical Direta. Dissertação de Mestrado, COPPE, Programa de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- 17 Gasparetto, V., 2017, Método de avaliação da vida à fadiga de risers flexíveis através do monitoramento das deformações dos arames da armadura de tração. Dissertação de Mestrado, COPPE, Programa de pós-graduação em Engenharia Oceânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

## APÊNDICE A – RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados encontrados em cada uma das análises incluem, para cada configuração,  $(empuxo_1, z_1), \dots, (empuxo_n, z_n)$ , sendo  $z$  a coordenada, em metros, medida ao longo do comprimento da linha, a partir do conector, a curvatura máxima associada, a distância mínima ao leito marinho e a rotação do MCV em relação à vertical. Além disso, o código também indica se a vértebra se encontra travada na configuração estática.

Outra variável fornecida é número de flutuadores, parâmetro a ser minimizado pelo algoritmo. É possível observar, a partir das Tabela 13, Tabela 14, Tabela 15 e Tabela 16, que as listas foram ordenadas de maneira que o número de flutuadores aumenta progressivamente. Além disso, os intervalos correspondentes à coordenada  $z$  foram definidos conforme a avaliação de análises emitidas anteriormente pela Subsea 7.

Tabela 13. Resultados obtidos para o *base case* do Teste 1

Número de iterações	Configuração	Número de flutuadores	Curvatura Máxima (1/m)	Distância mínima ao leito marinho (m)	Rotação (°)	Vértebra travada?
1	Sem flutuadores	0	0.13	0.95	0.12	<i>FALSE</i>

Tabela 14. Resultados obtidos para a contingência do Teste 1

Número de iterações	Configuração	Número de flutuadores	Curvatura Máxima (1/m)	Distância mínima ao leito marinho (m)	Rotação (°)	Vértebra travada?
1	Sem flutuadores	0	0.24	2.83	-0.07	<i>TRUE</i>
2	('0104kgf_Buoy', 3)	1	0.24	2.84	0.07	<i>TRUE</i>
3	('0104kgf_Buoy', 4)	1	0.24	2.84	0.11	<i>TRUE</i>
4	('0104kgf_Buoy', 5)	1	0.24	2.84	0.15	<i>TRUE</i>
5	('0104kgf_Buoy', 6)	1	0.24	2.85	0.16	<i>TRUE</i>
6	('0754kgf_Buoy', 3)	1	0.22	2.75	-0.19	<i>FALSE</i>

Tabela 15. Resultados obtidos para o *base case* do Teste 2

Número de iterações	Configuração	Número de flutuadores	Curvatura Máxima (1/m)	Distância mínima ao leito marinho (m)	Rotação (°)	Vértebra travada?
1	Sem flutuadores	0	0.48	2.97	-0.19	TRUE
2	('0104kgf_Buoy', 3)	1	0.48	2.99	0.11	TRUE
3	('0104kgf_Buoy', 4)	1	0.48	2.99	0.09	TRUE
4	('0104kgf_Buoy', 5)	1	0.48	2.99	0.01	TRUE
5	('0104kgf_Buoy', 6)	1	0.48	2.98	-0.05	TRUE
6	('0754kgf_Buoy', 3)	1	0.46	2.96	0.11	FALSE
7	('0754kgf_Buoy', 4)	1	0.48	2.96	-0.18	TRUE
8	('0754kgf_Buoy', 5)	1	0.48	2.96	-0.12	TRUE
9	('0754kgf_Buoy', 6)	1	0.48	2.97	-0.08	TRUE
10	('1151kgf_Buoy', 3)	1	0.4	2.87	-0.41	FALSE
11	('1151kgf_Buoy', 4)	1	0.48	2.94	-0.16	TRUE
12	('1151kgf_Buoy', 5)	1	0.48	2.93	-0.43	TRUE
13	('1151kgf_Buoy', 6)	1	0.48	2.94	-0.36	TRUE
14	('0104kgf_Buoy', 3), ('0104kgf_Buoy', 6)	2	0.48	2.97	-0.23	TRUE
15	('0104kgf_Buoy', 3), ('0104kgf_Buoy', 7)	2	0.48	2.97	-0.28	TRUE
16	('0104kgf_Buoy', 3), ('0104kgf_Buoy', 8)	2	0.48	2.97	-0.3	TRUE
17	('0104kgf_Buoy', 3), ('0104kgf_Buoy', 9)	2	0.48	2.96	-0.31	TRUE
18	('0104kgf_Buoy', 3), ('0754kgf_Buoy', 6)	2	0.48	2.95	-0.4	TRUE
19	('0104kgf_Buoy', 3), ('0754kgf_Buoy', 7)	2	0.48	2.97	-0.08	TRUE
20	('0104kgf_Buoy', 3), ('0754kgf_Buoy', 8)	2	0.48	2.95	-0.4	TRUE
21	('0104kgf_Buoy', 3), ('0754kgf_Buoy', 9)	2	0.48	2.97	-0.04	TRUE
22	('0104kgf_Buoy', 3), ('1151kgf_Buoy', 6)	2	0.48	2.98	0.38	TRUE
23	('0104kgf_Buoy', 3), ('1151kgf_Buoy', 7)	2	0.48	2.95	-0.16	TRUE
24	('0104kgf_Buoy', 3), ('1151kgf_Buoy', 8)	2	0.48	2.96	-0.13	TRUE
25	('0104kgf_Buoy', 3), ('1151kgf_Buoy', 9)	2	0.48	2.96	-0.06	TRUE
26	('0104kgf_Buoy', 4), ('0104kgf_Buoy', 7)	2	0.48	2.98	-0.09	TRUE
27	('0104kgf_Buoy', 4), ('0104kgf_Buoy', 8)	2	0.48	2.98	-0.11	TRUE
28	('0104kgf_Buoy', 4), ('0104kgf_Buoy', 9)	2	0.48	2.98	-0.13	TRUE
29	('0104kgf_Buoy', 4), ('0754kgf_Buoy', 7)	2	0.48	2.95	-0.29	TRUE
30	('0104kgf_Buoy', 4), ('0754kgf_Buoy', 8)	2	0.48	2.97	-0.05	TRUE
31	('0104kgf_Buoy', 4), ('0754kgf_Buoy', 9)	2	0.48	2.96	-0.22	TRUE
32	('0104kgf_Buoy', 4), ('1151kgf_Buoy', 7)	2	0.48	2.98	0.29	TRUE
33	('0104kgf_Buoy', 4), ('1151kgf_Buoy', 8)	2	0.48	2.96	-0.07	TRUE
34	('0104kgf_Buoy', 4), ('1151kgf_Buoy', 9)	2	0.48	2.96	-0.06	TRUE
35	('0104kgf_Buoy', 5), ('0104kgf_Buoy', 8)	2	0.48	2.98	-0.09	TRUE
36	('0104kgf_Buoy', 5), ('0104kgf_Buoy', 9)	2	0.48	2.98	-0.1	TRUE
37	('0104kgf_Buoy', 5), ('0754kgf_Buoy', 8)	2	0.48	2.96	-0.2	TRUE
38	('0104kgf_Buoy', 5), ('0754kgf_Buoy', 9)	2	0.48	2.95	-0.37	TRUE
39	('0104kgf_Buoy', 5), ('1151kgf_Buoy', 8)	2	0.48	2.94	-0.36	TRUE



40	('0104kgf_Buoy', 5), ('1151kgf_Buoy', 9)	2	0.48	2.96	-0.09	TRUE
41	('0104kgf_Buoy', 6), ('0104kgf_Buoy', 9)	2	0.48	2.98	-0.09	TRUE
42	('0104kgf_Buoy', 6), ('0754kgf_Buoy', 9)	2	0.48	2.97	-0.15	TRUE
43	('0104kgf_Buoy', 6), ('1151kgf_Buoy', 9)	2	0.48	2.95	-0.24	TRUE
44	('0754kgf_Buoy', 3), ('0104kgf_Buoy', 6)	2	0.46	2.92	-0.46	FALSE
45	('0754kgf_Buoy', 3), ('0104kgf_Buoy', 7)	2	0.46	2.94	-0.13	FALSE
46	('0754kgf_Buoy', 3), ('0104kgf_Buoy', 8)	2	0.46	2.94	-0.21	FALSE
47	('0754kgf_Buoy', 3), ('0104kgf_Buoy', 9)	2	0.46	2.94	-0.26	FALSE
48	('0754kgf_Buoy', 3), ('0754kgf_Buoy', 6)	2	0.44	2.88	-0.46	FALSE
49	('0754kgf_Buoy', 3), ('0754kgf_Buoy', 7)	2	0.45	2.89	-0.5	FALSE
50	('0754kgf_Buoy', 3), ('0754kgf_Buoy', 8)	2	0.45	2.9	-0.48	FALSE
51	('0754kgf_Buoy', 3), ('0754kgf_Buoy', 9)	2	0.46	2.91	-0.35	FALSE
52	('0754kgf_Buoy', 3), ('1151kgf_Buoy', 6)	2	0.39	2.85	0.31	FALSE
53	('0754kgf_Buoy', 3), ('1151kgf_Buoy', 7)	2	0.42	2.85	-0.06	FALSE
54	('0754kgf_Buoy', 3), ('1151kgf_Buoy', 8)	2	0.44	2.87	-0.07	FALSE
55	('0754kgf_Buoy', 3), ('1151kgf_Buoy', 9)	2	0.45	2.87	-0.43	FALSE
56	('0754kgf_Buoy', 4), ('0104kgf_Buoy', 7)	2	0.48	2.97	-0.01	TRUE
57	('0754kgf_Buoy', 4), ('0104kgf_Buoy', 8)	2	0.48	2.96	-0.1	TRUE
58	('0754kgf_Buoy', 4), ('0104kgf_Buoy', 9)	2	0.48	2.96	-0.16	TRUE
59	('0754kgf_Buoy', 4), ('0754kgf_Buoy', 7)	2	0.48	2.95	0.23	TRUE
60	('0754kgf_Buoy', 4), ('0754kgf_Buoy', 8)	2	0.48	2.92	-0.33	TRUE
61	('0754kgf_Buoy', 4), ('0754kgf_Buoy', 9)	2	0.48	2.92	-0.37	TRUE
62	('0754kgf_Buoy', 4), ('1151kgf_Buoy', 7)	2	0.46	2.87	0.03	FALSE
63	('0754kgf_Buoy', 4), ('1151kgf_Buoy', 8)	2	0.48	2.89	0	TRUE
64	('0754kgf_Buoy', 4), ('1151kgf_Buoy', 9)	2	0.48	2.9	-0.05	TRUE
65	('0754kgf_Buoy', 5), ('0104kgf_Buoy', 8)	2	0.48	2.95	-0.31	TRUE
66	('0754kgf_Buoy', 5), ('0104kgf_Buoy', 9)	2	0.48	2.95	-0.36	TRUE
67	('0754kgf_Buoy', 5), ('0754kgf_Buoy', 8)	2	0.48	2.96	0.3	TRUE
68	('0754kgf_Buoy', 5), ('0754kgf_Buoy', 9)	2	0.48	2.94	-0.2	TRUE
69	('0754kgf_Buoy', 5), ('1151kgf_Buoy', 8)	2	0.48	2.9	0.2	TRUE
70	('0754kgf_Buoy', 5), ('1151kgf_Buoy', 9)	2	0.48	2.89	-0.04	TRUE
71	('0754kgf_Buoy', 6), ('0104kgf_Buoy', 9)	2	0.48	2.96	-0.16	TRUE
72	('0754kgf_Buoy', 6), ('0754kgf_Buoy', 9)	2	0.48	2.98	0.41	TRUE
73	('0754kgf_Buoy', 6), ('1151kgf_Buoy', 9)	2	0.48	2.89	-0.07	TRUE
74	('1151kgf_Buoy', 3), ('0104kgf_Buoy', 6)	2	0.4	2.89	-0.02	FALSE
75	('1151kgf_Buoy', 3), ('0104kgf_Buoy', 7)	2	0.4	2.87	-0.26	FALSE
76	('1151kgf_Buoy', 3), ('0104kgf_Buoy', 8)	2	0.4	2.86	-0.44	FALSE
77	('1151kgf_Buoy', 3), ('0104kgf_Buoy', 9)	2	0.4	2.89	-0.1	FALSE
78	('1151kgf_Buoy', 3), ('0754kgf_Buoy', 6)	2	0.34	2.79	0.14	FALSE

Tabela 16. Resultados obtidos para a contingência do Teste 2

Número de iterações	Configuração	Número de flutuadores	Curvatura Máxima (1/m)	Distância mínima ao leito marinho (m)	Rotação (°)	Vértebra travada?
1	Sem flutuadores	0	0.15	1.01	0.02	<i>FALSE</i>