



Paulo Henrique da Silva Cardoso

**Otimização da configuração geométrica de
risers rígidos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica Departamento de Engenharia Mecânica Centro Técnico Científico da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Ivan Fabio Mota de Menezes

Rio de Janeiro
Maio de 2019



Paulo Henrique da Silva Cardoso

**Otimização da configuração geométrica de
risers rígidos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica Departamento de Engenharia Mecânica Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Ivan Fabio Mota de Menezes

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Anderson Pereira

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Dr. Ludimar Lima de Aguiar

Cenpes – Petrobras

Rio de Janeiro, 10 de Maio de 2019

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Paulo Henrique da Silva Cardoso

Graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em 2016

Ficha Catalográfica

Cardoso, Paulo Henrique da Silva

Otimização da configuração geométrica de risers rígidos / Paulo Henrique da Silva Cardoso; orientador: Ivan Fabio Mota de Menezes. – Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Engenharia Mecânica, 2019.

v., 85 f: il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Projeto de risers;. 3. Sistemas offshore;. 4. Engenharia submarina;. 5. Técnicas de otimização;. 6. Globalized Bounded Nelder-Mead.. I. Menezes, Ivan Fabio Mota de. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Paulo Cesar e Janete, pelo apoio em todas as etapas da minha vida. Dedico este trabalho ao meu pai por ser o maior exemplo de engenheiro que conheci e o grande incentivador que tenho para buscar meus sonhos.

À Heloisa, minha companheira e amiga, agradeço por me trazer paz nos momentos difíceis, essencial para a conclusão deste trabalho.

Agradeço ao meu orientador Ivan Menezes pela oportunidade de desenvolver este trabalho e por ter confiado em mim. Foi um grande prazer trabalhar com um professor tão dedicado e querido pelos alunos como o Ivan.

Ao Instituto Tecgraf/PUC-Rio agradeço pelo ambiente de excelência que me permitiu desenvolver a maior parte deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Cardoso, Paulo Henrique da Silva; Menezes, Ivan Fabio Mota de. **Otimização da configuração geométrica de risers rígidos.** Rio de Janeiro, 2019. 85p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A crescente demanda pela exploração de óleo em águas cada vez mais profundas representa um desafio para o projeto seguro e eficiente de risers. Tipicamente, o projeto deste elemento estrutural exige um elevado número de análises numéricas e, muitas vezes, se baseia na experiência do projetista, especificamente no que diz respeito à obtenção de uma configuração inicial estruturalmente viável. A automação de tarefas nas fases preliminares de projeto pode proporcionar uma maior eficiência e segurança na seleção de configurações viáveis, além de reduzir o tempo necessário para a realização desta tarefa. Este trabalho propõe uma ferramenta computacional para a otimização de configurações iniciais de risers, satisfazendo requisitos estruturais, operacionais e econômicos. A ferramenta se baseia no método Globalized Bounded Nelder-Mead (GBNM), que não requer o cálculo de gradientes, demanda poucas avaliações da função objetivo por iteração, ou seja, reduz o número de análises dinâmicas realizadas usando o Método dos Elementos Finitos, e permite a implementação de uma estratégia eficiente de paralelização do problema. Para validar e demonstrar a eficiência da ferramenta proposta, são apresentados estudos de caso que reproduzem as condições encontradas em fases iniciais de projetos de risers, bem como uma comparação dos resultados com os obtidos utilizando outros métodos de otimização conhecidos na literatura.

Palavras-chave

Projeto de risers; Sistemas offshore; Engenharia submarina; Técnicas de otimização; Globalized Bounded Nelder-Mead.

Abstract

Cardoso, Paulo Henrique da Silva; Menezes, Ivan Fabio Mota de (Advisor). **Optimization of geometrical configuration of rigid risers**. Rio de Janeiro, 2019. 85p. Dissertação de mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The increasing demand for oil exploitation in deeper water represents a challenge for the safe and efficient design of risers. Typically, the design of this structural member requires a large number of numerical analyses and is often based on the designer's experience, specifically with respect to obtaining a structurally feasible initial configuration. The automation of tasks in the preliminary stages of design can provide greater efficiency and safety in the selection of feasible configurations, in addition to reducing the time required to perform this task. This work proposes a computational tool to optimize initial riser configurations, satisfying structural, operational and economic requirements. The tool is based on the Globalized Bounded Nelder-Mead method (GBNM), which does not require the computation of gradients, it requires few evaluations of the objective function per iteration, i.e., it reduces the number of dynamic analyses performed using the Finite Element Method, and allows the implementation of an efficient strategy to parallelize the problem. In order to validate and demonstrate the efficiency of the proposed tool, case studies that reproduce the conditions found during the initial stages of the design of risers are presented, as well as a comparison of the results with those obtained using other optimization methods established in the literature.

Keywords

Riser design; Offshore systems; Subsea engineering; Optimization techniques; Globalized Bounded Nelder-Mead.

Sumário

1	Introdução	13
1.1	Objetivo	15
1.2	Breve revisão bibliográfica	16
1.3	Organização do trabalho	20
2	Sistema de produção <i>offshore</i>	21
2.1	Unidade Estacionária de Produção (UEP)	22
2.1.1	Plataformas fixas	22
2.1.2	Plataformas flutuantes	23
2.1.2.1	Plataforma semissubmersível	23
2.1.2.2	Plataforma de pernas atirantadas	24
2.1.2.3	Plataforma FPSO	25
2.2	Equipamentos submarinos	26
2.2.1	Árvore de natal	26
2.2.2	<i>Manifold</i>	26
2.3	Dutos	26
2.3.1	Dutos flexíveis	27
2.3.2	Dutos rígidos	30
2.3.3	<i>Risers</i>	30
2.3.3.1	Catenária livre	31
2.3.3.2	<i>Lazy wave</i> e <i>steep wave</i>	31
2.3.3.3	<i>Lazy S</i> e <i>steep S</i>	32
2.3.3.4	<i>Pliant wave</i>	32
2.3.3.5	<i>Riser</i> em catenária hidroamortecida - RCHA	32
3	Metodologia de projeto e análise de <i>risers</i>	34
3.1	Casos de carregamento	34
3.2	Análise global de <i>risers</i>	35
3.3	Critérios de projeto	37
4	Otimização	40
4.1	Programação linear	41
4.2	Programação não linear	42
4.2.1	Métodos determinísticos	42
4.2.2	Métodos aleatórios	43
4.2.2.1	Algoritmos genéticos	43
4.2.3	Otimização com restrições	45
4.2.3.1	Método de penalidade quadrática	45
4.2.3.2	Método do Lagrangeano aumentado	46
4.3	Considerações sobre a escolha do algoritmo de otimização	48
4.4	O método Nelder-Mead	49
4.5	O método <i>Globalized Bounded Nelder-Mead</i>	52
5	Implementação da ferramenta de otimização	56

5.1	Parâmetros do algoritmo GBNM	56
5.2	Parâmetros do algoritmo GA	57
5.3	Implementação computacional	58
5.4	Desenho da ferramenta e processos	58
5.5	Função objetivo	60
6	Estudos de caso	61
6.1	<i>Riser</i> com flutuadores	63
6.1.1	Caso 1 - LDA 2150m	64
6.1.2	Caso 2 - LDA 1200m	67
6.2	<i>Riser</i> em catenária com amortecedores hidrodinâmicos	70
7	Conclusões	77

Lista de figuras

Figura 1.1	Produção global de óleo entre 2005 e 2015 (MMbbl/dia) - Adaptado de [1]	13
Figura 1.2	Produção global <i>offshore</i> por profundidade (MMbbl/dia) - Adaptado de [2]	14
Figura 1.3	Recordes mundiais de profundidade de exploração de petróleo - Adaptado de [3]	15
Figura 2.1	Ilustração de uma rocha reservatório - Retirado de [4]	21
Figura 2.2	Ilustração do interior de uma rocha reservatório - Reti- rado de [5]	21
Figura 2.3	Plataforma tipo jaqueta Borkum West II no Mar do Norte - Retirado de [6]	23
Figura 2.4	Plataforma tipo semissubmersível P-55 na Bacia de Campos - Retirado de [7]	24
Figura 2.5	Plataforma tipo TLP Morpeth no Golfo do México - Retirado de [8]	24
Figura 2.6	FPSO Cidade de Itaguaí na Bacia de Santos - Retirado de [9]	25
Figura 2.7	FPSO Piranema na Bacia Sergipe-Alagoas - Retirado de [10]	25
Figura 2.8	Árvore de Natal Molhada (ANM) - Retirado de [11]	26
Figura 2.9	Manifold - Retirado de [12]	27
Figura 2.10	Ilustração de duto flexível com camadas expostas - Retirado de [13]	28
Figura 2.11	Duto flexível armazenado em carrossel de navio de instalação - Retirado de [14]	29
Figura 2.12	Duto flexível apresentando defeito por pressão interna excessiva, conhecido como <i>birdcaging</i> ou flambagem radial - Retirado de [15]	29
Figura 2.13	Procedimento de soldagem de duto rígido - Retirado de [16]	30
Figura 2.14	Exemplos de configurações de <i>risers</i>	31
Figura 2.15	Ilustração da configuração RCHA	33
Figura 3.1	Exemplo de combinações de um caso de carregamento - Adaptado de [17]	35
Figura 4.1	Representação de gene, cromossomo e população - Adap- tado de [18]	44
Figura 4.2	Exemplo de ponto de cruzamento - Adaptado de [18]	44
Figura 4.3	Proles obtidas do cruzamento - Adaptado de [18]	45
Figura 4.4	Exemplo de mutação - Adaptado de [18]	45
Figura 4.5	Ilustração das operações possíveis do <i>simplex</i> em cada iteração	50

Figura 4.6	Fluxograma do algoritmo de Nelder-Mead - adaptado de [19]	51
Figura 4.7	Fluxograma do método <i>Globalized Bounded Nelder-Mead</i>	55
Figura 5.1	Exemplo de cruzamento em dois pontos	57
Figura 5.2	Ilustração do modelo de comunicação Líder-Liderado	59
Figura 5.3	Resumo das tarefas executadas pelo líder e liderados	59
Figura 6.1	Definição dos movimentos de uma embarcação - Retirado de [20]	62
Figura 6.2	Representação do problema de otimização de <i>riser</i> com flutuadores - Adaptado de [21]	63
Figura 6.3	Linha elástica da solução estática obtida com GBNM para o Caso 1	65
Figura 6.4	Linha elástica da solução estática obtida com GA para o Caso 1	65
Figura 6.5	Linha elástica da solução estática obtida com Midaco para o Caso 1	66
Figura 6.6	Critério de carregamento combinado ao longo do <i>riser</i> para o Caso 1	66
Figura 6.7	Tensão de von Mises ao longo do <i>riser</i> para o Caso 1	67
Figura 6.8	Linha elástica da solução estática obtida com GBNM para o Caso 2	67
Figura 6.9	Linha elástica da solução estática obtida com GA para o Caso 2	68
Figura 6.10	Linha elástica da solução estática obtida com Midaco para o Caso 2	68
Figura 6.11	Critério de carregamento combinado ao longo do <i>riser</i> para o Caso 2	69
Figura 6.12	Tensão de von Mises ao longo do <i>riser</i> para o Caso 2	70
Figura 6.13	Representação do problema de otimização de <i>riser</i> em catenária com amortecedores hidrodinâmicos	71
Figura 6.14	Linha elástica da solução estática obtida com GBNM para o Caso 3	71
Figura 6.15	Linha elástica da solução estática obtida com GA para o Caso 3	72
Figura 6.16	Linha elástica da solução estática obtida com Midaco para o Caso 3	72
Figura 6.17	Critério de carregamento combinado ao longo do <i>riser</i> para o Caso 3	73
Figura 6.18	Tensão de von Mises ao longo do <i>riser</i> para o Caso 3	74
Figura 6.19	Comparação do critério de carregamento combinado ao longo do <i>riser</i> entre a configuração RCHA e um SCR equivalente	75
Figura 6.20	Comparação da tensão de von Mises ao longo do <i>riser</i> entre a configuração RCHA e um SCR equivalente	76

Lista de tabelas

Tabela 6.1	Propriedades do duto de aço API 5L X65	61
Tabela 6.2	Propriedades para uso da norma DNVGL-ST-F201	62
Tabela 6.3	Deslocamentos na extremidade de topo do <i>riser</i>	62
Tabela 6.4	Limites das variáveis de projeto para o problema de <i>riser</i> com flutuadores	64
Tabela 6.5	Resultados da otimização do Caso 1	65
Tabela 6.6	Resultados da otimização do Caso 2	68
Tabela 6.7	Limites das variáveis de projeto para o problema de <i>riser</i> em catenária com amortecedores hidrodinâmicos	71
Tabela 6.8	Resultados da otimização do Caso 3	72

Lista de Abreviaturas

- AIS – *Artificial Immune Systems*
GA – *Genetic Algorithm*
GBNM – *Globalized Bounded Nelder-Mead*
LDA – *Lâmina D'Água*
LHS – *Latin Hypercube Sampling*
PSO – *Particle Swarm Optimization*
RBDO – *Reliability Based Design Optimization*
RCHA – *Riser em Catenária Hidroamortecida*
SCR – *Steel Catenary Riser*
SLWR – *Steel Lazy Wave Riser*
SQP – *Sequential Quadratic Programming*
TDP – *Touchdown Point*
UEP – *Unidade Estacionária de Produção*
VIV – *Vortex Induced Vibration*

1 Introdução

O final da década de 90 marcou um aumento significativo na produção de óleo *offshore*, aumentando sua parcela na produção total de 22% em 2000 para 29% em 2015, com pico de 32% em 2005 [1]. A exploração de regiões antes inalcançáveis foi viabilizada, principalmente, pelo desenvolvimento de novas tecnologias para perfuração, produção e monitoramento.

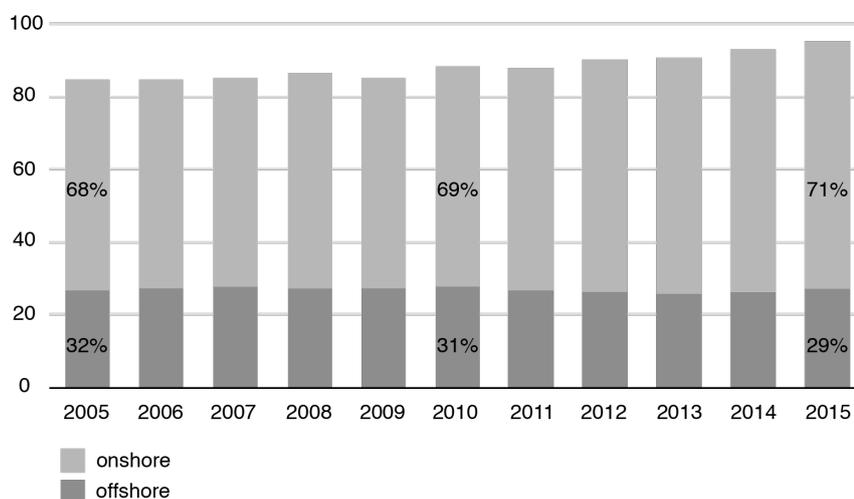


Figura 1.1: Produção global de óleo entre 2005 e 2015 (MMbbl/dia) - Adaptado de [1]

Explorar petróleo em águas profundas¹ apresenta maiores custos e operações mais complexas para as empresas, porém a exaustão de campos em águas rasas e as instabilidades políticas em regiões produtoras como Oriente Médio, África e Venezuela são alguns dos responsáveis pela intensificação da exploração em lâminas d'água maiores. No entanto, o principal fator para isso é o elevado potencial das descobertas recentes em águas profundas; um relatório feito em 2009 concluiu que o tamanho médio de cada descoberta em águas profundas foi de, aproximadamente, 150 milhões de barris de óleo, enquanto que para o cenário *onshore* esse valor foi de 25 milhões de barris [22].

Segundo maior produtor de óleo *offshore* no mundo [2], o Brasil é um dos únicos quatro países onde a produção de óleo em águas profundas e

¹Neste texto foram adotadas as seguintes definições para faixas de lâmina d'água: águas rasas - até 300m; águas profundas - entre 300m e 1500m; águas ultraprofundas - acima de 1500m.

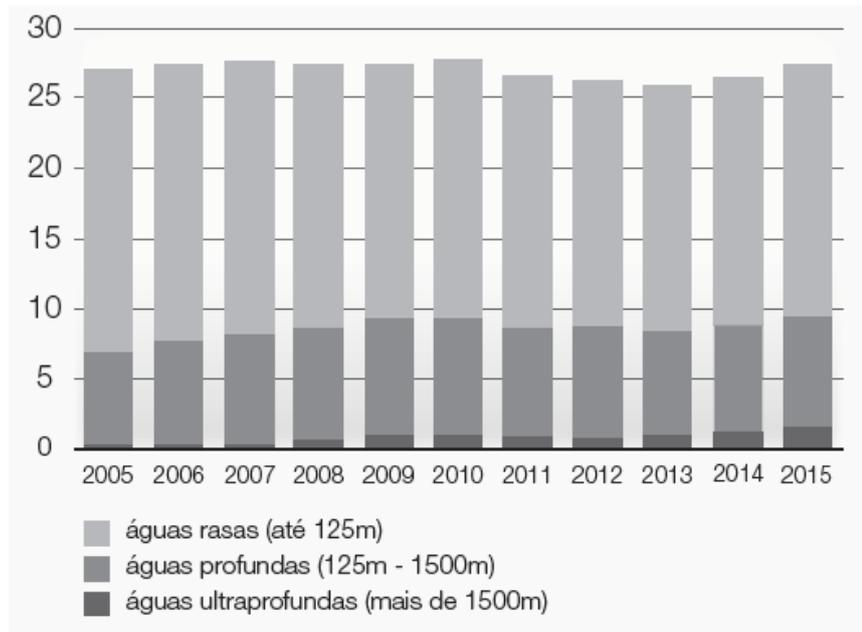


Figura 1.2: Produção global *offshore* por profundidade (MMbbl/dia) - Adaptado de [2]

ultraprofundas ultrapassa a produção em águas rasas. O país foi pioneiro nesse cenário, iniciando sua produção *offshore* na década de 60 e acumulando diversos recordes mundiais de profundidade de produção. Esse pioneirismo, além da disposição natural de grandes reservas como o pré-sal, foi determinante para o país atingir a liderança em desenvolvimento de projetos nessas faixas de profundidades e ser o maior produtor global em águas ultraprofundas.

Os dutos responsáveis pelo transporte de óleo e gás dos poços até às unidades de produção (UP) são os *risers*, que, nesse cenário extremo, se tornam elementos críticos para viabilizar a produção. O projeto do *riser* se torna desafiador devido às altas pressões hidrostáticas, as elevadas tensões provocadas e pela grande movimentação das plataformas utilizadas nestas profundidades, que reduzem a vida em fadiga das estruturas e pode até mesmo tornar inviáveis alguns conceitos de *risers* amplamente utilizados.

Configurações geométricas como a catenária livre, na qual o *riser* se estende livremente entre a plataforma e o solo, devido ao grande comprimento suspenso e à elevada amplitude de movimentos recebidos da plataforma, apresentam vida útil reduzida devido à fadiga excessiva na extremidade de topo e no ponto onde se inicia o contato com o solo, chamado *touchdown point* (TDP).

Como forma de se evitar esses problemas, foram desenvolvidas soluções para desacoplar os movimentos do topo e do TDP, apoiando parte do *riser* em uma bóia submersa ou através de flutuadores instalados diretamente no duto.

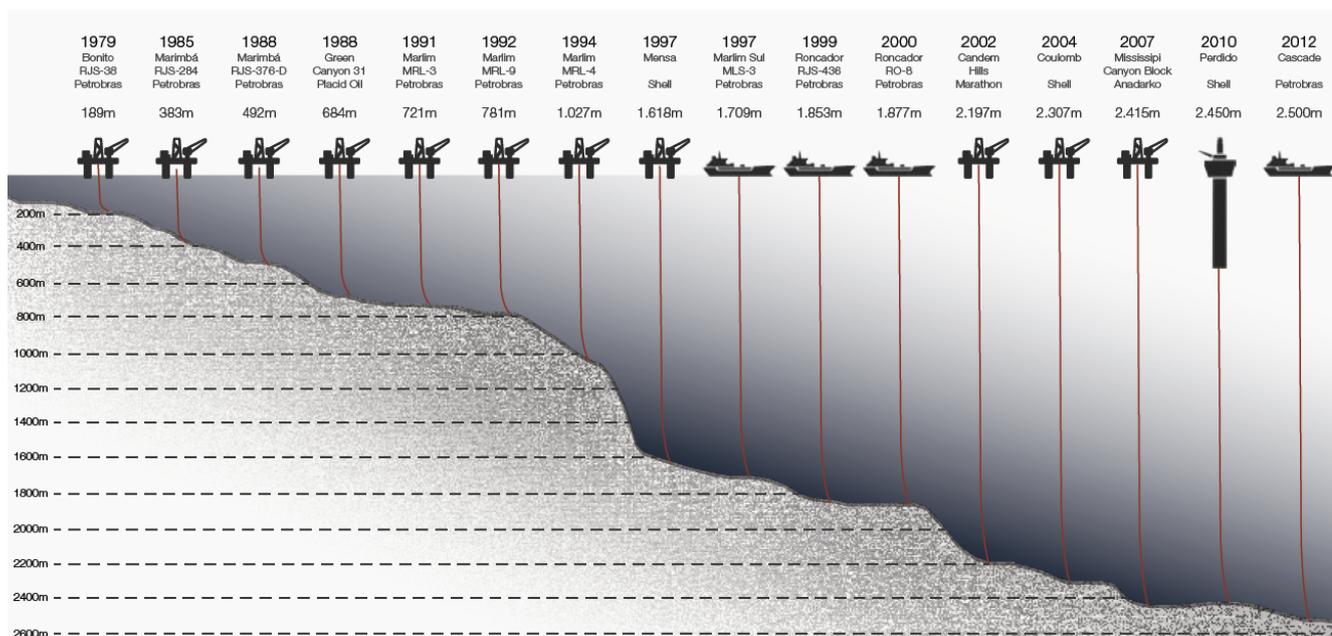


Figura 1.3: Recordes mundiais de profundidade de exploração de petróleo - Adaptado de [3]

Essas alternativas diminuem os esforços no topo e no TDP, evitando assim compressão na estrutura e levando a aumento da vida útil do *riser*. Contudo, a instalação de *risers* com essas configurações é mais complexa e custosa, principalmente se o duto for rígido já que exige técnicas de soldagem mais sofisticadas e operação mais complexa de lançamento do duto. Portanto, são adotadas apenas quando configurações mais simples apresentam perspectiva de vida útil menor e operação próxima, ou excedendo, os limites de integridade estrutural.

1.1 Objetivo

A tarefa de projetar um sistema de *risers* torna-se especialmente desafiadora tendo em vista que cada configuração é gerada a partir de um conjunto de variáveis de projeto e que o comportamento da estrutura precisa ser avaliado para as diversas condições ambientais possíveis, levando a um número muito elevado de casos possíveis. São requisitos básicos de um projeto de engenharia que a estrutura atenda às normas de projeto vigentes e que seja economicamente viável, sendo, portanto, necessário testar todos os casos quanto a esses requisitos. Essa tarefa demandaria tempo excessivo e alto custo computacional, se tornando algo inexecutável.

A estratégia tradicionalmente adotada consiste em tentativa e erro, selecionando um conjunto inicial de variáveis de projeto e o ajustando a cada

tentativa até que seja obtido uma configuração viável considerada suficientemente boa. O tempo necessário e a qualidade final do projeto obtido dependerão muito da experiência e conhecimento do projetista; além disso, mesmo que o resultado seja satisfatório é muito provável que existam configurações melhores, mais adequadas, já que não é possível estudar todo o conjunto de configurações possíveis.

Buscando superar os desafios apresentados e aperfeiçoar o método tradicional de projeto de *risers*, este trabalho tem como objetivo desenvolver uma ferramenta, baseada em técnicas de otimização, capaz de obter variáveis de projeto que determinem as configurações mais adequadas ao campo onde serão instalados.

1.2

Breve revisão bibliográfica

A aplicação de técnicas de otimização em projetos de *risers* começou a ser estudada no final da década de 80 como um método para se automatizar o projeto preliminar e diminuir o custo do material das estruturas. Um dos primeiros trabalhos sobre o tema foi publicado por Riggs[23], com seguimento em Riggs e Leraand[24]. Os autores adotaram como objetivo a minimização do comprimento total de um *riser steep wave* através do método de programação quadrática sequencial (SQP), tendo como variáveis 3 segmentos de comprimento distintos e o peso submerso da porção intermediária, que possui flutuadores. Restrições também foram adotadas de modo a garantir que as normas de projeto fossem respeitadas. Foram obtidas configurações satisfatórias, no entanto, os autores ressaltam que o elevado esforço computacional prejudicou a precisão numérica e que a resposta dinâmica do *riser* deve ser considerada em trabalhos futuros.

Larsen e Hanson[25] também adotaram o método SQP para minimizar o custo de um *riser*, porém em catenária. Os *risers* foram definidos como 3 segmentos com espessura variável sujeitos a 2 casos distintos de carregamento estático em profundidades diferentes. Os autores concluem que para águas mais profundas a variação de espessura é maior, sendo as regiões próximas ao solo e ao topo do *riser* as mais espessas. Apesar dos resultados consistentes, os autores ressaltam a necessidade de se realizar análises dinâmicas devido aos efeitos das correntes e dos deslocamentos da UP.

Rodrigues[26] apresenta um sistema híbrido de *riser* baseado no conceito da configuração *lazy-S*. Um *riser* flexível interliga a UP a uma boia de sub-superfície, conectada ao fundo do mar através de tendões, de onde segue um *riser* rígido em catenária. O autor estabelece um problema de otimização

usando algoritmos genéticos (GA) para a minimização do custo da estrutura, escolhendo como variáveis os comprimentos das duas partes do *riser* e do tendão, além do empuxo da boia. Foram obtidas configurações consideravelmente mais baratas que as do caso base, um estudo paramétrico realizado anteriormente. Novamente, foi feita uma ponderação no sentido de que análises dinâmicas devem ser consideradas nos próximos trabalhos apesar do elevado custo computacional.

Vieira et al.[27] e Lima, Jacob e Ebecken[28] também apresentam um problema de otimização para minimização do custo de um *riser*, em configuração *lazy wave*. A estrutura foi definida através de 3 segmentos de comprimento variável, sendo a porção intermediária com flutuadores. Apenas análises estáticas foram feitas, sendo previamente definidos o diâmetro e a espessura do *riser*, e as dimensões dos flutuadores. O primeiro trabalho [27] resolveu o problema através de um algoritmo genético, enquanto que o segundo [28] adotou um híbrido entre GA e lógica *fuzzy*, o que permite o estabelecimento de problemas com funções multiobjetivo. Em trabalhos seguintes foram adicionadas como variáveis o diâmetro externo e o comprimento dos flutuadores, além do espaçamento entre eles, representando de forma mais adequada a região intermediária do *riser*. Vieira, Lima e Jacob[21] resolvem o problema através de sistemas imunológicos artificiais (AIS), Pina et al.[29] optam pelo método do enxame de partículas (PSO) e Vieira, Lima e Jacob[30] comparam o desempenho de algoritmos genéticos, um híbrido GA-*fuzzy*, PSO e AIS.

Na publicação de Cunliffe et al.[31], os autores partem do projeto de um *riser* de exportação de gás em catenária instalado no Mar do Norte com o objetivo de minimizar o custo da estrutura. Como variáveis foram adotadas o material do *riser* (titânio ou aço super duplex), o comprimento total, a espessura da parede e o volume de lastro, necessário devido à baixa densidade do titânio empregado no projeto original e ao fluido transportado. A rotina de otimização é baseada em algoritmos genéticos e utiliza o *software* comercial Orcaflex [32] para as simulações. Os autores afirmam ter realizado análises dinâmicas, no entanto, não fazem comentários acerca do tempo necessário para a resolução do problema de otimização, certamente muito elevado. Comparado ao caso base, embora o *riser* obtido tenha sofrido um acréscimo de comprimento, foi usado um material mais barato (aço super duplex) em parte da estrutura, além da redução da espessura e do volume de lastro, o que levou a uma redução de custos de 40%. Algumas modificações foram feitas após a análise de fadiga, obtendo uma economia final de 32%.

Tanaka e Martins[33] se baseiam em trabalhos anteriores ao escolherem algoritmos genéticos para a otimização, e a divisão do *riser* em 3 seguimentos

de comprimento e espessura de parede variáveis. No entanto, adicionaram como variável o diâmetro externo dos flutuadores, o que permite que a estrutura possa variar de catenária, caso o diâmetro seja nulo, até *lazy wave*, resolvendo apenas o problema estático. As soluções foram obtidas através da integração direta das equações governantes de um *riser* com rigidez flexional desprezível usando o método de Runge-Kutta. O custo foi a função objetivo e o ângulo de topo restrito para variar com incrementos de 5° . Os autores analisaram os resultados para cada ângulo de topo, concluindo que nenhuma das soluções foi uma *lazy wave* e sugerem investigar se a adoção de maiores restrições sobre a tensão de topo e o raio de curvatura podem levar a soluções com essa configuração.

Tanaka e Martins[34] retomam o trabalho anterior considerando o comportamento dinâmico do *riser*, modelado como uma pequena perturbação sobre a posição de equilíbrio estático e resolução do modelo em elementos finitos no domínio da frequência. A minimização da amplitude das tensões dinâmicas foi adotada como o novo objetivo; os autores justificam a escolha como uma forma de maximizar a vida à fadiga da estrutura sem ter de realizar análises de fadiga, extremamente custosas do ponto de vista computacional. Os resultados indicam que soluções apresentando maior fluatibilidade são encontradas para os casos de maiores deslocamentos verticais da UP. Com as modificações feitas na definição do problema, todas as soluções passam a apresentar a configuração *lazy wave* que, comparadas às soluções em catenária, apresentam menor amplitude das tensões dinâmicas.

Na tese de doutorado de Tanaka[35] dois algoritmos heurísticos de otimização são comparados, o algoritmo genético e o método do recozimento simulado, além de quatro métodos de programação matemática, sendo programação sequencial linear, quasi-Newton, Fletcher-Reeves e Powell. As análises sugerem que o desempenho dos algoritmos heurísticos foi superior. O autor adota quatro funções objetivo tratadas separadamente: o custo, a máxima tensão estática e as máximas tensões dinâmicas com flutuadores e sem. Por ser a solução que exige menor comprimento total do *riser*, a minimização do custo tende a encontrar catenárias, mesma tendência observada quando a função objetivo é a tensão estática, já que essa configuração combina baixa tração e curvatura, equilibrando as tensões de tração e flexão. Para a atenuação da tensão dinâmica, a *lazy wave* se torna a solução preferencial devido ao trecho com flutuadores, que consegue diminuir a transmissão de movimento ao TDP e, conseqüentemente, esforços e tensões na mesma região.

Andrade et al.[36] estudam uma SLWR com parâmetros definidos como em Vieira, Lima e Jacob[21], 3 segmentos de comprimento do *riser* e diâmetro

externo, comprimento e espaçamento dos flutuadores. O *software* comercial modeFrontier foi utilizado para implementar o problema de minimização das tensões atuantes através de algoritmos genéticos. O programa Anflex [37], conectado ao modeFrontier, foi utilizado para gerar as configurações de *risers* e efetuar análises dinâmicas. Após a otimização foram realizadas análise de vibração induzida por vórtices (VIV) e análises de instalação e de fadiga. Os autores concluem que o procedimento pode representar um ganho considerável de tempo aliado a maior segurança no ciclo de vida do *riser*.

A dissertação de mestrado de Nariño[38] apresenta uma configuração alternativa de *riser* com amortecedores hidrodinâmicos (RCHA) [39]. Os amortecedores são revestimentos de baixa densidade que atuam interrompendo a propagação de ondas compressivas induzidas ao longo do *riser*, o que reduz as tensões atuantes. Os *softwares* modeFrontier e Anflex foram utilizados da mesma forma que em Andrade et al.[36], porém com funções objetivo distintas. Três problemas foram propostos: minimização da variação da amplitude das tensões de Von Mises, minimização do custo através do comprimento total do *riser*, e um problema multiobjetivo que consiste na interseção dos dois problemas anteriores. Na primeira abordagem foi obtida uma configuração geométrica capaz de reduzir em 18% a variações de amplitude das tensões de von Mises e na segunda abordagem foi obtida uma configuração de comprimento 43% menor. No problema multiobjetivo foi obtida uma configuração com redução de 11% na amplitude das tensões e de 35% no comprimento total do *riser*.

Yang e Zheng[40] utilizaram a metodologia Reliability Based Design Optimization (RBDO) para o projeto de *risers* em catenária. As variáveis de projeto e as restrições foram tratadas de forma probabilística e a função objetivo foi a minimização do peso da estrutura. Para diminuir o custo computacional associado à análise dinâmica é utilizado o metamodelo de Kriging para a avaliação do comportamento do *riser*, construído através de geração de amostragem por hipercubo latino (LHS). O modelo estudado é composto por 3 segmentos de *riser* com variação de espessura e sua configuração inicial foi gerada pela equação da catenária e ajustada pelo método dos elementos finitos. Uma comparação feita entre o metamodelo e o modelo em elementos finitos mostrou que os resultados obtidos para o peso da estrutura possuem alta precisão, no entanto os valores para as tensões apresentaram menor precisão, ainda que dentro do aceitável, segundo os autores.

1.3

Organização do trabalho

No Capítulo 2 são apresentados os principais elementos que constituem um sistema de produção *offshore* e as principais configurações geométricas de *risers*.

O Capítulo 3 descreve o procedimento de um típico projeto de *riser* e as análises dinâmicas e estruturais necessárias para se obter a configuração de equilíbrio.

O Capítulo 4 apresenta conceitos gerais sobre técnicas de otimização, métodos para implementação de restrições e algoritmos de otimização, com ênfase para o método *Globalized Bounded Nelder-Mead*, adotado na ferramenta desenvolvida neste trabalho.

No Capítulo 5 são expostos o desenvolvimento e a implementação da ferramenta de otimização.

No Capítulo 6 são feitos estudos de caso considerando um *riser* com flutuadores de tamanho variável, podendo assumir configurações como *lazy wave* e catenária livre, e um *riser* em catenária com amortecedores hidrodinâmicos.

Finalmente, no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões deste trabalho, além de sugestões para continuação e novos desenvolvimentos no tema exposto.

2

Sistema de produção *offshore*

O petróleo é encontrado em rochas chamadas reservatório, se acumulando nos espaços vazios do seu interior. Esses espaços, ou poros, necessariamente devem estar interligados, permitindo o deslocamento do fluido [41].

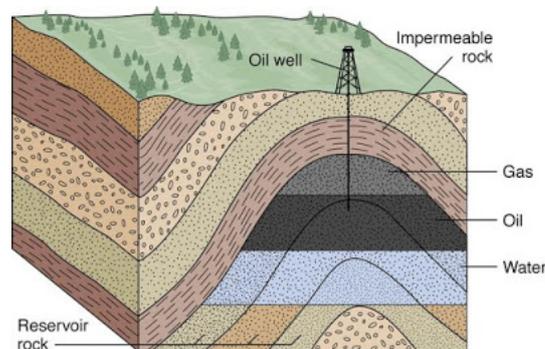


Figura 2.1: Ilustração de uma rocha reservatório - Retirado de [4]

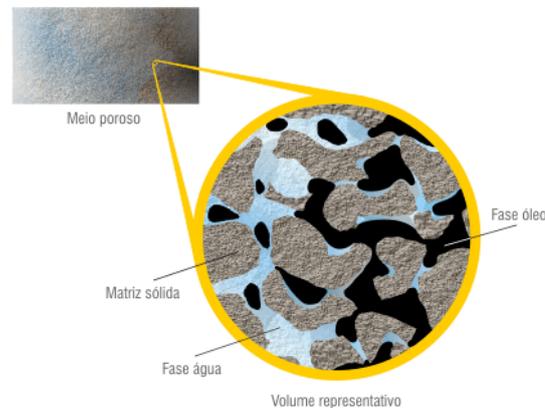


Figura 2.2: Ilustração do interior de uma rocha reservatório - Retirado de [5]

É necessário perfurar poços no leito submarino até a rocha reservatório e deixá-los em condições de operação de forma segura e econômica. A instalação dos equipamentos necessários para produção e controle do poço é conhecida como completação e permite que os hidrocarbonetos sejam extraídos do reservatório até a unidade de produção na superfície.

Os equipamentos no leito submarino são responsáveis por estimular, controlar e otimizar a vazão de produção, além de racionalizar o número de elementos no *layout* submarino, minimizando custos.

A produção é transportada até as unidades na superfície através de dutos, onde é realizado o processamento primário dos fluidos. Como o interesse econômico é apenas nos hidrocarbonetos, é necessário separar óleo, gás, água e impurezas. Óleo e gás são tratados e condicionados para serem transferidos para as refinarias, onde de fato serão processados e posteriormente comercializados [41].

A seqüência descrita caracteriza, de forma sucinta, as etapas necessárias para a produção *offshore* de petróleo. Portanto, o sistema de produção é formado pelos elementos necessários em cada etapa: a unidade estacionária de produção (UEP), os equipamentos submarinos e os dutos.

As características do campo, tais como profundidade, condições meteoceanográficas, características do óleo e gás produzidos, influenciam diretamente no projeto e complexidade dos elementos que compõem o sistema, sendo necessária seleção cuidadosa de cada elemento, conferindo maior eficiência e segurança às operações.

Embora não seja o foco deste trabalho, para melhor entendimento sobre o tema, convém apresentar os elementos que integram o sistema de produção *offshore*.

2.1 Unidade Estacionária de Produção (UEP)

As UEPs, ou plataformas, contam com equipamentos e facilidades necessários para o controle de equipamentos submarinos, recebimento e exportação da produção, realização do processamento primário, acomodações para os trabalhadores que mantêm as operações de forma ininterrupta e, em alguns tipos de plataforma, armazenamento provisório dos hidrocarbonetos produzidos. Podem ser classificadas como fixas ou flutuantes.

2.1.1 Plataformas fixas

Adotadas como as primeiras unidades de produção *offshore*, se caracterizam como estruturas fixadas diretamente no solo marinho e sobre as quais se apoiam toda a estrutura necessária para as atividades de produção, incluindo o controle dos poços (completação seca). Não possuem capacidade de armazenamento, portanto o escoamento da produção é feito através de oleodutos. Por apresentar menor resposta dinâmica, o projeto de *riser* torna-se menos crítico para essas plataformas. Devido ao aumento da instabilidade acima de 300m de lâmina d'água, são limitadas a operar apenas em águas rasas.

As plataformas fixas podem ser divididas em três tipos: jaqueta, cuja estrutura é formada através de tubos de aço em forma de treliça e é fixada no fundo do mar através de estacas; torre complacente, com base formada por torre estreita e flexível para resistir a esforços laterais; e plataforma de gravidade, fixada no fundo do mar através do peso próprio.

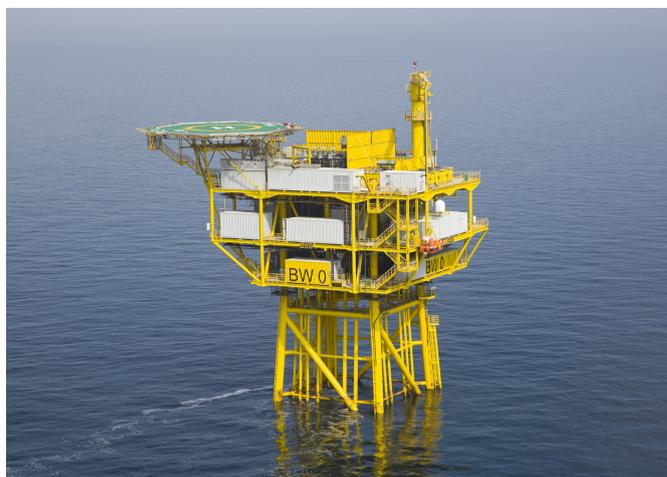


Figura 2.3: Plataforma tipo jaqueta Borkum West II no Mar do Norte - Retirado de [6]

2.1.2 Plataformas flutuantes

Com o avanço da produção para águas profundas, a fixação da plataforma no solo torna-se inviável, levando a maior resposta dinâmica na operação e, conseqüentemente, exigindo que o *riser* sofra maiores esforços. Mesmo sem fixação, essas plataformas possuem mecanismos para prover estabilidade junto ao sistema de ancoragem. As principais plataformas flutuantes são do tipo semissubmersível, de pernas atirantadas, e navio FPSO.

2.1.2.1 Plataforma semissubmersível

Projetadas para maior estabilidade, são ideais para águas ultraprofundas e condições ambientais severas. A estrutura de produção, compostas por conveses, se apoia por colunas em flutuadores submersos, porém o controle dos poços é feito no fundo do mar (completação molhada) devido à elevada amplitude de deslocamentos da plataforma. Contam com propulsores no casco que são acionados automaticamente de modo a manter a posição da plataforma (posicionamento dinâmico). A produção é escoada através de oleodutos para os terminais de refino ou armazenada em navio tanque designado para cada plataforma.



Figura 2.4: Plataforma tipo semissubmersível P-55 na Bacia de Campos - Retirado de [7]

2.1.2.2

Plataforma de pernas atirantadas

Também conhecidas como TLP (*Tension Leg Platform*), possuem estrutura muito similar às semissubmersíveis porém se diferem em relação ao sistema de ancoragem. Nas TLPs são usados tendões verticais fixos por estacas no fundo do mar e mantidos sob tração devido ao empuxo dos flutuadores. Essa ancoragem diminui os movimentos verticais da plataforma, o que permite que se adote completação seca. São utilizadas em lâminas d'água de até 1500m.



Figura 2.5: Plataforma tipo TLP Morpeth no Golfo do México - Retirado de [8]

2.1.2.3 Plataforma FPSO

Na maioria dos casos a plataforma FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) é convertida à partir de navios petroleiros, tendo todos os equipamentos para processamento primário instalados em seu convés. Este tipo de plataforma é considerada a solução preferencial para campos em águas profundas e situados a grandes distâncias da costa, já que possuem grande capacidade de armazenamento, dispensando a construção de oleodutos demasiadamente extensos. O sistema de ancoragem similar ao das semissubmersíveis permite que operem sem restrições de lâmina d'água, porém é necessária completação molhada.



Figura 2.6: FPSO Cidade de Itaguaí na Bacia de Santos - Retirado de [9]

Uma alternativa de casco cilíndrico, FPSO monocoluna, foi desenvolvida visando gerar maior estabilidade e menor amplitude de movimentos verticais, favorecendo operações em águas ultraprofundas. A primeira plataforma desse tipo no mundo é utilizada pela Petrobras no campo de Piranema, Bacia Sergipe-Alagoas, desde 2007 (Figura 2.7).



Figura 2.7: FPSO Piranema na Bacia Sergipe-Alagoas - Retirado de [10]

2.2

Equipamentos submarinos

Os principais equipamentos submarinos utilizados na produção são os *manifolds* e árvores de natal. Embora existam muitos outros tipos de equipamentos, não serão abordados neste texto.

2.2.1

Árvore de natal

A árvore de natal é um equipamento constituído por um conjunto de válvulas cujo objetivo é controlar o fluxo de óleo do poço. Dependendo do tipo de completação, é instalada na cabeça do poço no fundo do mar (árvore de natal molhada) ou na superfície [41].



Figura 2.8: Árvore de Natal Molhada (ANM) - Retirado de [11]

2.2.2

Manifold

Segundo Ferreira Filho[42], *manifolds* são utilizados quando há mais poços que ligações possíveis a uma UEP, organizando os poços em *clusters*. Trata-se de um conjunto de válvulas que concentra o petróleo produzido por vários poços e o envia à plataforma através de um único duto. *Manifolds* também são indicados quando diversos poços são reunidos em uma mesma região longe da plataforma.

2.3

Dutos

É necessário uma rede de dutos para transportar os hidrocarbonetos produzidos até às plataformas, além de interligar os demais elementos do sistema de produção submarino. Os dutos que interligam o leito submarino às



Figura 2.9: Manifold - Retirado de [12]

plataformas, se elevando até a superfície, são chamados de *risers*. Os trechos apoiados no solo, usados para interligar os equipamentos submarinos, são conhecidos como *flowlines*. Os dutos submarinos são classificados como rígidos ou flexíveis.

2.3.1 Dutos flexíveis

Os dutos flexíveis começaram a ser utilizados a partir da década de 70, em ambientes moderados na costa do Brasil, Ásia e Mediterrâneo [43], com o primeiro *riser* flexível instalado no Brasil, na Bacia de Campos em 1977 [44]. No entanto, com o avanço na tecnologia de dutos flexíveis, rapidamente passaram a também ser instalados em ambientes severos, como no Mar do Norte, onde se popularizaram. Junto à costa brasileira, são as regiões que mais os utilizam no mundo [45].

A principal característica de um duto flexível é sua baixa rigidez à flexão combinada à elevada rigidez axial, permitindo grandes deflexões sem aumento significativo da tensão [46, 47]. Essa característica só é possível devido à estrutura de múltiplas camadas sobrepostas, que deslizam entre si quando sofrem ação de cargas externas e internas [43]. Tipicamente, um duto flexível é formado por 5 camadas principais, descritas a seguir conforme em Bai e Bai[43].

A camada mais interna é a carcaça, normalmente feita de aço inoxidável e formada por seções intertravadas. Sua principal função é prevenir o colapso do duto devido à pressão externa. Um revestimento à base de polímero é aplicado com a função de manter a estanqueidade do duto.

Em seguida está a armadura de pressão, instalada em formato helicoidal por arames geralmente de aço carbono. Tem a função de resistir às tensões

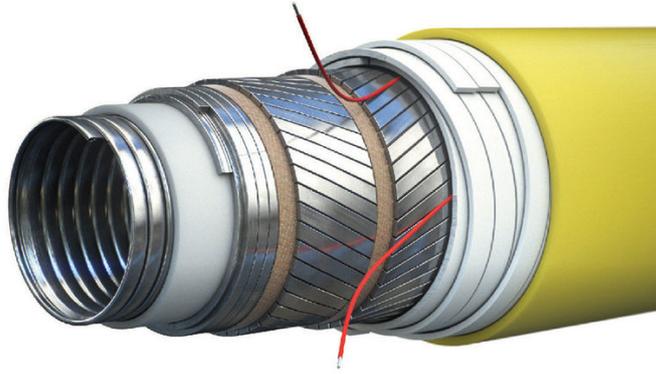


Figura 2.10: Ilustração de duto flexível com camadas expostas - Retirado de [13]

tangenciais causadas pela pressão interna.

A armadura de tração, na sequência, é instalada em pares formados também por arames em formato helicoidal. O par possui ângulos de enrolamento contrários, visando assim equilibrar a torsão no duto. Esta armadura tem a função de resistir aos esforços de tração e é usada para sustentar o peso das demais camadas e transferir a carga para a plataforma.

Finalmente, um novo revestimento polimérico é aplicado como uma capa agindo como barreira à água do mar e unindo as camadas internas.

Além dessas, podem existir outras camadas conforme a necessidade do projeto, como faixas anti atrito, que podem ser aplicadas entre as armaduras para minimizar o desgaste do material e manter o formato original.

As principais vantagens desse tipo de duto estão na sua alta flexibilidade e facilidade de instalação. A flexibilidade torna viável diferentes configurações de *risers* e os torna adequados a serem instalados em plataformas com grandes movimentos como FPSOs e semissubmersíveis, além de maior facilidade na elaboração de rotas na instalação de dutos já que se adapta melhor ao relevo do solo submarino. Essa característica também permite que sejam enrolados em carretéis e carrosséis (Figura 2.11) contendo seções de grandes comprimentos, o que, junto à não necessidade de soldagem para efetuar conexões, torna a operação de instalação prática e rápida. A desmobilização é igualmente prática, o que torna o duto flexível reutilizável, podendo ser reinstalado em diferentes localizações, prática comum no Brasil.

No entanto, algumas limitações, principalmente ligadas à utilização em águas ultraprofundas, por vezes tornam os dutos flexíveis inviáveis. A resistência a colapso é baixa, o que impede a instalação em regiões de alta pressão como as de grandes profundidades. Normalmente são mais pesados que dutos rígidos, fazendo com que *risers* flexíveis causem maiores esforços



Figura 2.11: Duto flexível armazenado em carrossel de navio de instalação - Retirado de [14]

sobre a plataforma [48]. O peso maior também faz com que a extremidade de topo esteja sujeita a altas tensões trativas, enquanto que na seção próxima ao TDP ocorra flexões elevadas. Somado a isso, apresentam maior permeabilidade a substâncias de baixo peso molecular como o H_2S , que pode expor as armaduras a ambiente corrosivo. Todos esses fatores acarretam em diminuição da vida em fadiga. Além das limitações estruturais é importante observar que financeiramente há desvantagens pois o custo de fabricação de um duto flexível é de 2 a 3 vezes maior que um rígido e que atualmente há poucos fabricantes no mundo.



Figura 2.12: Duto flexível apresentando defeito por pressão interna excessiva, conhecido como *birdcaging* ou flambagem radial - Retirado de [15]

2.3.2

Dutos rígidos

De construção mais simples, os dutos rígidos consistem em sequências de tubos, geralmente de aço, de 12m de comprimento unidos por solda. Apesar da maior simplicidade de fabricação e menores custos de material, o projeto de um duto rígido exige maior esforço de engenharia pois a maior rigidez à flexão torna a instalação mais complexa e exige técnicas de soldagem de alta qualidade (Figure 2.13).



Figura 2.13: Procedimento de soldagem de duto rígido - Retirado de [16]

Sua utilização em lâmina d'água ultraprofunda é bastante vantajosa e tem substituído *risers* flexíveis em alguns projetos neste cenário. Destaca-se a maior resistência a colapso, o baixo peso, a adequação a ambientes de alta temperatura e pressão, além de menor custo de fabricação. Estes fatores permitem que os dutos rígidos tenham uma vasta gama de aplicações, podendo ser fabricados com diâmetros entre 6 e 30 polegadas [45].

Uma das maiores limitações está ligada a problemas de fadiga de *risers* rígidos. Estes *risers* possuem elevada resposta dinâmica, principalmente quando estão acoplados a plataformas semissubmersíveis e FPSOs, e podem sofrer maior variação nas tensões atuantes na estrutura. O carregamento cíclico gerado pode diminuir a vida em fadiga especialmente na extremidade de topo e na região do TDP. Além dos problemas com fadiga, a região do TDP pode ainda sofrer compressão.

2.3.3

Risers

As características de um *riser* devem estar alinhadas às especificações do projeto, as condições meteoceanográficas do campo e o tipo de UEP. Estas informações permitirão determinar o tipo de *riser* e configuração mais

adequados. Além disso, é necessário considerar que deve ter o menor comprimento possível, de modo a reduzir os custos de instalação e de materiais, porém precisa ter flexibilidade o suficiente para permitir longas excursões da plataforma [43].

Nos itens à seguir são descritas as configurações mais usadas para projetos de *risers* em águas profundas (Figura 2.14). Atualmente, para dutos rígidos há *risers* em operação apenas nas configurações catenária e *lazy wave*, conhecidos como *Steel Catenary Riser* (SCR) e *Steel Lazy Wave Riser* (SLWR), respectivamente.

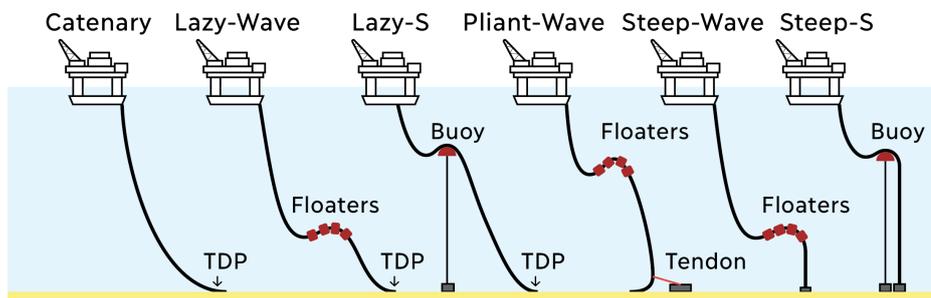


Figura 2.14: Exemplos de configurações de *risers*

2.3.3.1 Catenária livre

A configuração geométrica mais simples, e comum, é a catenária livre, na qual o *riser* é acoplado à plataforma e se estende livremente até o solo em formato de catenária modificada pela rigidez à flexão da estrutura [46]. Por se tratar de uma configuração de fácil instalação, com menores custos e número de componentes auxiliares, é considerada a geometria padrão no início de um projeto. Com o aumento da lâmina d'água, no entanto, o comprimento suspenso torna-se muito grande, elevando o peso da estrutura e, conseqüentemente, tornando a tração de topo e esforços sobre a UEP muito elevados. Esta configuração é muito sensível aos movimentos da plataforma já que não há elementos para desacoplar os movimentos entre a UEP e porções do *riser*; este fato aumenta o risco de flambagem e induz forças compressivas na região do TDP.

2.3.3.2 *Lazy wave e steep wave*

Desacoplar os movimentos do topo e do TDP é uma forma de se evitar os problemas associados à catenária livre. Nas configurações *lazy wave* e *steep wave*

wave, flutuadores são instalados na porção intermediária do *riser*, alterando a configuração de catenária para um formato ondulado devido ao empuxo gerado. A adição dos flutuadores é capaz de diminuir os esforços no topo, uma vez que esta região não terá mais que suportar o peso de todo o comprimento suspenso, enquanto que no TDP haverá alívio das cargas compressivas. A solução, portanto, é capaz de aumentar a vida útil do *riser*.

Nas soluções do tipo *steep* o *riser* é conectado à *flowline* com ângulo próximo da vertical, sendo utilizadas quando a projeção horizontal entre a plataforma e o poço é pequena ou o fluido interno apresentar diferenças de densidade. Nas configurações *lazy* há formação de 2 catenárias, separadas pelo trecho com flutuadores.

Conforme já afirmado no Capítulo 1, a complexidade da *lazy wave* torna a instalação desafiadora, exigindo técnicas de soldagem mais sofisticadas (no caso de *riser* rígido) e maior investimento devido à instalação dos flutuadores.

2.3.3.3

Lazy S* e *steep S

As configurações *lazy* e *steep S* têm a mesma função que as do tipo *wave*, no entanto os flutuadores são substituídos por uma bóia de subsuperfície.

Segundo Bai e Bai[43], estes tipos de *risers* são consideradas apenas se a catenária livre ou as configurações *wave* não forem possíveis para determinado campo pois demandam uma instalação muito mais complexa.

2.3.3.4

Pliant wave

Esta configuração é similar a uma *lazy wave*, porém é fixada ao solo através de um tendão. Desse modo, a tensão do *riser* é transferida do TDP e evita o movimento do duto nesta região, expandindo a vida útil da estrutura.

2.3.3.5

***Riser* em catenária hidroamortecida - RCHA**

Nesta configuração o *riser* essencialmente adota a mesma configuração que uma catenária livre. A diferença está na inserção de amortecedores hidrodinâmicos, que consistem em um material de revestimento de baixa densidade aplicado em diferentes segmentos do *riser*. As principais funções dos amortecedores são reduzir a propagação de ondas compressivas ao longo da estrutura, evitando flambagem na região do TDP, e aliviar as tensões atuantes na estrutura.

O leve empuxo induzido pelos amortecedores torna-se suficiente para aliviar as tensões no ponto crítico do *riser* em catenária. No trabalho de Cardoso et al.[49], a viabilidade técnica da configuração é abordada através de um problema de otimização.

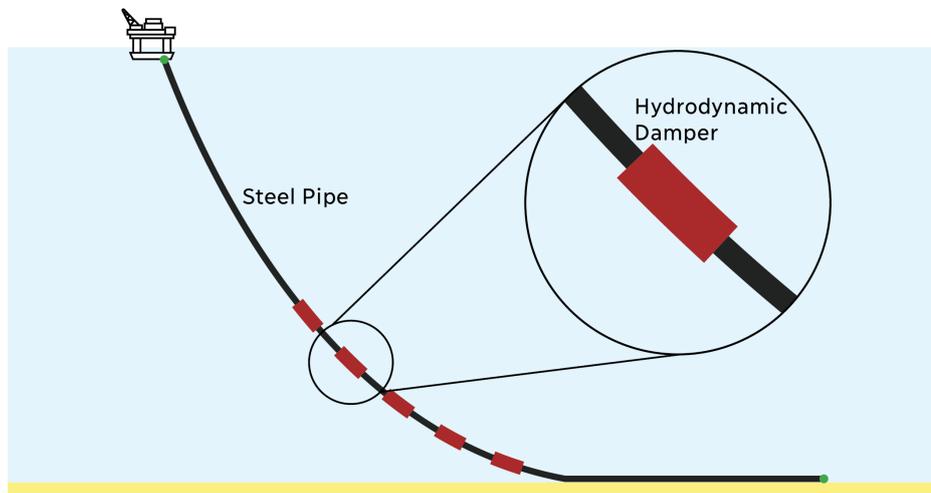


Figura 2.15: Ilustração da configuração RCHA

3

Metodologia de projeto e análise de *risers*

O objetivo deste capítulo é descrever o procedimento necessário para realizar o projeto de um *riser* e as análises estruturais necessárias. A abordagem apresentada é baseada nas normas técnicas API RP 2RD [17] e DNVGL-ST-F201 [50], amplamente reconhecidas e adotadas como padrão para esse tipo de projeto.

3.1

Casos de carregamento

A análise estrutural de um *riser* deve considerar as diversas combinações de condições às quais a estrutura poderá ser exposta ao longo do seu ciclo de operação. Estes cenários, conhecidos como casos de carregamento, possibilitam avaliar a resposta estrutural e determinar se os limites estruturais admissíveis são atendidos. Os casos de carregamento são classificados em três diferentes categorias: carregamentos funcionais, ambientais e acidentais.

Carregamentos funcionais são definidos como consequência da existência física do sistema e sua operação, sem levar em consideração efeitos ambientais e acidentais. Exemplos de carregamentos funcionais são o peso do *riser*, a pressão interna e externa, empuxo gerado por acessórios e interação com o solo.

Carregamentos ambientais são aqueles impostos direta ou indiretamente pelo ambiente oceânico, tendo como principais parâmetros as ondas e correntes, que geram os deslocamentos da UEP. Ondas oceânicas de superfície são uma das principais fontes de forças ambientais dinâmicas atuantes em um *riser*. De formato irregular, variam em comprimento e altura e podem atingir o *riser* e a UEP em mais de uma direção simultaneamente. Devido à natureza aleatória da superfície do mar as ondas são normalmente descritas em função de alguns parâmetros de onda de origem probabilística. As correntes exercem forças laterais nos *risers* e deslocamentos nas plataformas; são inseridas através de um perfil que indica a velocidade e direção da corrente em função da profundidade. A resposta da UEP aos carregamentos ambientais gera deslocamentos e movimentos que são transmitidos diretamente ao topo do *riser*.

Carregamentos acidentais são aqueles resultantes de ocorrências não planejadas de baixa ocorrência, como impactos, falha em algum equipamento

de sustentação como tensionador e até interferência de atividades alheias como barcos de pesca.

A combinação entre diferentes conjuntos formados pelas categorias de carregamento gera um determinado caso de carregamento, conforme a Figura 3.1. É recomendado que sejam considerados uma variedade de casos de carregamento que reflita os diferentes cenários aos quais o *riser* poderá estar exposto durante sua vida útil, especialmente aqueles que levem a condições extremas.

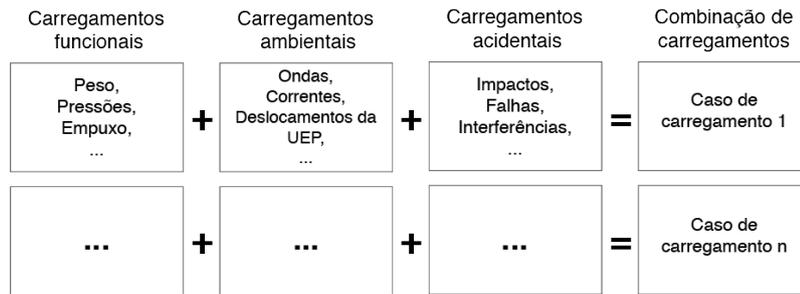


Figura 3.1: Exemplo de combinações de um caso de carregamento - Adaptado de [17]

3.2

Análise global de risers

O objetivo da análise global é obter o comportamento dinâmico do *riser* exposto aos casos de carregamento selecionados e, através desse, avaliar os esforços, deformações e geometria estrutural.

A fim de determinar a posição de equilíbrio de um *riser*, aplica-se a equação de equilíbrio estático para uma viga tensionada:

$$\frac{d^2}{dz^2} \left[EI(z) \frac{d^2 u}{dz^2} \right] - \frac{d}{dz} \left[T_e(z) \frac{du}{dz} \right] = f(z) \quad (3-1)$$

onde z é a coordenada espacial ao longo do eixo da viga, u o deslocamento transversal na direção da carga, EI a rigidez à flexão da seção transversal, f as forças externas e T_e a tensão efetiva na viga.

A tensão efetiva é definida como a tensão axial na parede do duto (T_w) somada da tensão gerada pela diferença de pressões externa (p_e) e interna (p_i):

$$T_e = T_w + (p_e A_e - P_i A_i) \quad (3-2)$$

Incorporando à Equação 3-1 parcelas representando forças de inércia e amortecimento para a perda de energia, é obtida a equação de equilíbrio dinâmico. Aplicando o princípio de d'Alembert e assumindo amortecimento viscoso obtém-se:

$$[m(z) + \rho A(z)] + \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c(z) \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left[EI(z) \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[T_e(z) \frac{\partial u}{\partial z} \right] = f(z, t) \quad (3-3)$$

$A(z)$ representa a seção transversal interna do duto, m a massa distribuída, c o coeficiente de amortecimento viscoso e ρ a massa específica do fluido escoando no interior *riser*.

Por se tratar de um problema com alto grau de não-linearidades, a utilização de soluções analíticas se torna inviável, sendo necessário discretizar as equações no espaço e aplicar o Método dos Elementos Finitos (MEF). Partindo da Equação 3-3 aplica-se o método para determinado elemento:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (3-4)$$

sendo \mathbf{M} , \mathbf{C} e \mathbf{K} as matrizes de massa, amortecimento e rigidez do elemento, respectivamente, e $\ddot{\mathbf{u}}$, $\dot{\mathbf{u}}$ e \mathbf{u} os vetores de aceleração, velocidade e deslocamento dos nós do elemento. Para N graus de liberdade por nó, as matrizes e vetores da equação terão dimensões $N \times N$ e $N \times 1$, respectivamente, constituindo um sistema de N equações diferenciais ordinárias. As condições iniciais $\dot{\mathbf{u}}(0)$ e $\mathbf{u}(0)$ são obtidas através da solução estática.

A solução da Equação 3-4 é obtida através de integração numérica ao longo do tempo t analisado. Para isso é necessário aplicar um algoritmo de integração no tempo, como, o método de Newmark, um dos mais utilizados para esse tipo de tarefa. O método considera as expansões em série de Taylor de terceira ordem para $\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t}$ e $\mathbf{u}_{t+\Delta t}$:

$$\mathbf{u}_{t+\Delta t} = \mathbf{u}_t + \Delta t \dot{\mathbf{u}}_t + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{\mathbf{u}}_t + \frac{\Delta t^3}{6} \dddot{\mathbf{u}}_t \quad (3-5)$$

$$\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} = \dot{\mathbf{u}}_t + \Delta t \ddot{\mathbf{u}}_t + \frac{\Delta t^2}{2} \dddot{\mathbf{u}}_t \quad (3-6)$$

Aplicando as constantes γ e β e considerando aceleração linear durante um passo temporal Δt , obtém-se:

$$\ddot{\mathbf{u}}_t = \frac{\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} - \ddot{\mathbf{u}}_t}{\Delta t} \quad (3-7)$$

$$\mathbf{u}_{t+\Delta t} = \mathbf{u}_t + \dot{\mathbf{u}}_t \Delta t + \frac{\Delta t^2}{2} [(1 - 2\beta)\ddot{\mathbf{u}}_t + 2\beta\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t}] \quad (3-8)$$

$$\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} = \dot{\mathbf{u}}_t + \Delta t [(1 - \gamma)\ddot{\mathbf{u}}_t + \gamma\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t}] \quad (3-9)$$

onde β e γ são parâmetros numéricos que controlam a estabilidade e o amortecimento numérico introduzidos sobre o sistema.

Através do sistema composto pelas Equações 3-4, 3-8 e 3-9 é possível obter a aceleração, velocidade e deslocamento no passo seguinte. O procedimento

é repetido até que esses valores sejam obtidos para todo o período de tempo desejado na análise.

O método de análise descrito nesta seção está implementado em *softwares* comerciais para simulação de sistemas *offshore*, tais como Orcaflex, Flexcom e Anflex.

3.3

Critérios de projeto

A viabilidade de um projeto de *riser* é avaliada através de critérios que visam garantir que o mesmo permanecerá estruturalmente íntegro durante a vida útil prevista, sem oferecer riscos ambientais e às equipes de instalação e operação.

Tais critérios baseiam-se em normas técnicas e práticas recomendadas adquiridas de projetos anteriores e englobam diversas fases do projeto, desde o dimensionamento dos dutos até o descomissionamento do *riser*. Tipicamente, os principais critérios de falha baseiam-se em limites geométricos, tensões atuantes, colapso da estrutura, flambagem e fadiga.

Neste trabalho considera-se apenas os critérios de projeto que podem ser afetados pela configuração geométrica do *riser*, obtida através da análise global, já que algumas restrições são diretamente ligadas a etapas anteriores, tais como o dimensionamento dos dutos, material de fabricação e acessórios.

A norma DNVGL-ST-F201 é adotada neste trabalho e se baseia no critério de fatores de carregamento e resistência (LRFD, *Load and Resistance Factor Design*), que utiliza diversos coeficientes de segurança e combina a ação de diferentes tipos de carregamento e as probabilidades associadas de ocorrência. O critério de tensões admissíveis (ASD, *Allowable Stress Design*), considerado mais conservador, tem sido substituído na indústria pelo LRFD, como é possível verificar na API STD 2RD [51], atualização da tradicional API RP 2RD e que se baseava no ASD.

Cada seção do *riser* deverá satisfazer o critério de carregamento combinado (CLC, *Combined Loading Criteria*), estabelecido através da seguinte equação:

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_{SC}\gamma_m \left[\frac{|M_d|}{M_k} \sqrt{1 - \left(\frac{p_i - p_e}{p_b} \right)^2} + \left(\frac{T_e}{T_k} \right)^2 \right] + \left(\frac{p_i - p_e}{p_b} \right)^2 \leq 1 \quad \text{se } p_i > p_e \\ (\gamma_{SC}\gamma_m)^2 \left\{ \left[\frac{|M_d|}{M_k} + \left(\frac{T_e}{T_k} \right)^2 \right]^2 + \left(\frac{p_e - p_{min}}{p_c} \right)^2 \right\} \leq 1 \quad \text{se } p_i \leq p_e \end{array} \right. \quad (3-10)$$

onde: γ_{SC} = Fator para a classe de segurança do material

γ_m = Fator de resistência do material

M_d = Momento fletor

M_k = Resistência ao momento fletor plástico

T_e = Tensão efetiva

T_k = Resistência à força axial plástica

p_i = Pressão interna

p_e = Pressão externa

p_b = Pressão de resistência da parede à pressão interna (*bursting*)

p_c = Pressão de resistência à flambagem circunferencial (*hoop buckling*)

p_{min} = Pressão interna mínima

Os cálculos do momento fletor e da tensão efetiva de projeto consideram, separadamente, as parcelas provenientes dos carregamentos funcionais, ambientais e acidentais (se aplicável) multiplicadas pelos respectivos fatores de carregamento (γ_f , γ_e e γ_a).

As resistências ao momento fletor plástico e à força axial plástica são definidos, respectivamente:

$$M_k = f_y \alpha_c (D - t)^2 t \quad (3-11)$$

$$T_k = f_y \alpha_c \pi (D - t) t \quad (3-12)$$

onde α_c é um parâmetro de resistência à deformação.

A pressão de resistência ao colapso da parede é definida como:

$$p_b = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{2t}{D - t} \min \left(f_y; \frac{f_u}{1.15} \right) \quad (3-13)$$

As tensões de escoamento e ruptura característicos (f_y e f_u) são obtidas em função do material e temperatura ao qual é exposto, o que leva a um decréscimo às tensões nominais de escoamento e ruptura (SMYS e SMTS).

A pressão de resistência à flambagem circunferencial é obtida através da equação à seguir:

$$(p_c - p_{el}) (p_c^2 - p_p^2) = p_c p_{el} p_p f_0 \frac{D}{t} \quad (3-14)$$

sendo f_0 a ovalização da seção transversal do duto e p_{el} e p_p , respectivamente, as pressões de colapso elástico e plástico, definidas como:

$$p_{el} = \frac{2E\left(\frac{t}{D}\right)^3}{1 - \nu^2} \quad (3-15)$$

$$p_p = 2\frac{t}{D}f_y\alpha_{fab} \quad (3-16)$$

onde α_{fab} o fator de fabricação, ligado ao método de fabricação do duto.

4 Otimização

A tarefa de otimizar está presente na natureza e faz parte do comportamento humano instintivamente. Por exemplo, os alvéolos presentes nas colmeias de abelhas, cavidades que armazenam o mel produzido, apresentam formato hexagonal pois este permite que um maior volume seja estocado para uma menor quantidade de material gasto para a construção dos mesmos. Observa-se, também, que as pessoas buscam a realização de tarefas com o menor gasto energético possível, minimizando desconforto e tempo. Invenções básicas como a alavanca, polia e manivela, demonstram a contínua busca do homem pela maximização da eficiência de tarefas mecânicas.

O objetivo da otimização é encontrar, para dado sistema em estudo, a melhor solução viável segundo um determinado critério de eficiência. Esse critério, conhecido matematicamente como função objetivo, é previamente definido e reflete as necessidades do projeto, tais como redução do peso estrutural, diminuição do custo, minimização de esforços, etc. As características do sistema são determinadas através de um conjunto de parâmetros, que são as variáveis de projetos, e os valores assumidos por esses modificam o valor da função objetivo. Portanto, o processo de otimização consiste em encontrar os valores para as variáveis de projeto que gerem valor mais adequado da função objetivo.

A solução do problema é encontrada através de um algoritmo de otimização, que deve ser escolhido conforme as características do problema. Dada a variedade de algoritmos existentes, a seleção do algoritmo torna-se etapa essencial e determinante na velocidade de busca da solução ou mesmo se será capaz de encontrar alguma [52].

Durante a resolução do problema, as variáveis podem assumir valores que levam a soluções inviáveis para problemas reais de engenharia, como tensões muito elevadas, custo excessivamente alto ou geometria difícil de ser obtida. Faz-se necessário, portanto, impor restrições aos valores de algumas variáveis ou conjuntos de variáveis de modo a garantir que a solução esteja de acordo com os critérios técnicos e operacionais necessários.

Usualmente, um problema de otimização pode ser formulado da seguinte forma:

4.2

Programação não linear

Esta classe de problemas atrai maior interesse devido à frequência muito maior com que problemas de engenharia são formulados através de funções não-lineares das variáveis de projeto. Deb[55] classifica os métodos de otimização como determinísticos ou aleatórios. Os métodos determinísticos produzirão sempre a mesma resposta partindo de um mesmo ponto inicial, pois obedecem a uma sequência predefinida de comandos. Métodos aleatórios utilizam valores aleatórios para as variáveis e para a sequência de operações, produzindo resultados diferentes em cada vez que são solicitados.

4.2.1

Métodos determinísticos

Uma das formas para se resolver um problema de minimização desse tipo consiste em, partindo de um ponto \mathbf{x}_0 , gerar uma sequência de iterações $\{\mathbf{x}_k\}_{k=0}^{\infty}$ nas quais o ponto é deslocado em determinada direção \mathbf{p}_k em busca de um novo ponto \mathbf{x}_{k+1} cujo valor da função seja menor, conforme a equação:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \alpha \mathbf{p}_k \quad (4-3)$$

onde α é uma constante que determina o tamanho do passo.

A função $f(\mathbf{x})$ a ser minimizada pode ser reescrita, portanto, como:

$$f(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}_k + \alpha \mathbf{p}_k) \quad (4-4)$$

logo, encontrar o ponto \mathbf{x}^* que minimiza a função $f(\mathbf{x})$ consiste em encontrar os valores de \mathbf{p}_k e α que minimizem a função $f(\mathbf{x}_k + \alpha \mathbf{p}_k)$.

Há 3 categorias de algoritmos utilizados para determinar a direção de busca: métodos de ordem zero, primeira e segunda ordem. Os métodos de ordem zero utilizam apenas os valores das funções para determinar a direção de busca. Sabe-se que o gradiente de determinada função, ∇f_k , indica a direção e o sentido de maior crescimento da mesma; portanto, a inversão do sentido do gradiente ($-\nabla f_k$) indica a direção de decrescimento da função, onde poderá estar o mínimo; essa é a premissa inicial dos métodos de primeira ordem, que utilizam derivadas primeiras das funções. Os métodos de segunda ordem se apoiam no mesmo princípio que os de primeira ordem, porém consideram a curvatura da função para calcular a direção de decrescimento da função. A curvatura é obtida através da matriz Hessiana \mathbf{H} , composta de derivadas de segunda ordem:

$$\mathbf{H}_{ij} = \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \quad (4-5)$$

Os métodos determinísticos apresentam bom desempenho, convergindo para um mínimo com bastante rapidez, no entanto, a principal desvantagem da maioria dos algoritmos disponíveis é a incapacidade de diferenciar mínimos locais de globais [19], principalmente em problemas com muitos mínimos. Como alternativa, surgem os métodos aleatórios, que têm a capacidade de encontrar soluções próximas às globais.

4.2.2

Métodos aleatórios

Esse tipo de método se baseia em funções de probabilidade para variar os parâmetros de busca. Apesar de haver algoritmos puramente aleatórios, baseados na geração de pontos de teste em todo o domínio, os que obtiveram maior sucesso baseiam-se em fenômenos ou processos naturais. Como exemplo, há algoritmos que se baseiam no princípio da seleção natural de Charles Darwin, caso dos algoritmos genéticos (GA), ou na representação do movimento do vôo de um bando de pássaros, que inspirou o método do enxame de partículas. Apesar de recentes desenvolvimentos no desempenho geral desses métodos, ainda demandam um número grande de iterações para encontrar alguma solução, o que pode ser proibitivo em problemas cujo cálculo da função objetivo ou restrições tenha um alto custo computacional.

Devido à relevância histórica e popularidade, inclusive na aplicação em problemas de otimização de *risers*, uma pequena introdução a algoritmos genéticos será feita à seguir;

4.2.2.1

Algoritmos genéticos

Charles Darwin afirmou que *quanto melhor um indivíduo se adaptar ao seu meio ambiente, maior será sua chance de sobreviver e gerar descendentes*; é sobre este conceito que se baseiam os algoritmos genéticos. Uma população é gerada por um conjunto aleatório de indivíduos, que são candidatos à solução do problema. Para cada indivíduo avalia-se o valor de uma função de aptidão, baseada na função objetivo, que reflete a adaptação deste ao ambiente no qual está inserido. Os indivíduos menos adaptados são eliminados, enquanto que os mais adaptados dão origem a uma nova geração de indivíduos através de cruzamento, que combina as características dos pais. Mutações também podem ocorrer, alterando alguma característica do indivíduo aleatoriamente. Esse processo de seleção, reprodução e formação de novas gerações é repetido até uma solução seja encontrada, representada pelo indivíduo mais apto de todos.

Cada indivíduo de determinada população é caracterizado por um cromossomo, composto por genes, que são valores para cada variável do problema, e que determinam o valor da função de aptidão. Os genes são usualmente representados de forma binária porém, outras formas de representação são possíveis, como normalização do valor das variáveis.

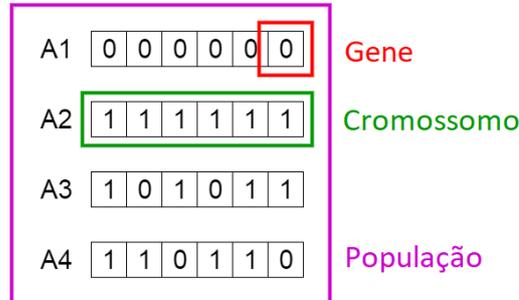


Figura 4.1: Representação de gene, cromossomo e população - Adaptado de [18]

Uma fase de seleção é aplicada, selecionando os indivíduos na população com maior aptidão para que tenham maior chance de serem selecionados para reprodução. A reprodução, ou *crossover*, seleciona dois indivíduos para acasalarem e aplica um ponto de cruzamento de forma aleatória entre os genes, conforme ilustrado na Figura 4.2.

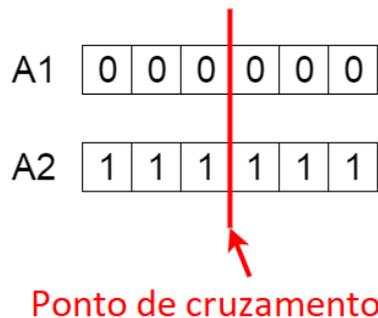


Figura 4.2: Exemplo de ponto de cruzamento - Adaptado de [18]

Os genes dos dois indivíduos são trocados até o ponto de cruzamento dando origem a duas proles (Figura 4.3). A prole pode sofrer uma mutação genética, tendo alguns de seus genes alterados aleatoriamente, como ilustrado na Figura 4.4 nos genes marcados em vermelho. Tal qual na natureza, a mutação é um evento de baixa probabilidade de ocorrência. O objetivo da mutação é manter a diversidade na população e prevenir convergência prematura.

As novas proles são integradas à população substituindo os indivíduos de menor aptidão, dando origem a uma nova população com aptidão média melhor que a anterior. Os processos de seleção, reprodução e geração de nova população

A5	1	1	1	0	0	0
A6	0	0	0	1	1	1

Figura 4.3: Proles obtidas do cruzamento - Adaptado de [18]

A5	1	1	1	0	0	0
A5	1	1	0	1	1	0

Figura 4.4: Exemplo de mutação - Adaptado de [18]

são repetidos até que uma convergência seja obtida, com novas proles que não apresentem aumento significativo de aptidão em relação à média populacional.

4.2.3 Otimização com restrições

Ao representar restrições matematicamente, uma prática comum para evitar mal condicionamentos é garantir que as mesmas apresentem valores similares quando em níveis similares de violação, o que é obtido através de normalização [19]. As restrições podem ser valor máximo ou mínimo, sendo representadas respectivamente nas formas à seguir:

$$g = \frac{\theta_{calc}}{\theta_{max}} - 1 \leq 0 \quad (4-6)$$

$$g = 1 - \frac{\theta_{calc}}{\theta_{min}} \leq 0 \quad (4-7)$$

onde θ_{calc} representa o valor calculado para determinada variável, θ_{max} e θ_{min} os valores máximo e mínimo permitidos para a mesma variável.

Durante o processo de otimização, regiões que apresentam valores muito elevados para a função objetivo não são candidatas à solução do problema. Através dessa lógica foi pensada a ideia de agregar as restrições à função objetivo, aumentando o valor da mesma toda a vez que determinado ponto apresentar alguma violação. Esse procedimento é adotado no método de penalidade quadrática, um dos métodos para otimização com restrições mais populares e simples.

4.2.3.1 Método de penalidade quadrática

Este método consiste em substituir o problema com restrições original por um problema sem restrições de uma única função, contendo a função objetivo

original somada a um termo para cada restrição em caso de violação. Esses termos são multiplicados por uma constante positiva, chamada parâmetro de penalidade (μ)[52], compondo a função aumentada:

$$\phi(\mathbf{x}, \mu) = f(\mathbf{x}) + \frac{\mu}{2} \sum_{j=1}^{n_h} h_j^2(\mathbf{x}) + \frac{\mu}{2} \sum_{i=1}^{n_g} \langle g_i(\mathbf{x}) \rangle^2 \quad (4-8)$$

onde o operador $\langle a \rangle$ indica $\max(0, a)$.

É intuitivo afirmar que um valor elevado para o parâmetro de penalidade garantirá que a solução não apresentará restrições violadas. No entanto, à medida que $\mu \rightarrow \infty$, a função $\phi(\mathbf{x}, \mu)$ passa a ser governada pelas restrições, alterando a natureza da função objetivo. Outra desvantagem está na matriz Hessiana, que passa a apresentar problemas numéricos.

Observa-se que, à medida que o parâmetro de penalidade é aumentado, o mínimo é deslocado em direção ao limite da restrição, no entanto, a curvatura próxima ao mínimo também aumenta, o que é reflexo da matriz Hessiana para a mesma região. O valor elevado da curvatura pode gerar dificuldades numéricas.

Para problemas com regiões extensas apresentando violação de restrições, o método de penalidade quadrática precisará de valores elevados de μ para encontrar uma região de soluções viáveis, levando a dificuldades numéricas e, possivelmente, falhando.

4.2.3.2

Método do Lagrangeano aumentado

Uma tentativa de correção dos problemas associados ao método de penalidade consiste em adicionar à função aumentada (Eq. 4-8) estimativas dos multiplicadores de Lagrange (λ). Para um problema com apenas restrições de igualdade a função Lagrangeana aumentada será:

$$\mathcal{L}(\mathbf{x}, \lambda, \mu) = f(\mathbf{x}) + \sum_{j=1}^{n_h} \lambda_j h_j(\mathbf{x}) + \frac{\mu}{2} \sum_{j=1}^{n_h} h_j^2(\mathbf{x}) \quad (4-9)$$

Comparando as Equações 4-8 e 4-9, a única diferença está no somatório envolvendo λ , portanto, trata-se de uma combinação da função Lagrangeana e da função de penalidade quadrática [52].

A minimização de $\mathcal{L}(\mathbf{x}, \lambda, \mu)$ em função de \mathbf{x} será realizada a cada iteração k , fixando μ a algum valor $\mu^{(k)} > 0$ e λ à estimativa $\lambda^{(k)}$. É estabelecido que para um ponto x^* ser considerado um mínimo local de um problema de otimização com restrições de desigualdade o mesmo deve satisfazer as condições conhecidas como condições de Karush-Kuhn-Tucker, ou condições de KKT, estabelecidas para a função Lagrangeana:

$$\nabla \mathcal{L}(\mathbf{x}^*, \lambda^*) = 0 \quad (4-10)$$

$$\nabla f(\mathbf{x}^*) + \sum_{j=1}^{n_h} \lambda_j^* \nabla h_j(\mathbf{x}^*) = 0 \quad (4-11)$$

Aplicando as condições de KKT para a função aumentada (Eq. 4-9), obtem-se:

$$\nabla f(\mathbf{x}^{(k)}) + \sum_{j=1}^{n_h} \left[\lambda_j^{(k)} + \mu^{(k)} h_j(\mathbf{x}^{(k)}) \right] \nabla h_j(\mathbf{x}^{(k)}) = 0 \quad (4-12)$$

Para um número infinito de iterações ($k \rightarrow \infty$) o valor de $(\mathbf{x})^k$ tende ao valor da solução \mathbf{x}^* . Comparando as equações 4-11 e 4-12 é possível inferir que:

$$\lambda_j^* \nabla h_j(\mathbf{x}^*) \approx \left[\lambda_j^{(k)} + \mu^{(k)} h_j(\mathbf{x}^{(k)}) \right] \nabla h_j(\mathbf{x}^{(k)}) \quad (4-13)$$

$$\lambda_j^* \approx \lambda_j^{(k)} + \mu^{(k)} h_j(\mathbf{x}^{(k)}) \quad (4-14)$$

Rearranjando a Eq. 4-14, obtem-se:

$$h_j(\mathbf{x}^{(k)}) \approx \frac{\lambda_j^* - \lambda_j^{(k)}}{\mu^{(k)}} \quad (4-15)$$

Observa-se que para uma estimativa dos multiplicadores de Lagrange ($\lambda^{(k)}$) próxima o suficiente dos valores reais (λ^*), a restrição $h_j(\mathbf{x}^{(k)})$ será atendida sem a necessidade de adotar valores excessivamente elevados para $\mu^{(k)}$. Essa propriedade permite que o método do Lagrangeano aumentado apresente convergência mais rápida e evite problemas numéricos ligados a mal condicionamento, diferente do que ocorre com o método de penalidade quadrática [52, 56].

A Eq. 4-14 sugere, intuitivamente, uma estratégia de atualização da estimativa dos multiplicadores de Lagrange ($\lambda^{(k)}$) a cada iteração:

$$\lambda_j^{k+1} = \lambda_j^{(k)} + \mu^{(k)} h_j(\mathbf{x}^{(k)}) \quad (4-16)$$

Bertsekas[56] propõe que o parâmetro de penalidade seja atualizado conforme:

$$\mu^{(k+1)} = \beta \mu^{(k)} \quad (4-17)$$

onde β é uma constante, sendo $\beta > 1$.

O procedimento descrito considera problemas com apenas restrições de igualdade. Para a solução de problemas com restrições de desigualdade será necessário modificar a formulação original através da introdução de variáveis auxiliares s_i [56] da forma à seguir :

$$h_i(\mathbf{x}) = g_i(\mathbf{x}) + s_i, \quad s_i \geq 0 \quad (4-18)$$

O problema de minimização a ser resolvido a cada iteração k passa a ser:

$$\min_{\mathbf{x}, \mathbf{s}} \mathcal{L}(\mathbf{x}, \mathbf{s}, \lambda, \mu) = f(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^{n_g} \left[\lambda_i^{(k)} (g_i(\mathbf{x}) + s_i) + \frac{\mu^{(k)}}{2} (g_i(\mathbf{x}) + s_i)^2 \right]$$

tal que: $s_i \geq 0$ para $i = 1, \dots, n_g$ (4-19)

O problema é resolvido em duas etapas, a minimização em função apenas das variáveis auxiliares s_i e posteriormente em função das variáveis de projeto \mathbf{x} . Na primeira etapa, portanto, segue que:

$$\min_{\mathbf{s}} \mathcal{L}(\mathbf{x}, \mathbf{s}, \lambda, \mu) = f(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^{n_g} \min_{s_i} \left[\lambda_i^{(k)} (g_i(\mathbf{x}) + s_i) + \frac{\mu^{(k)}}{2} (g_i(\mathbf{x}) + s_i)^2 \right] \quad (4-20)$$

sendo necessário apenas a minimização do último termo:

$$\min_{s_i} \left[\lambda_i^{(k)} (g_i(\mathbf{x}) + s_i) + \frac{\mu^{(k)}}{2} (g_i(\mathbf{x}) + s_i)^2 \right] \quad (4-21)$$

Resolvendo em forma fechada obtém-se:

$$s_i = \max \left[0, - \left(\frac{\lambda_j^{(k)}}{\mu^{(k)}} + g_i(\mathbf{x}) \right) \right] \quad (4-22)$$

Substituindo na Eq. 4-18 o resultado será:

$$h_i(\mathbf{x}) = \max \left[g_i(\mathbf{x}), - \frac{\lambda_i^{(k)}}{\mu^{(k)}} \right] \quad (4-23)$$

Portanto, a função Lagrangeana aumentada para um problema com restrições de desigualdade será:

$$\mathcal{L}(\mathbf{x}, \mathbf{s}, \lambda, \mu) = f(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^{n_g} \left[\lambda_i^{(k)} \max \left[g_i(\mathbf{x}), - \frac{\lambda_i^{(k)}}{\mu^{(k)}} \right] + \frac{\mu^{(k)}}{2} \left(\max \left[g_i(\mathbf{x}), - \frac{\lambda_i^{(k)}}{\mu^{(k)}} \right] \right)^2 \right] \quad (4-24)$$

4.3

Considerações sobre a escolha do algoritmo de otimização

A escolha de determinado algoritmo de otimização deve ser feita após cuidadosa avaliação das características do problema a ser resolvido.

Problemas reais de engenharia frequentemente exigem simulações complexas, cálculos custosos, restrições estruturais e operacionais, além de muitas soluções possíveis. É comum, também, que esses problemas não possuam so-

lução analítica, não sendo possível determinar informações sobre o gradiente da função analisada. Tais características levantadas limitam a escolha do algoritmo aos classificados como determinísticos de ordem zero ou aleatórios.

Os problemas estudados neste trabalho possuem as mesmas características destacadas acima, o que torna crítico que o algoritmo faça o menor número possível de iterações. Portanto, optou-se, inicialmente, por um método determinístico.

Considerado muito efetivo para encontrar regiões próximas a mínimos locais em poucas iterações e capaz de resolver problemas os quais não são possíveis de se obter informações sobre gradiente, o método Nelder-Mead [57] já foi usado como o componente de busca local acoplado a métodos globais como enxame de partículas [58], evolução diferencial [59], busca tabu [60], algoritmos genéticos [61] entre outros.

A solução proposta por Luersen & Le Riche [62], chamada GBNM (*Globalized Bounded Nelder-Mead*), reinicia o método Nelder-Mead sucessivas vezes por meio de um componente estocástico, tornando o método local-global, porém com menos avaliações da função objetivo que os demais híbridos. O método GBNM já foi utilizado, de forma eficiente, na otimização estrutural de suportes feitos por materiais compósitos [63], barreiras de som [64] e rolamentos de rotores [65].

4.4

O método Nelder-Mead

O método Nelder-Mead [57] é um método de ordem zero, o que o faz dispensar o cálculo de gradiente para encontrar a solução do problema de otimização. O método é baseado no *simplex*, uma figura geométrica de $n + 1$ vértices, onde n representa o número de dimensões do problema ($\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_{n+1} \in \mathbb{R}^n$).

Partindo de um ponto \mathbf{x}_1 , um *simplex* de tamanho a é obtido através da equação a seguir [19]:

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_1 + p\mathbf{e}_i + \sum_{k=2}^{n+1} q\mathbf{e}_k, \quad i = 1, \dots, n, \quad k \neq i \quad (4-25)$$

onde \mathbf{e}_i são vetores base unitários e

$$\begin{aligned} p &= \frac{a}{n\sqrt{2}}(\sqrt{n+1} + n - 1), \\ q &= \frac{a}{n\sqrt{2}}(\sqrt{n+1} - 1) \end{aligned} \quad (4-26)$$

Para cada vértice é atribuído o respectivo valor da função objetivo ($f_1 = f(\mathbf{x}_1), f_2 = f(\mathbf{x}_2), \dots, f_{n+1} = f(\mathbf{x}_{n+1})$) e ordena-se do menor valor

ao maior de modo que $f_1 \leq f_2 \leq \dots \leq f_{n+1}$.

Em cada iteração o *simplex* é modificado, substituindo o pior vértice (\mathbf{x}_{n+1}) por outro de melhor valor através de quatro operações geométricas conhecidas como reflexão, expansão, contração e redução (Figura 4.5).

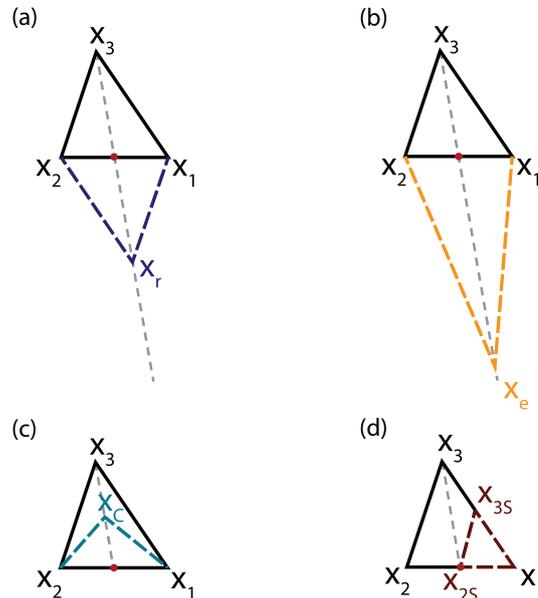


Figura 4.5: Ilustração das operações possíveis do *simplex* em cada iteração

A reflexão (Figura 4.5.a) gera um novo ponto (\mathbf{x}_r) ao longo da reta formada por \mathbf{x}_{n+1} e o centroide dos vértices restantes ($\bar{\mathbf{x}}$):

$$\bar{\mathbf{x}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{4-27}$$

$$\mathbf{x}_r = \bar{\mathbf{x}} + \alpha(\bar{\mathbf{x}} - \mathbf{x}_{n+1}) \tag{4-28}$$

Após essa operação, o valor da função no novo ponto ($f_r = f(\mathbf{x}_r)$) é calculado e, caso a condição $f_1 < f_r \leq f_n$ for satisfeita, \mathbf{x}_{n+1} é substituído por \mathbf{x}_r . Caso $f_r < f_1$, o valor da função ainda pode decrescer na mesma direção, então a expansão (Figura 4.5.b) é aplicada:

$$\mathbf{x}_e = \bar{\mathbf{x}} + \beta(\mathbf{x}_r - \bar{\mathbf{x}}) \tag{4-29}$$

Se $f_e < f_r$, o ponto \mathbf{x}_{n+1} é substituído por \mathbf{x}_e , caso contrário, \mathbf{x}_r será aceito no lugar.

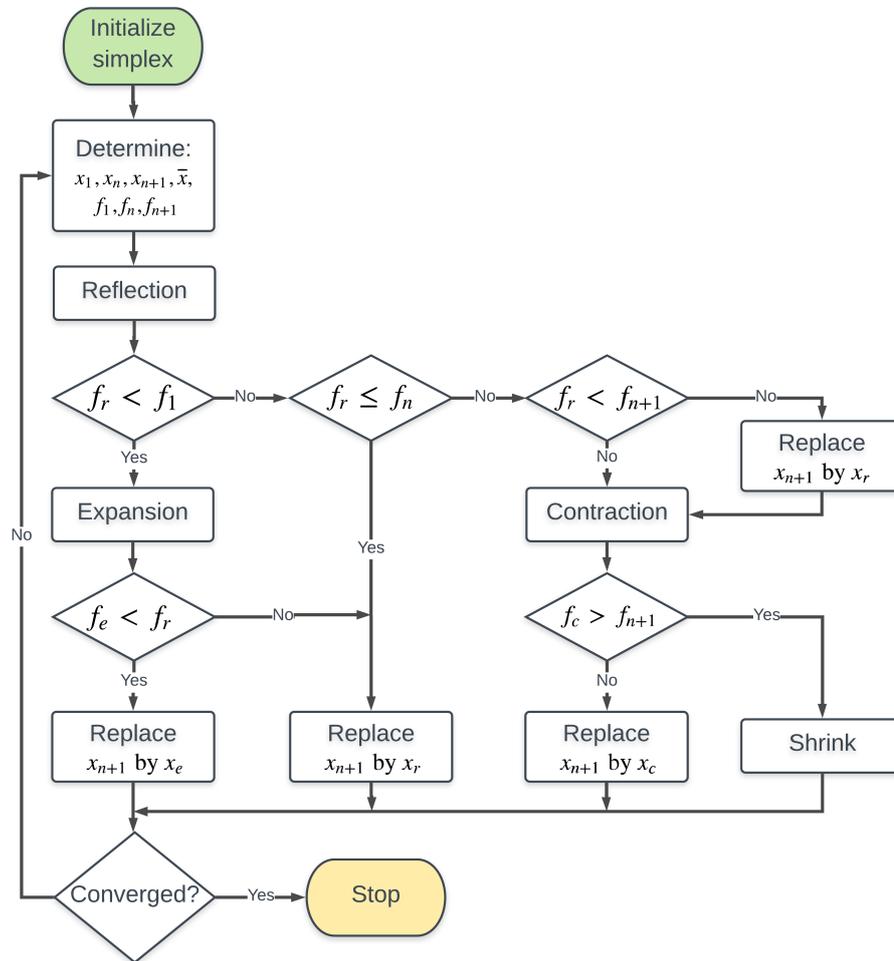
A reflexão pode, todavia, levar a um ponto cujo valor da função é menor f_{n+1} porém maior que f_n . Nesse caso, uma contração (Figura 4.5.c) será efetuada :

$$\mathbf{x}_c = \bar{\mathbf{x}} + \gamma(\mathbf{x}_{n+1} - \bar{\mathbf{x}}) \tag{4-30}$$

Caso nenhuma das operações for capaz de encontrar um ponto melhor, uma redução (Figura 4.5.d) é feita ao redor do vértice \mathbf{x}_1 :

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_i + \delta(\mathbf{x}_{n+1} - \mathbf{x}_i) \quad (4-31)$$

O procedimento é repetido usando o *simplex* obtido até que a solução convirja, levando à solução do problema de otimização. A Figura 4.6 apresenta um fluxograma resumindo o algoritmo de otimização de Nelder-Mead.



PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1621762/CA

Figura 4.6: Fluxograma do algoritmo de Nelder-Mead - adaptado de [19]

Os coeficientes α , β , γ e δ (Eqs. 4-28 - 4-31) indicam a intensidade de cada operação. Para as operações de contração (γ) e redução (δ), quanto menor o valor, menor o *simplex* será, enquanto que para as operações de reflexão (α) e expansão (β), quanto maior o valor, mais o *simplex* expandirá. Os valores utilizados para cada parâmetro deve satisfazer as seguintes condições:

$$\alpha > 0, \quad 0 < \beta < 1, \quad \gamma > 1, \quad \gamma > \alpha, \quad 0 < \delta < 1 \quad (4-32)$$

Nelder & Mead [57] sugerem, no trabalho original, um critério de convergência baseado nos valores das funções objetivo nos vértices do *simplex*, quando os mesmos se tornam similar, o que é medido pela inequação:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^{n+1} \frac{(f_i - \bar{f})^2}{n}} < \xi, \quad \bar{f} = \frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^{n+1} f_i \quad (4-33)$$

onde ξ é a tolerância.

O método Nelder-Mead é bastante eficiente para problemas envolvendo alto custo computacional para cada avaliação da função objetivo já que exige o cálculo de apenas um ou dois pontos de teste por iteração, resultando em um pequeno número total de avaliações necessárias para a resolução do problema.

No entanto, como um método clássico de busca local, o algoritmo irá convergir para a primeira solução local encontrada. Uma estratégia, portanto, deve ser adotada para permitir encontrar soluções globais.

4.5

O método *Globalized Bounded Nelder-Mead*

O método *Globalized Bounded Nelder-Mead* (GBNM), proposto por Luersen & Le Riche [62], é uma modificação do método original na qual, ao invés de obter uma única solução local, será obtida uma boa estimativa do mínimo global. Uma busca local é feita através do método original e, após encontrar uma solução local, o algoritmo global reinicia o procedimento de busca em outra região do domínio.

O ponto de início da nova busca local é escolhido de acordo com uma função densidade de probabilidade adaptativa que mantém histórico das buscas feitas anteriormente. A probabilidade $p(x)$ de já haver escolhido determinado ponto é calculada através do método conhecido como Janelas de Parzen com função de janela gaussiana [66]:

$$p(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i(x) \quad (4-34)$$

onde N é o número de pontos já explorados e p_i a função densidade de probabilidade multidimensional, definida por

$$p_i(x) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}} (\det(\Sigma))^{\frac{1}{2}}} \times \exp \left[-\frac{1}{2} (x - x_i)^T \Sigma^{-1} (x - x_i) \right] \quad (4-35)$$

sendo n a dimensão do problema e Σ a matriz de covariância:

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \quad (4-36)$$

As variâncias σ_j^2 calculadas para cada direção j são estimadas através da relação

$$\sigma_j^2 = \alpha_g (x_j^{\max} - x_j^{\min})^2 \quad (4-37)$$

onde x_j^{\max} e x_j^{\min} são os limites na j -ésima direção, e α_g é um parâmetro que determina a extensão da gaussiana.

O melhor ponto de início de uma nova busca é aquele que minimiza a função $p(x)$ no intervalo permitido. No entanto, esse procedimento levaria a um aumento do custo computacional em uma etapa preliminar do algoritmo. Como alternativa, N_r pontos candidatos são testados e aquele que obtiver o menor valor para $p(x)$ será escolhido como o inicial.

À medida que novas buscas forem efetuadas, a probabilidade de que uma das soluções locais obtidas seja a global aumenta. A estratégia de *reinícios* também está ligada a testes de convergência feitos a cada iteração, podendo gerar um novo *simplex*, grande ou pequeno, à partir do melhor vértice no momento ou reinicializá-lo em outra região do domínio. Considera-se que um *simplex* pequeno possui tamanho a_p enquanto que o grande possui tamanho a_g .

Luersen & Le Riche [62] sugerem três critérios de convergência, testes para verificação se o *simplex* é pequeno, plano ou degenerado.

O *simplex* é considerado pequeno se o mesmo se tornar geometricamente pequeno; este tipo de situação tende a ocorrer em regiões onde as variáveis assumem valores próximos ao limítrofe e o *simplex* não consegue escapar para outra região. A condição pode ser verificada conforme abaixo:

$$\max_{k=1, \dots, n+1} \left(\sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i^k}{x_i^{\max} - x_i^{\min}} \right| \right) < \xi_1 \quad (4-38)$$

onde x_i^k é o i -ésimo componente da k -ésima aresta, x_i^{\max} e x_i^{\min} são os limites na i -ésima direção.

O *simplex* é plano caso esteja em uma região de planície, onde cada vértice assume valores similares para a função objetivo, de modo que o *simplex* não consegue mais se deslocar. O caso é avaliado como:

$$|f_{n+1} - f_1| < \xi_2 \quad (4-39)$$

Finalmente, há casos nos quais o *simplex* pode ser colapsado em algum subespaço do domínio, com todos os vértices ocupando a mesma posição. A condição pode ser verificada caso uma das condições abaixo for satisfeita:

$$\frac{\min_{k=1, n} \|\mathbf{e}^k\|}{\max_{k=1, n} \|\mathbf{e}^k\|} < \xi_3, \quad \frac{\det[\mathbf{e}]}{\prod_k \|\mathbf{e}^k\|} < \xi_4 \quad (4-40)$$

onde \mathbf{e} é a matriz das arestas que passam pelo vértice de pior valor.

Além dos testes de convergência propostos na literatura, foi implementado um teste que mimetiza as as condições de KKT baseada no compor-

tamento do candidato a mínimo durante um intervalo de iterações. Caso o vértice de menor valor para a função objetivo sofra poucas oscilações nesse intervalo, será considerado que o ponto está em um região de curvatura nula, o que satisfaria as condições de KKT, sendo, portanto, um mínimo local.

O fluxograma na Figura 4.7 resume a sequência de testes de convergência e reinícios necessários a cada iteração.

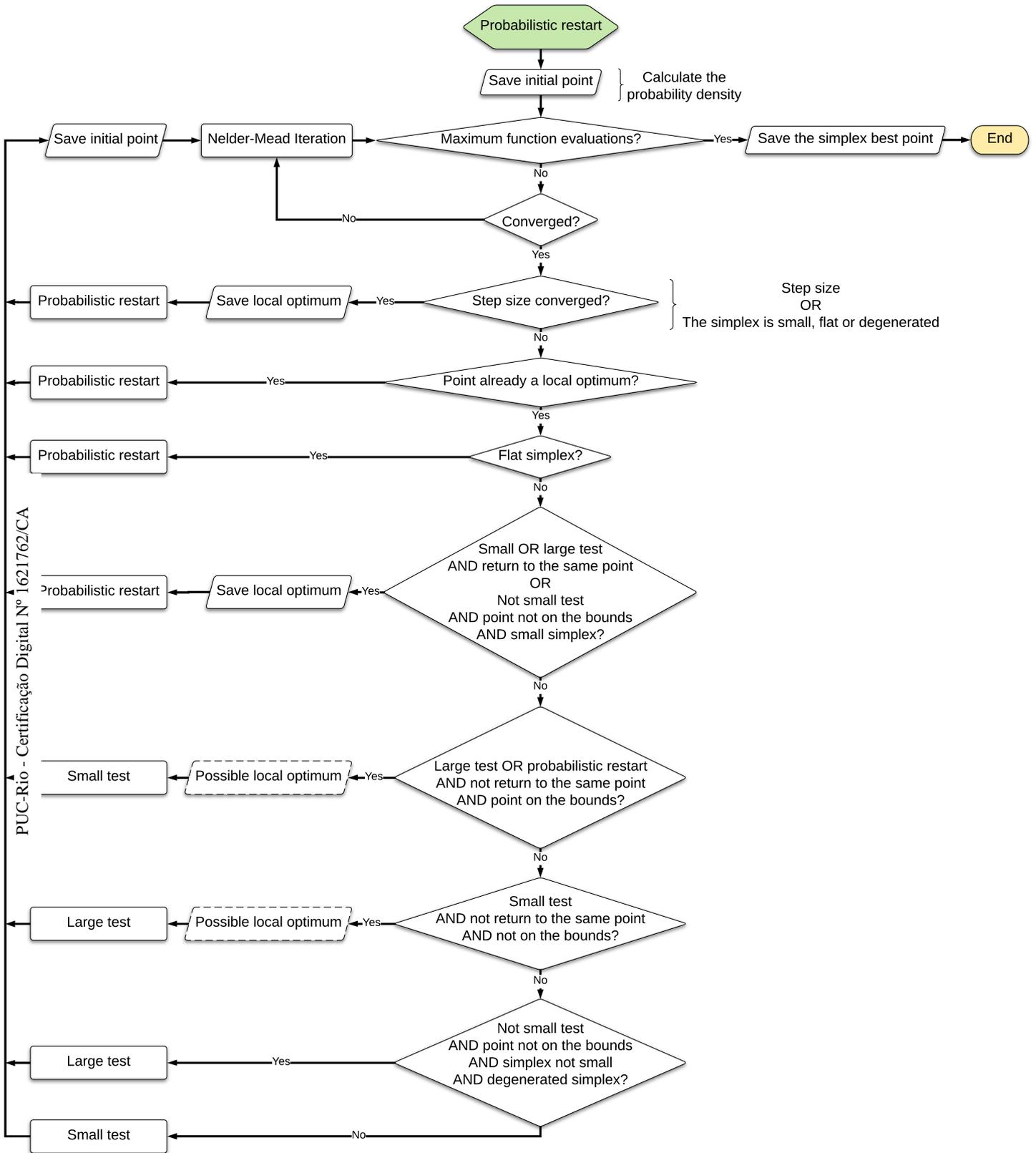


Figura 4.7: Fluxograma do método *Globalized Bounded Nelder-Mead*

5

Implementação da ferramenta de otimização

Neste capítulo são feitas considerações acerca da implementação da ferramenta de otimização, algoritmos de otimização considerados, valores de parâmetros e estratégias computacionais.

Conforme as premissas apresentadas na seção 4.3, o método GBNM é adotado como o algoritmo de otimização da ferramenta, no entanto, foi mantida a possibilidade de implementação de outros algoritmos. Por se tratar de uma alternativa popular e já estudada na otimização de *risers*, um algoritmo genético também foi desenvolvido, permitindo através da comparação avaliar o desempenho do GBNM.

5.1

Parâmetros do algoritmo GBNM

Considera-se que um *simplex* gerado aleatoriamente pode assumir tamanho a (Eq. 4-26) entre 5% e 10% da menor extensão de dimensão. Considera-se que a extensão de determinada dimensão consiste na diferença entre seus limites superior e inferior. Estes limites também indicam o tamanho dos *simplex* gerados para o teste pequeno e grande, respectivamente.

Os coeficientes ligados às quatro operações possíveis para cada iteração (Eq. 4-32) receberam valores considerados padrão[67]:

$$\alpha = 1,0, \quad \beta = 0,5, \quad \gamma = 2,0, \quad \delta = 0,5 \quad (5-1)$$

O valor escolhido para o parâmetro de extensão α_g (Eq. 4-37) é de 0,01, cobrindo 20% do domínio caso esteja a um desvio padrão distante do valor médio da gaussiana [62].

Para a determinação do máximo custo computacional limitou-se em 120 avaliações da função objetivo por reinício, ou 150 caso haja violação de restrições em até 3% ($g_{max} \leq 0,03$). Foi realizada uma análise de sensibilidade através da variação do número de reinícios e comparação da melhora obtida no valor da solução. Observou-se que a partir de 20 reinícios não há melhora significativa que justifique aumento do custo computacional, portanto esse valor é adotado. Ressalta-se que esse valor pode ser modificado dependendo das características do problema a ser solucionado.

A penalização de soluções com violação de restrições é feita através do método do Lagrangeano aumentado com parâmetros iniciais com magnitude similar a da solução estimada do problema, $\lambda = 1000$ e $\mu = 1000$. Considerou-se que os parâmetros são atualizados sempre que houver convergência com restrições ainda ativas.

5.2

Parâmetros do algoritmo GA

Considera-se que a população é constituída por 200 indivíduos cujos genes são representados pelos valores normalizados das variáveis de projeto, o que viabiliza as operações de cruzamento e mutação pois os genes sempre terão valores entre 0 e 1.

A operação de seleção é feita pelo mecanismo de Torneio. Em um torneio, indivíduos são selecionados aleatoriamente e o mais apto entre estes é declarado o vencedor. Torneios são realizados sucessivamente até que se obtenha uma nova população intermediária composta apenas pelos vencedores [68]. Observa-se que é possível que um mesmo indivíduo vença mais de um torneio, sendo replicado na população. Nesta implementação cada torneio é realizado entre três indivíduos selecionados aleatoriamente na população original.

Para cada dois indivíduos da população intermediária é aplicada uma probabilidade de cruzamento de 80%, com cruzamento em dois pontos entre os genes (Figura 5.1). A probabilidade de que uma prole sofra mutação é de 10%, sendo que o valor a ser adicionado a cada gene é gerado baseado em uma distribuição gaussiana de média 0.

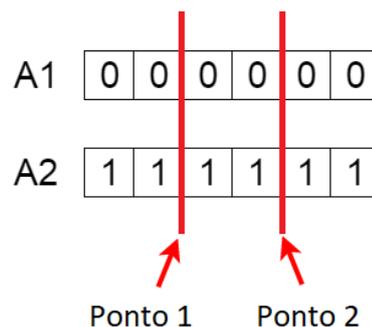


Figura 5.1: Exemplo de cruzamento em dois pontos

A nova população é formada pelas proles geradas e completada pelos indivíduos mais aptos da população intermediária. O critério de parada é baseado no desvio padrão do valor da aptidão populacional, que deve ser menor que 1, ou após 35 gerações sem atingir convergência.

Para a função de aptidão aplica-se o método do Lagrangeano aumentado sobre a função objetivo com os mesmo parâmetros que os adotados para o GBNM ($\lambda = 1000$ e $\mu = 1000$).

5.3

Implementação computacional

Os algoritmos foram implementado em *Python*, que é uma linguagem de programação popular sem necessidade de licenças e que possui suporte a bibliotecas científicas robustas. A implementação dos processos do algoritmo genético foi feita com auxílio da biblioteca DEAP (*Distributed Evolutionary Algorithms in Python*) [69].

Para analisar o comportamento dinâmico dos *risers* foi utilizado o *software* OrcaFlex, que é o pacote mais utilizado da indústria para análises não-lineares estáticas e dinâmicas de estruturas *offshore* nos domínios do tempo e da frequência. O OrcaFlex dispõe de uma API (*Application Programming Interface*) com suporte a *Python*, que permite rápida importação e exportação de dados.

Em operações que demandam elevados recursos computacionais, com repetição de procedimentos, é essencial o emprego de técnicas de computação paralela de modo a evitar tempo excessivo para conclusão das mesmas. Problemas de otimização em engenharia fazem parte desses casos, portanto foi necessário desenvolver um modelo de paralelização para o algoritmo adotado.

A computação paralela se caracteriza por executar vários processos de forma simultânea, dividindo o problema principal em subtarefas menores. Um dos modelos de comunicação mais populares, e usado neste trabalho, baseia-se no conceito Líder-Liderado¹. Um dos nós disponíveis assume a função de Líder, que gera todas as subtarefas a serem executadas pelos demais nós (Liderados) e as recebe concluídas. Dessa forma, os Liderados são responsáveis pelas tarefas de maior esforço computacional. Outra característica do modelo é que os Liderados não se comunicam entre si, se comunicando apenas com o Líder. Isso permite processos assíncronos, evitando nós ociosos.

5.4

Desenho da ferramenta e processos

O Líder recebe um *pool* de tarefas na forma de número máximo de reinícios, estipulado pelo usuário, e solicita aos Liderados que cada um gere

¹Tradicionalmente conhecido como *Master-Slave*. Esta terminologia está em desuso por diversas empresas e comunidades de desenvolvedores, como IBM, Microsoft e Amazon, devido à conotação negativa histórica. O autor optou por aderir a uma terminologia alternativa para estar em linha com a bibliografia mais recente sobre o tema

um simplex inicial. Concluída essa tarefa, o Liderado envia ao Líder o ponto que originou o simplex e retoma a otimização local. Obtendo convergência, o Liderado informa ao Líder o candidato a mínimo encontrado e solicita uma nova tarefa. Essa sequência é repetida até que o Líder tenha esgotado o *pool* de tarefas.

Os pontos de origem dos simplex iniciais e os candidatos a mínimo são mantidos em uma memória pelo Líder de modo a alimentar a função de probabilidade para geração de novos pontos (Eq. 4-35). Após a conclusão de todas as tarefas pelos Liderados, o Líder ordena os resultados obtidos e retorna com o candidato a mínimo global. As Figuras 5.2 e 5.3 ilustram os processos efetuados pela ferramenta.

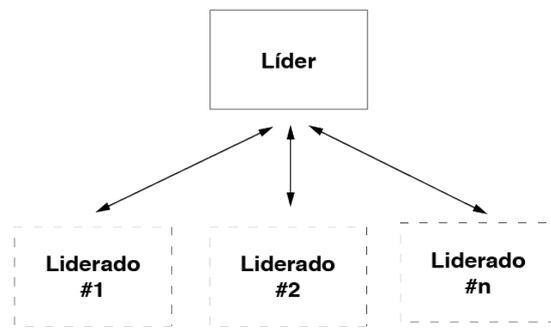


Figura 5.2: Ilustração do modelo de comunicação Líder-Liderado

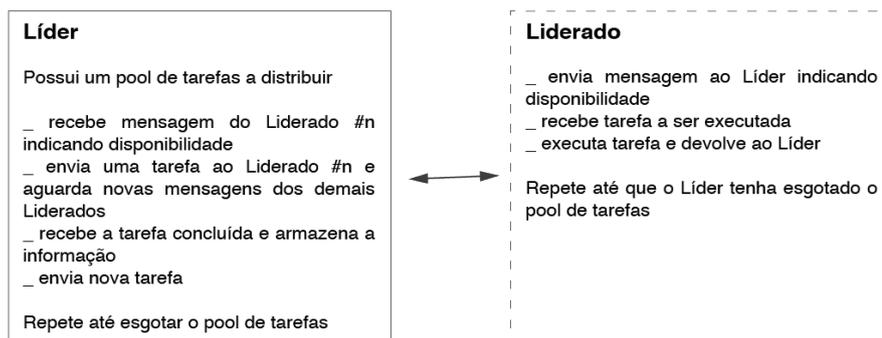


Figura 5.3: Resumo das tarefas executadas pelo líder e liderados

5.5

Função objetivo

Atendidos os critérios e restrições estruturais (Equação 3-10), é desejável que o projeto tenha o menor custo possível. Isso deve ser incorporado à função objetivo, norteadando a solução do problema de otimização. Os custos associados a uma configuração de *riser* são difíceis de se mensurar, uma vez que diversas atividades são impactadas, tais como aquisição de material, logística, instalação e outras mais. Uma forma simplificada é minimizar a quantidade de material necessário em cada solução candidata, contribuindo indiretamente para a economia global do projeto.

Portanto, a função objetivo neste trabalho é representada pelo comprimento total do *riser*. O comprimento total de cada solução candidata é normalizado, sendo a função objetivo representada matematicamente como:

$$L_{tot} = \sum_{i=1}^n L_i \quad (5-2)$$

$$f_{obj} = \frac{L_{tot} - L_{tot_{min}}}{L_{tot_{max}} - L_{tot_{min}}} \quad (5-3)$$

onde n representa o número de seções nas quais o *riser* está dividido.

Sobre a função objetivo é necessário aplicar a função Lagrangeana aumentada para um problema com restrições de desigualdade, apresentada anteriormente (Eq. 4-24), de modo a atender às restrições impostas.

Ressalta-se que outra função objetivo poderia ter sido contemplada, não sendo necessário limitar-se ao comprimento do *riser*. Trata-se de um objetivo capaz de exemplificar de forma abrangente o funcionamento da ferramenta.

6

Estudos de caso

Para avaliar a eficácia da ferramenta proposta, são estudados três casos diferentes, compreendendo cenários tipicamente encontrados na fase inicial de projeto de *risers*. Por refletir a solução preferencial da indústria, dois casos adotam um *riser* com distribuição de flutuadores em sua porção intermediária, instalados em águas ultraprofundas (Caso 1) e profundas (Caso 2), cenários tipicamente encontrados na costa brasileira. O terceiro caso é baseado em um *riser* em catenária com amortecedores hidrodinâmicos (RCHA) instalado na mesma profundidade que a do Caso 1, representando uma alternativa de menor complexidade. Por se tratar de uma configuração ainda em desenvolvimento, os resultados obtidos neste trabalho também contribuem como uma avaliação de viabilidade.

Em todos os casos o *riser* é considerado em condição de operação, escoando óleo com grau API 27,4 (890 kg/m³), que é o grau médio do petróleo produzido no Brasil [70], a 100°C. O *riser* é composto por dutos de aço carbono API 5L X65, sem costura, com revestimento interno anti-corrosão, cujas propriedades básicas estão disponíveis na Tabela 6.1. Também é aplicada uma camada de 70 mm de revestimento térmico externo com densidade 740 kg/m³. As propriedades requeridas para o cálculo do fator CLC de integridade estrutural, de acordo com a norma DNVGL-ST-F201, são apresentadas na Tabela 6.2.

Tabela 6.1: Propriedades do duto de aço API 5L X65

Diâmetro interno	165 mm
Diâmetro externo	212 mm
Módulo de Young	207 GPa
Peso específico	7728 kg/m ³
SMYS	450 MPa
SMTS	530 MPa

As condições ambientais são representadas através de ondas e corrente. A corrente apresenta perfil de velocidade triangular com velocidade máxima, na superfície, de 1,15 m/s. Uma função harmônica (Tabela 6.3) é aplicada na extremidade de topo do *riser*, representando os deslocamentos impostos pela unidade de produção sobre o *riser* devido às ondas (Figura 6.1). O tempo

Tabela 6.2: Propriedades para uso da norma DNVGL-ST-F201

Categoria do fluido	B
Classe de localização	2
Classe de segurança	Normal
Espessura de corrosão	0 mm
Tensão de escoamento característica (f_y)	420 MPa
Tensão de ruptura característica (f_u)	500 MPa
Ovalização	1,5%
Fator de carregamento funcional (γ_f)	1,1 (ULS)
Fator de carregamento ambiental (γ_e)	1,3 (ULS)
Fator da classe de segurança do material (γ_{SC})	1,14 (Normal)
Fator de resistência do material (γ_m)	1,15 (ULS)
Fator de fabricação do material (α_{fab})	1 (sem costura)

de simulação é equivalente a dois períodos de onda (24,82s) e rampa (*build-up*) de uma onda, totalizando três períodos de onda (37,23s). Observa-se que a amplitude dos movimentos é elevada, o que corresponde a condições ambientais severas.

Tabela 6.3: Deslocamentos na extremidade de topo do *riser*

Movimento	Amplitude	Período (s)	Fase (°)
<i>Surge</i>	0,81 m	12,41	53,73
<i>Sway</i>	2,97 m	12,41	70,12
<i>Heave</i>	8,97 m	12,41	321,04
<i>Roll</i>	5,51°C	12,41	287,88
<i>Pitch</i>	1,01°C	12,41	257,78
<i>Yaw</i>	0,85°C	12,41	177,44

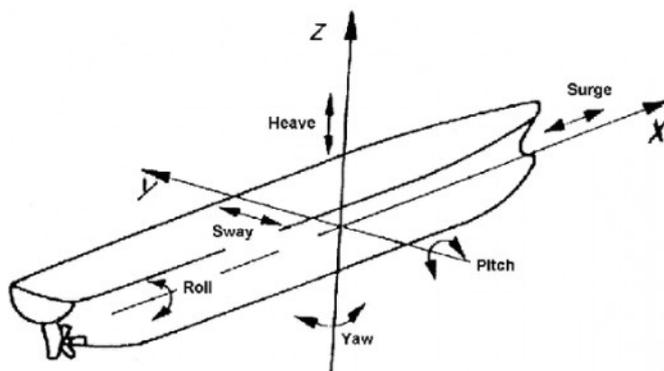


Figura 6.1: Definição dos movimentos de uma embarcação - Retirado de [20]

Em todos os casos estudados o comprimento do *riser* pode ser variado, enquanto que a projeção horizontal até o ponto de âncora é tida como fixa e igual a 2930m.

A resolução dos problemas propostos é feita utilizando os algoritmos GBNM e GA, desenvolvidos para a ferramenta, permitindo avaliar as premissas sobre o desempenho do GBNM. Também é adotado o MIDACO (*Mixed Integer Distributed Ant Colony Optimization*) [71], um *software* de otimização de alta performance, comercial, baseado no método de colônia de formigas. Trata-se de um programa robusto, desenvolvido há mais de 10 anos e utilizado por empresas de engenharia aeroespacial, o que permite avaliar destaques e pontos de melhoria da ferramenta desenvolvida. O principal critério de comparação entre os algoritmos, além da solução obtida, é o número de avaliações da função objetivo, que não sofre alterações em função dos recursos computacionais à disposição, fator que gera influência considerável sobre o tempo total necessário.

6.1

Riser com flutuadores

O problema é representado de forma similar à feita por [21] e outros trabalhos, com seis variáveis de projeto conforme representado na Figura 6.2: o comprimento do trecho superior (L_1), o comprimento do trecho com flutuadores (L_2), o comprimento do trecho inferior (L_3), o comprimento (L_F) e diâmetro (D_F) de cada flutuador, e o espaçamento entre eles (Esp).

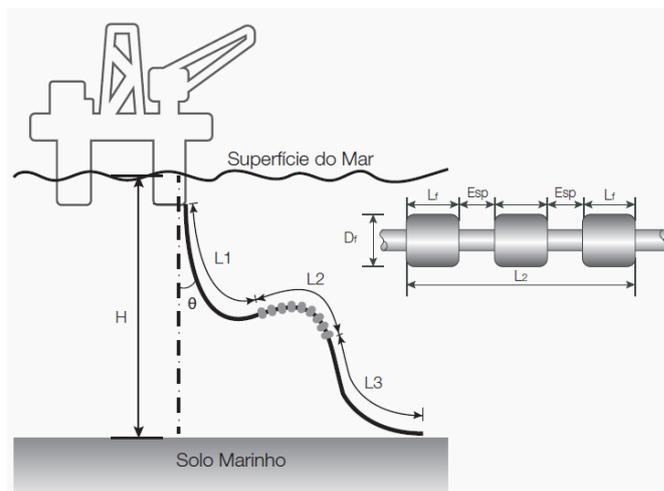


Figura 6.2: Representação do problema de otimização de *riser* com flutuadores - Adaptado de [21]

O peso específico dos flutuadores é de 750 kg/m^3 , e é permitido que o diâmetro dos flutuadores assuma o mesmo valor que seu diâmetro interno e/ou que seu comprimento seja nulo, de tal modo que as propriedades dos flutuadores sejam negligenciáveis. Essa possibilidade de representação do problema permite que sejam obtidas soluções SCR, no caso de flutuadores com proprie-

dades negligenciáveis, e SLWR, se a ação dos flutuadores levar à formação de corcova na porção intermediária do *riser*.

O primeiro estudo de caso aplica o problema apresentado num campo de águas ultraprofundas, com lâmina d'água de 2150m, como encontrado nas regiões de pré-sal da costa brasileira. O segundo estudo de caso é realizado num campo de 1200m de profundidade, faixa tipicamente encontrada em campos de águas profundas.

Em ambos os cenários serão mantidos os mesmos limites mínimo e máximo que cada variável de projeto pode assumir, apresentados na Tabela 6.4. Essa opção, por ampliar o domínio do problema, aumenta o número de soluções possíveis e também o de soluções que não apresentam convergência na análise dinâmica.

Tabela 6.4: Limites das variáveis de projeto para o problema de *riser* com flutuadores

Variável	Mínimo	Máximo
L_1 (m)	700	3000
L_2 (m)	300	1600
L_3 (m)	700	3000
D_F (m)	0,375	2,000
L_F (m)	0	2
Esp (m)	1	3

Nos casos 1 e 2, as restrições adotadas são o critério de carregamento combinado (CLC) e o ângulo de topo do *riser*, que pode assumir valores entre 5° e 20° .

6.1.1

Caso 1 - LDA 2150m

A Tabela 6.5 apresenta os resultados obtidos para os três algoritmos, com a solução, valores das variáveis, total de avaliações da função objetivo, e valores máximos do critério de carregamento combinado e do ângulo de topo, que são as restrições mais ativas. As Figuras 6.3, 6.4 e 6.5 ilustram a linha elástica dos *risers* obtidos com cada algoritmo.

As três soluções obtidas apresentam configuração *lazy wave*, o que é esperado para um cenário de elevada lâmina d'água e alta amplitude de movimento vertical (*heave*) no topo do *riser*. Observa-se, através das Figuras 6.6 e 6.7, que as soluções não apresentam esforços muito elevados, sendo a seção com flutuadores capaz de preservar a estrutura.

A solução obtida com o GA demanda um número de avaliações da função objetivo muito superior aos demais algoritmos e ainda assim apresenta violação

Tabela 6.5: Resultados da otimização do Caso 1

Variável	GBNM	GA	Midaco
L_1 (m)	1806,61	1584,28	2268,00
L_2 (m)	554,03	1358,29	711,36
L_3 (m)	1791,41	1102,85	1033,15
D_F (m)	1,96	1,69	1,38
L_F (m)	1,30	0,59	1,56
Esp (m)	2,97	1,84	1,80
Comp. total (m)	4152,06	4045,42	4012,51
Avaliações	1104	4004	310
CLC	0,36	0,37	0,60
Ângulo de topo (°)	18,55	20,42	19,96

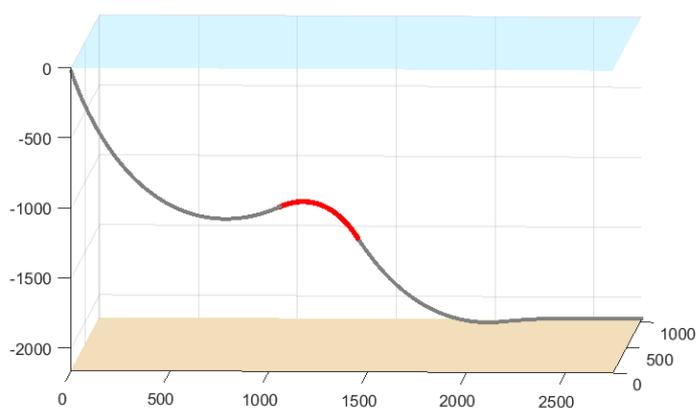


Figura 6.3: Linha elástica da solução estática obtida com GBNM para o Caso 1

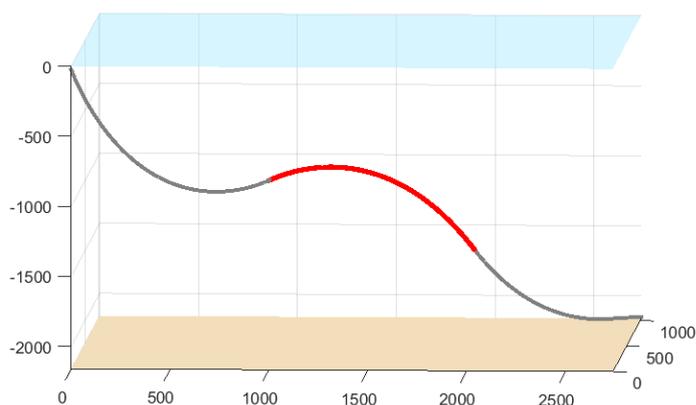


Figura 6.4: Linha elástica da solução estática obtida com GA para o Caso 1

do máximo ângulo de topo, sendo pouco eficiente na resolução deste problema. A solução do GBNM não apresenta violação de restrições, porém é 3,5% maior que a do Midaco e exigiu um número consideravelmente superior de avaliações da função objetivo. Verificou-se que cerca de 25% das avaliações (274) foram

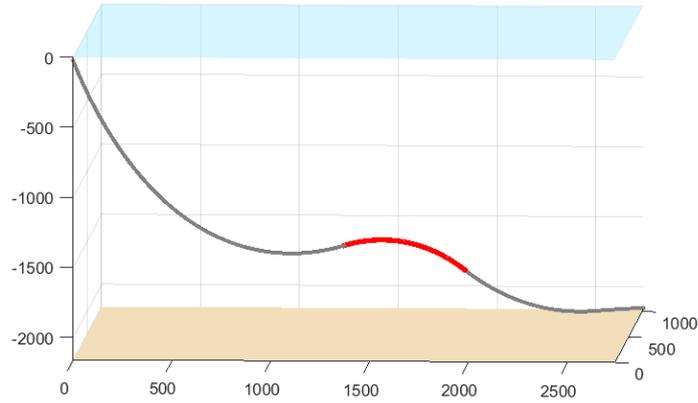


Figura 6.5: Linha elástica da solução estática obtida com Midaco para o Caso 1

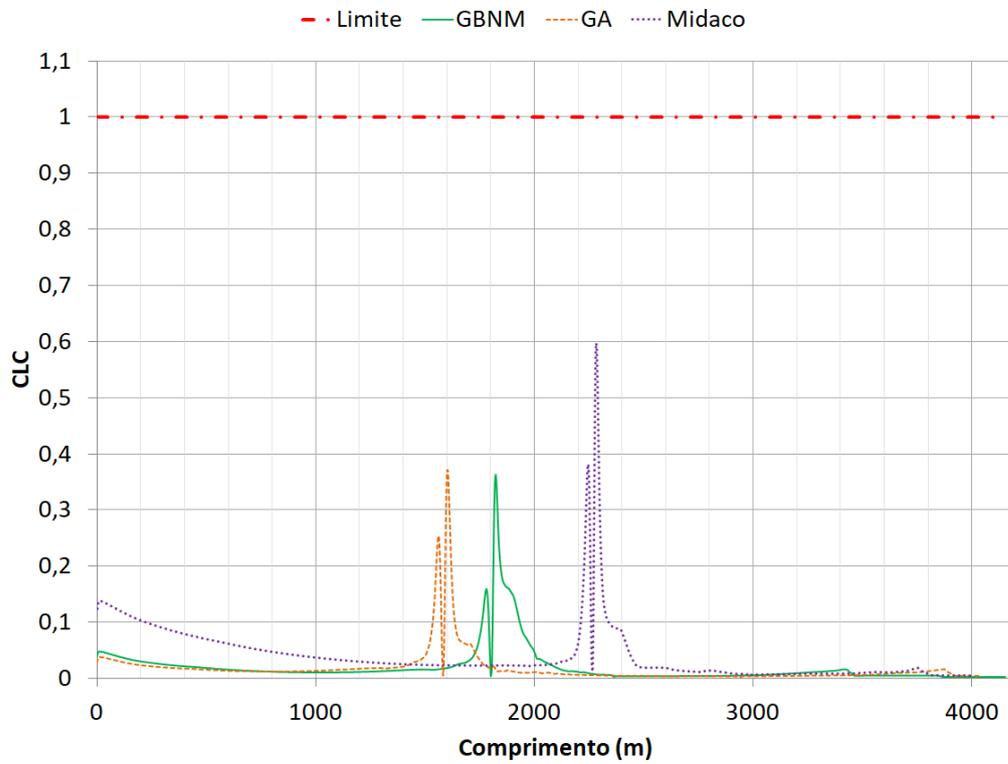


Figura 6.6: Critério de carregamento combinado ao longo do *riser* para o Caso 1

realizadas durante a geração do ponto inicial do *simplex* e que muitos pontos foram gerados em regiões distantes dos mínimos locais ou dominadas por violações excessivas das restrições, exigindo um número maior de iterações.

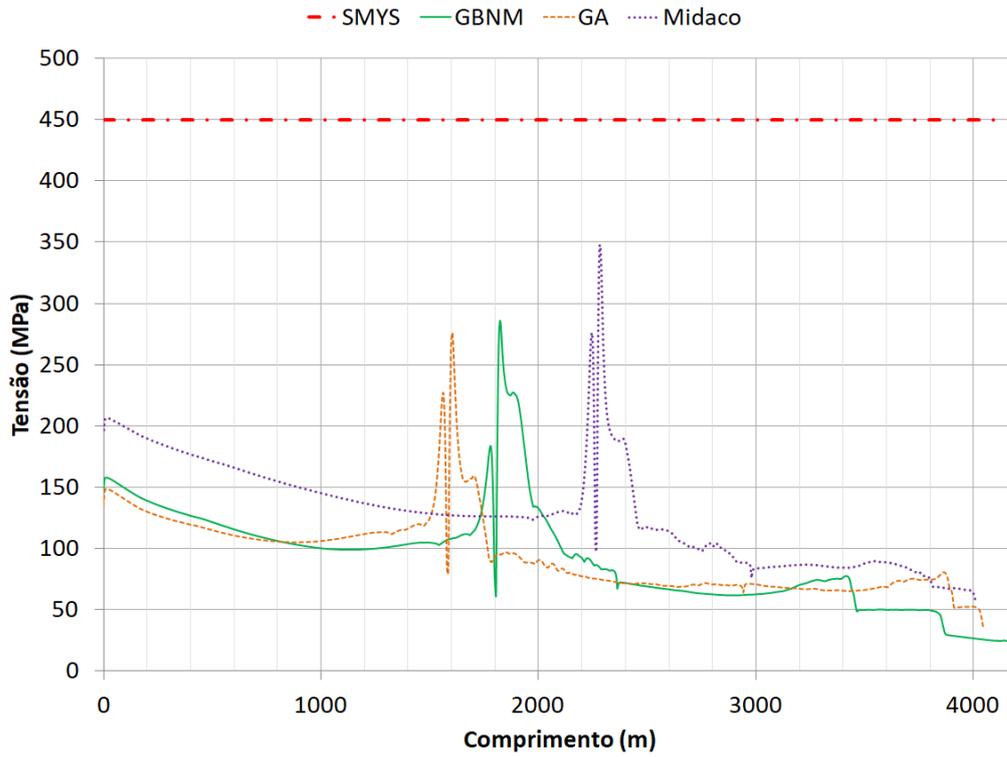


Figura 6.7: Tensão de von Mises ao longo do *riser* para o Caso 1

6.1.2

Caso 2 - LDA 1200m

A Tabela 6.6 apresenta os resultados obtidos para os três algoritmos, com a solução, valores das variáveis, total de avaliações da função objetivo, e valores máximos do critério de carregamento combinado e do ângulo de topo, que são as restrições mais ativas. As Figuras 6.8, 6.9 e 6.10 ilustram a linha elástica dos *risers* obtidos com cada algoritmo.

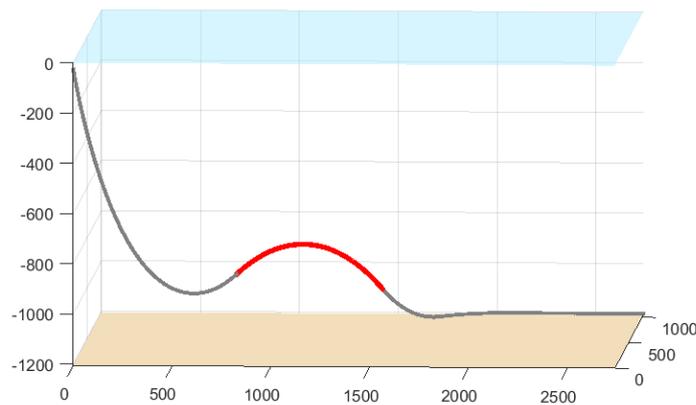


Figura 6.8: Linha elástica da solução estática obtida com GBNM para o Caso 2

Tabela 6.6: Resultados da otimização do Caso 2

Variável	GBNM	GA	Midaco
L_1 (m)	1467,45	1713,36	854,39
L_2 (m)	857,81	513,36	1503,66
L_3 (m)	1374,65	1446,25	1291,66
D_F (m)	1,25	1,50	1,55
L_F (m)	1,97	0,91	0,34
Esp (m)	2,99	1,56	1,47
Comp. (m)	3699,91	3672,97	3649,71
Avaliações	1569	3844	280
CLC	0,26	0,22	1,05
Ângulo de topo (°)	18,15	20,54	11,80

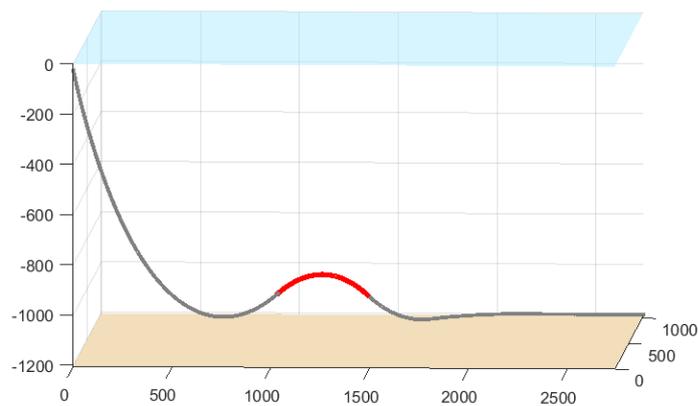


Figura 6.9: Linha elástica da solução estática obtida com GA para o Caso 2

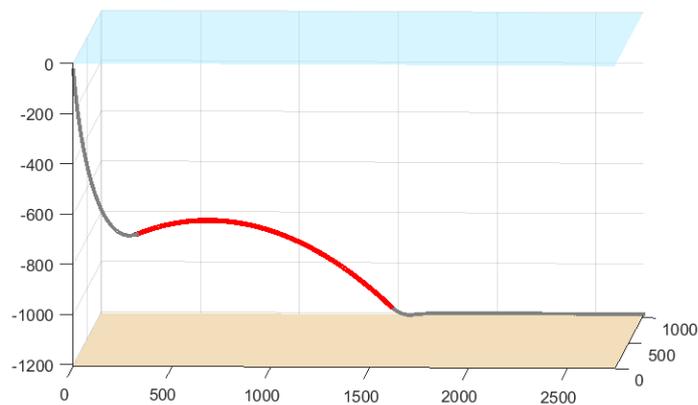


Figura 6.10: Linha elástica da solução estática obtida com Midaco para o Caso 2

Assim como no Caso 1, as três soluções apresentam configuração *lazy wave*. Em função da lâmina d'água menor, era esperado que as soluções apresentassem configuração em catenária, uma vez que o menor comprimento suspenso induz menos esforços do que em profundidades maiores. No entanto,

o movimento prescrito na extremidade de topo do *riser* leva a tensões elevadas no TDP, sendo necessário o trecho com flutuadores.

O comprimento extenso com flutuadores na solução obtida com o Midaco induz um empuxo muito elevado levando a uma curvatura muito alta na região do *sag bend*. Através das Figuras 6.11 e 6.12 é possível notar um pico de tensão na mesma região, violando a restrição estrutural e levando à plastificação do duto já que o limite de escoamento (SMYS) é ultrapassado. Embora a solução do GA mantenha a estrutura íntegra, apresenta violação da restrição do ângulo de topo, além de novamente exigir um número muito elevado de avaliações da função objetivo.

A solução encontrada pelo GBNM revela-se a mais adequada, com comprimento similar às demais porém sem violação de restrições e bom comportamento estrutural. Nota-se, no entanto, comportamento similar ao Caso 1 em relação aos pontos iniciais dos *simplex*, usando 26% das avaliações (408) nesta fase. Além disso, a distância média entre o pontos iniciais e respectivos mínimos locais aumentou em relação ao Caso 1, exigindo iterações extras.

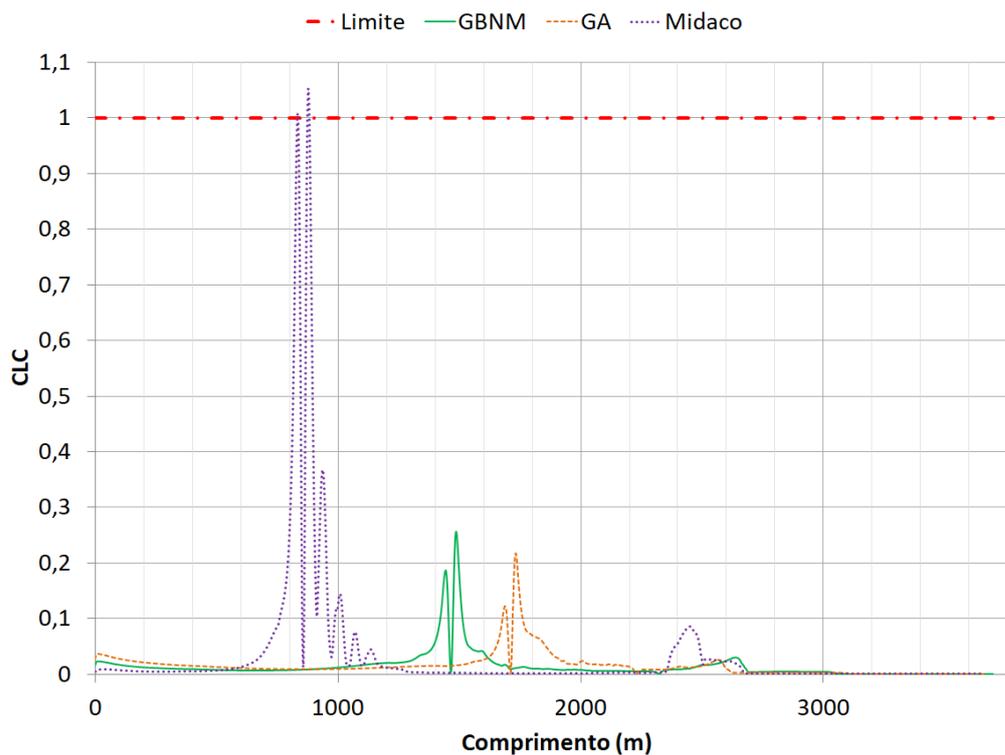


Figura 6.11: Critério de carregamento combinado ao longo do *riser* para o Caso 2

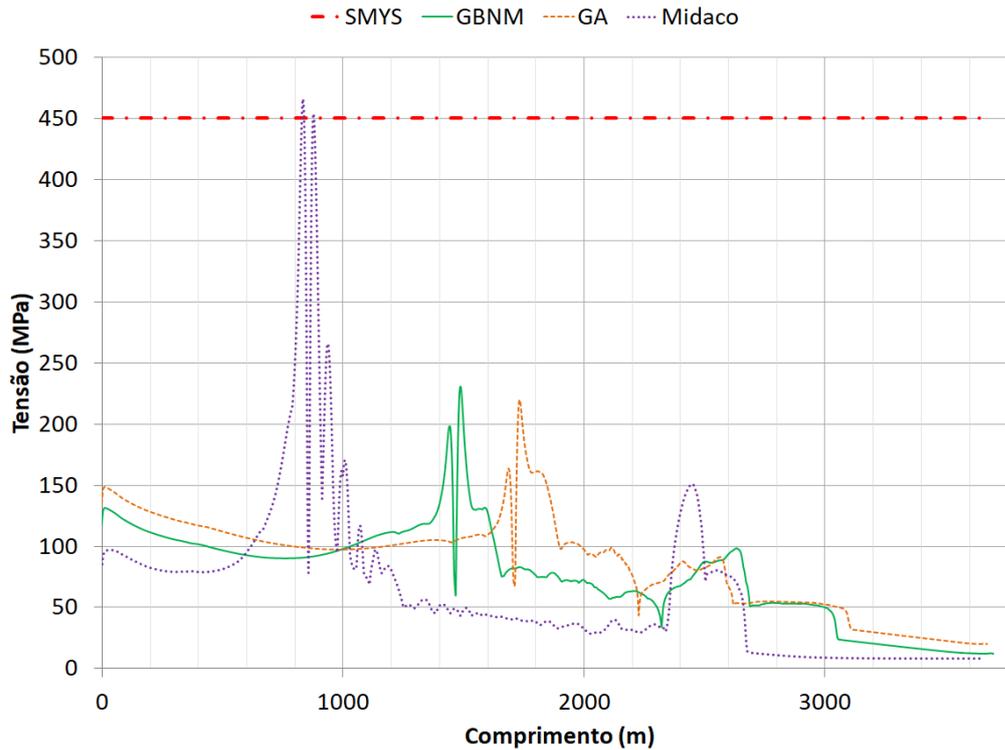


Figura 6.12: Tensão de von Mises ao longo do *riser* para o Caso 2

6.2

Riser em catenária com amortecedores hidrodinâmicos

O problema abordado nesta seção se trata do Caso 3, onde um *riser* em configuração RCHA é instalado em lâmina d'água de 2150m. A representação do problema é feita através de um *riser* subdividido em onze seguimentos, sendo cinco com um revestimento adicional com material de baixa densidade, os amortecedores hidrodinâmicos. As variáveis do problema de otimização são os comprimentos das seções com amortecedores (L2, L4, L6, L8 e L10), os comprimentos das seções de espaçamento entre amortecedores (L3, L5, L7 e L9), e os comprimentos das seções de topo (L1) e de fundo (L11). A Figura 6.13 ilustra o problema e os limites das variáveis estão apresentados na Tabela 6.7.

Além da restrição de integridade estrutural, considera-se que ângulo de topo do *riser* pode assumir valores entre 5° e 20° . É incluída, também, uma restrição operacional visando impedir que algum amortecedor encoste no solo, portanto a altura mínima entre qualquer amortecedor e o solo é de 10 m.

Os resultados obtidos para os três algoritmos são apresentados na Tabela 6.8, com a solução, valores das variáveis, total de avaliações da função objetivo, e valores máximos do critério de carregamento combinado e do ângulo de topo, que são as restrições mais ativas. As Figuras 6.14, 6.15 e 6.16 ilustram a linha

Tabela 6.7: Limites das variáveis de projeto para o problema de *riser* em catenária com amortecedores hidrodinâmicos

Variável	Mínimo	Máximo
L_1 (m)	1000	2050
L_2 (m)	12	240
L_3 (m)	12	240
L_4 (m)	12	240
L_5 (m)	12	240
L_6 (m)	12	240
L_7 (m)	12	240
L_8 (m)	12	240
L_9 (m)	12	240
L_{10} (m)	12	240
L_{11} (m)	1000	2050

elástica dos *risers* obtidos com cada algoritmo.

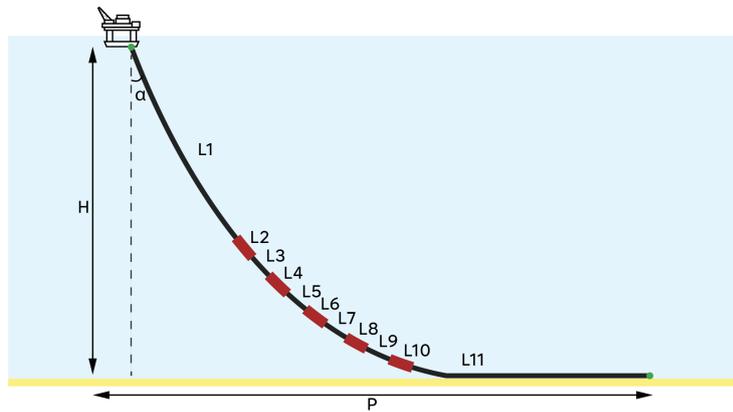


Figura 6.13: Representação do problema de otimização de *riser* em catenária com amortecedores hidrodinâmicos

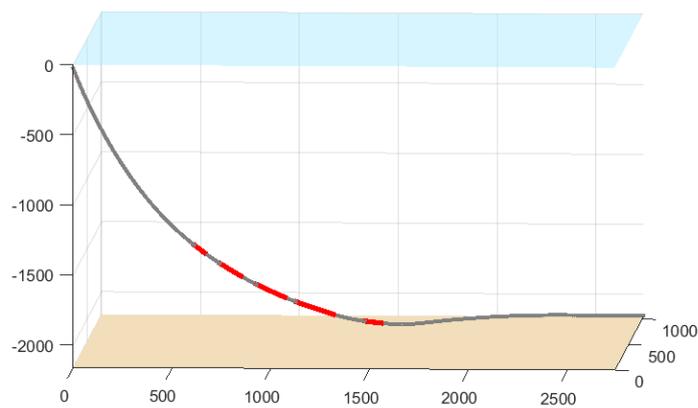


Figura 6.14: Linha elástica da solução estática obtida com GBNM para o Caso 3

Tabela 6.8: Resultados da otimização do Caso 3

Variável	GBNM	GA	Midaco
L_1 (m)	1527,31	1293,94	1261,51
L_2 (m)	82,92	71,61	55,40
L_3 (m)	122,19	173,05	130,41
L_4 (m)	157,43	144,81	153,53
L_5 (m)	110,81	150,89	22,64
L_6 (m)	188,84	211,61	92,62
L_7 (m)	71,99	62,5	116,61
L_8 (m)	234,64	193,7	151,46
L_9 (m)	181,77	68,91	137,20
L_{10} (m)	91,08	157,09	234,61
L_{11} (m)	1344,30	1640,9	1782,47
Comp. (m)	4113,28	4169,01	4138,46
Avaliações	2296	5958	1020
CLC	1,00	0,67	1,11
Ângulo de topo (°)	19,92	18,54	19,92

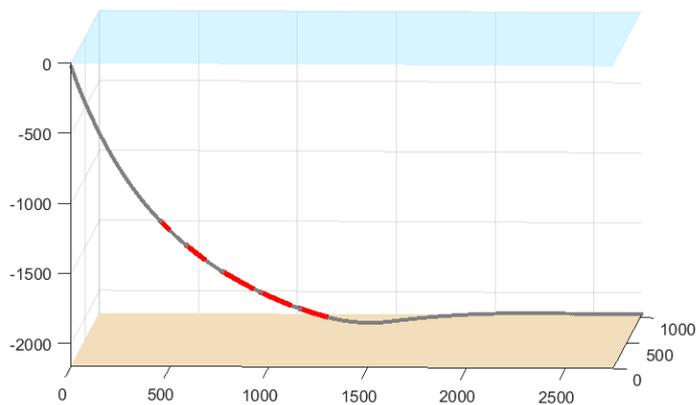


Figura 6.15: Linha elástica da solução estática obtida com GA para o Caso 3

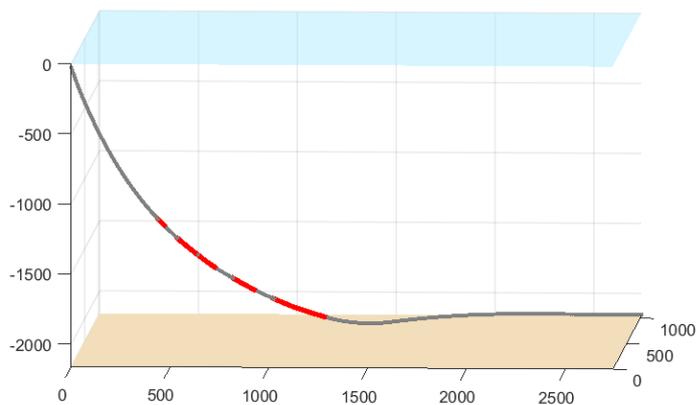


Figura 6.16: Linha elástica da solução estática obtida com Midaco para o Caso 3

A solução obtida pelo algoritmo GBNM possui o menor comprimento, chegando no limite da restrição estrutural e de ângulo de topo. A solução do Midaco se aproxima à do GBNM porém viola em 11% o critério de integridade estrutural, sendo inviável. Ao avaliar a distribuição de tensões ao longo do *riser* através das Figuras 6.17 e 6.18, observa-se seis picos de tensão, que correspondem aos cinco amortecedores e à região de TDP.

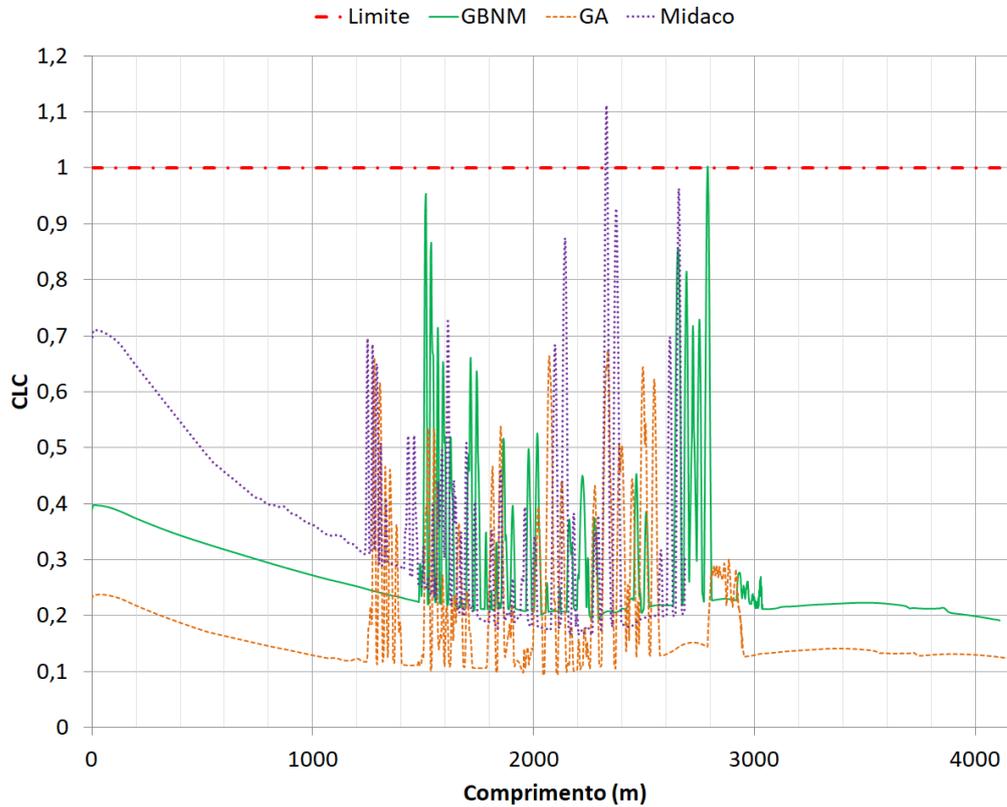


Figura 6.17: Critério de carregamento combinado ao longo do *riser* para o Caso 3

Observa-se que o desempenho do Midaco, apesar de ainda demandar menor número de avaliações, sofre considerável piora se comparado aos casos anteriores. Os demais algoritmos também necessitaram realizar mais avaliações, indicando que este é o problema de maior complexidade, fato provavelmente ligado ao maior número de variáveis de projeto. No entanto, o percentual de avaliações utilizadas pelo GBNM na geração dos pontos iniciais dos *simplex* é menor que nos demais casos, correspondendo a 15% (343 avaliações). Essa redução se deve aos limites das variáveis, definido de forma mais restrita que nos Casos 1 e 2, o que diminui a distância entre pontos iniciais e respectivos mínimos locais.

Através da linha elástica das soluções torna-se evidente a similaridade com configuração em catenária. Removendo os amortecedores, portanto trans-

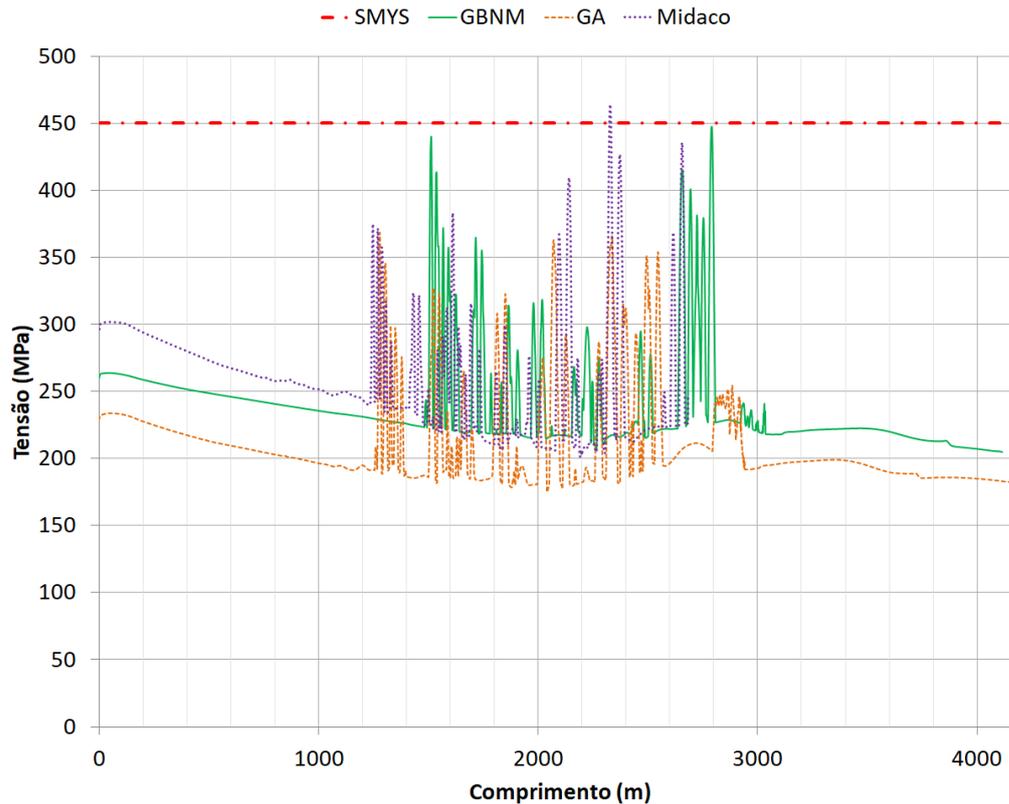


Figura 6.18: Tensão de von Mises ao longo do *riser* para o Caso 3

formando em um SCR, o comportamento estrutural resultante é totalmente diferente. Na Figura 6.19 é comparado o critério de carregamento combinado entre a solução do GBNM e a mesma sem os amortecedores, que é completamente inviável. O comportamento estrutural é tão afetado que a SCR apresenta picos de tensão tão altos (Figura 6.20) que o limite de ruptura do duto (SMTS) é facilmente ultrapassado.

Torna-se evidente que os amortecedores são capazes de atenuar as tensões no *riser* pois a estrutura é beneficiada mesmo quando o empuxo induzido é baixo se comparado a flutuadores. A solução desta configuração é estruturalmente viável, sendo necessário estudar as particularidades da instalação, que pode ser mais veloz e segura devido à simplicidade do conceito.

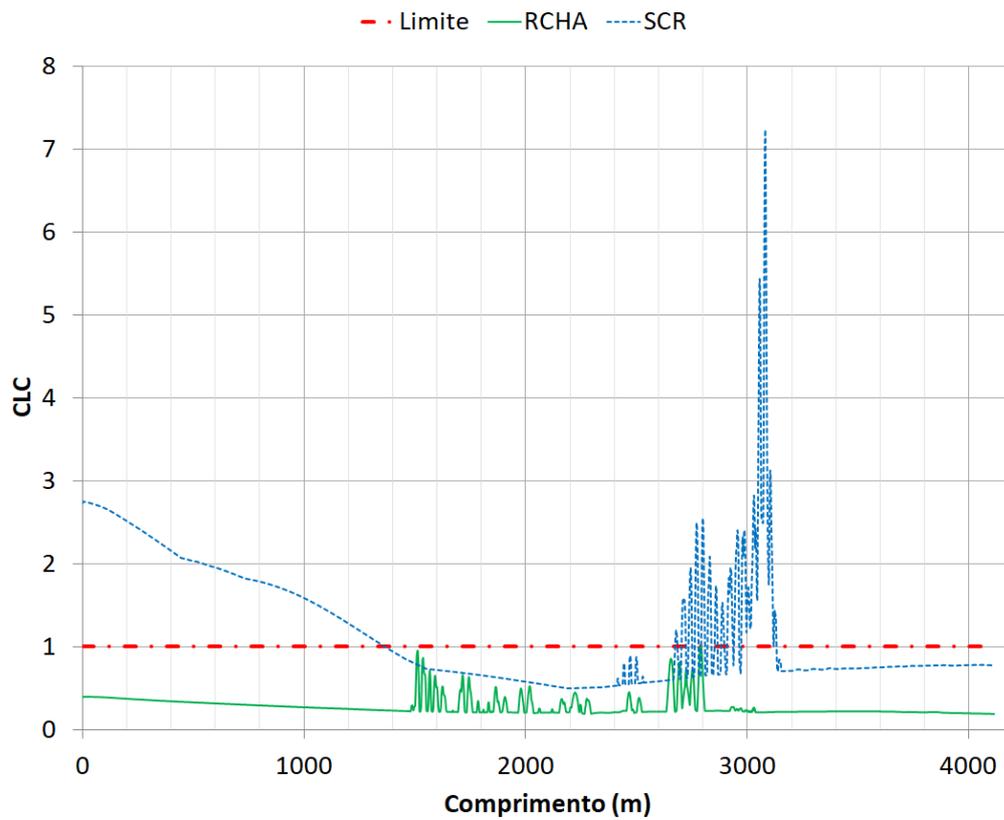


Figura 6.19: Comparação do critério de carregamento combinado ao longo do *riser* entre a configuração RCHA e um SCR equivalente

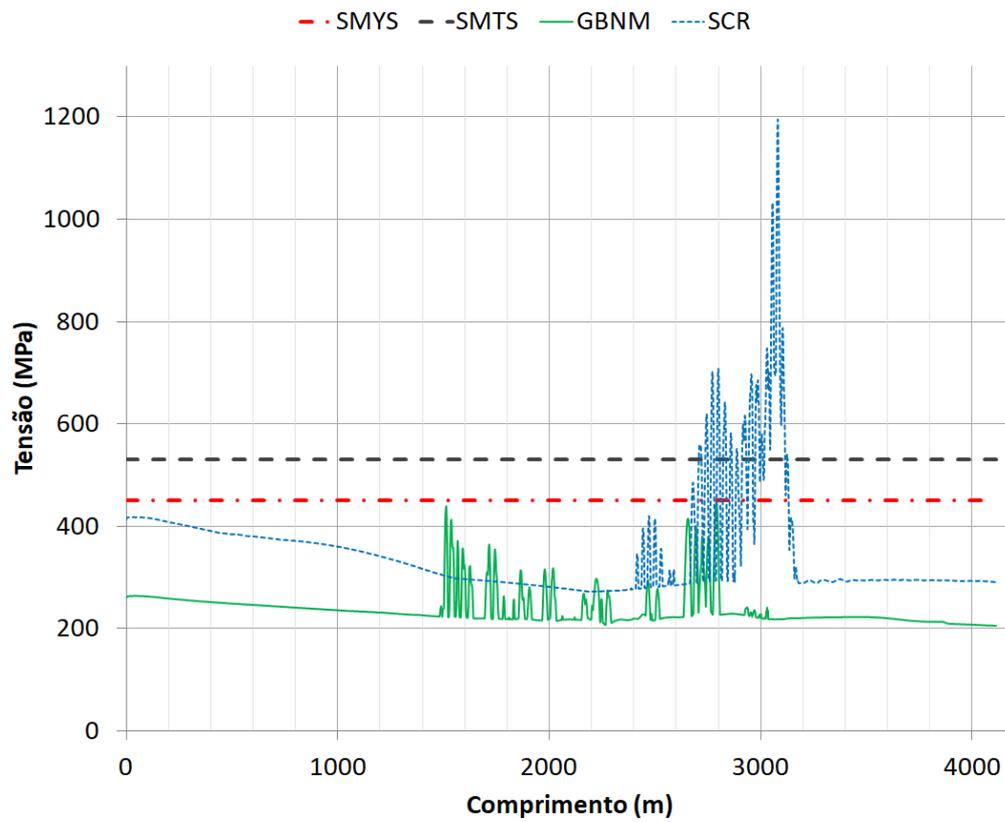


Figura 6.20: Comparação da tensão de von Mises ao longo do *riser* entre a configuração RCHA e um SCR equivalente

7

Conclusões

Este trabalho apresentou uma ferramenta para a resolução de problemas de otimização da configuração geométrica de *risers* baseada no método *Globalized Bounded Nelder-Mead*, considerando análises dinâmicas no domínio do tempo, obtidas através do programa Orcaflex. Os estudos de caso propostos sugerem que a ferramenta foi desenvolvida de forma satisfatória pois as soluções atendem às restrições de projeto e apresentam geometria e comportamento estrutural coerentes com os casos de carregamento impostos.

Reitera-se que a metodologia desenvolvida neste trabalho não representa, nem tem como objetivo, o dimensionamento completo de um *riser*. Para tanto, seria necessário análises mais detalhadas como fadiga, VIV, além dos dados obtidos da interface com as demais disciplinas envolvidas no projeto de um sistema de produção *offshore*. A aplicação é voltada para as fases iniciais de projeto e pode auxiliar os engenheiros a obter configurações base mais eficientes e com maior rapidez.

O GBNM foi capaz de resolver problemas de otimização com sucesso, apresentando resultados de boa qualidade e custo computacional satisfatório. Os resultados da seção 6.1.1, para um *riser* com flutuadores, indicam que a solução do GBNM tem o maior valor entre os 3 algoritmos considerados, com diferença de até 3,5%. No entanto, não apresenta violação de restrições como a solução obtida pelo algoritmo genético (GA), que demanda o quádruplo de avaliações da função objetivo. No segundo caso (seção 6.1.2), a solução do GBNM foi a única a não apresentar violação de restrições. No Caso 3, onde um *riser* com amortecedores hidrodinâmicos é colocado nas mesmas condições ambientais que as do Caso 1, o GBNM obteve a solução de menor comprimento, necessitando de metade das avaliações da outra solução viável (GA).

É relevante comentar que os resultados obtidos com o GA e o Midaco podem ser melhorados através de um estudo mais detalhado sobre os parâmetros disponíveis para cada um. Nesse sentido, é muito provável que o Midaco seja capaz de gerar soluções sem violação de restrição com desempenho computacional similar. No entanto, os resultados obtidos são capazes de ilustrar, comparativamente, o desempenho de cada algoritmo.

Ao comparar o desempenho da ferramenta com o de um pacote comercial

de otimização baseado no método de otimização por colônia de formigas (Midaco), percebe-se que a qualidade das soluções é similar, com configurações similares obtidas por ambos. Chama a atenção, no entanto, que a ferramenta baseada no GBNM exige número maior de avaliações da função objetivo. Esse maior número de avaliações se origina na forma como o método GBNM propõe as reinicializações do método local, gerando candidatos a ponto inicial do novo *simplex* de forma aleatória e sendo necessário gerar um espaço amostral para a minimização da função de janela gaussiana (Eq. 4-35). Estima-se, analisando os dados de convergência dos problemas avaliados, que entre 15% e 25% das avaliações da função objetivo foram feitas durante a geração do *simplex* inicial. O procedimento também pode levar à geração de pontos em regiões muito distantes dos mínimos locais, exigindo mais iterações, o que foi verificado na resolução dos Casos 1 e 2. De fato, a baixa eficiência do mecanismo de reinicialização proposto por Luersen & Le Riche [62] já foi observada em outros trabalhos. Ghiasi et al. [63] afirmam que a função de probabilidade original induz um custo computacional elevado, tem alta dependência do número de pontos testados para minimização da mesma e tende a desconsiderar algumas regiões domínio na escolha do ponto inicial. No mesmo trabalho os autores utilizam uma densidade de probabilidade diferente e obtêm resultados com menor custo computacional.

A escolha do método do Lagrangeano aumentado revelou-se acertada, permitindo obter resultados na fronteira das regiões viáveis, onde se encontram os mínimos dos problemas de otimização avaliados. Ressalta-se, também, que o GBNM não obteve soluções com violações, enquanto que o método de restrições adotado pelo Midaco não foi capaz de lidar com as restrições nos 2 últimos casos. É necessário, no entanto, realizar uma análise de sensibilidade para calibrar de forma mais assertiva a estimativa inicial dos multiplicadores de Lagrange (λ) e do parâmetro de penalidade (μ). Ao longo do desenvolvimento da ferramenta observou-se que para problemas com poucas restrições, valores iniciais com uma ordem de grandeza menor que a do valor esperado da solução obtêm boa convergência. Aumentando o número de restrições, valores iniciais ligeiramente maiores, na mesma ordem de grandeza da solução esperada, foram uma boa estimativa. A principal vantagem ao realizar uma boa estimativa para os parâmetros do método de restrição é otimizar a convergência do método de otimização, obtendo soluções com um número menor de iterações.

É importante ressaltar os benefícios que os amortecedores hidrodinâmicos trouxeram à solução em catenária, reduzindo consideravelmente as tensões atuantes no *riser*, como visto na seção 6.2. Desenvolvimentos futuros devem ser feitos com relação ao tipo de material e método de instalação dos amortecedo-

res, devendo, preferencialmente, ser feita durante o lançamento, uma vez que a maior espessura dessas seções pode induzir ovalização excessiva dos dutos em caso de empilhamento ou *reeling*.

Para trabalhos futuros é recomendado que a estratégia de reinicializações do método GBNM seja melhorada. Ghiasi et al. [63] sugerem que outras funções de probabilidade que não baseadas na distribuição Gaussiana podem apresentar uma melhoria considerável no custo computacional. Outra alternativa poderá ser investigada baseada na função de aquisição do algoritmo de otimização Bayesiano [72, 73] como um novo componente de globalização do método de Nelder-Mead; essa tentativa visa a aplicação do metamodelo de Kriging para indicar quais regiões valem ser exploradas pelo *simplex* nas reinicializações seguintes, diminuindo o número de reinicializações necessárias para se obter uma boa estimativa do mínimo global. Como já destacado em trabalhos anteriores, a inclusão de restrições ligadas à fadiga representaria um bom avanço e a ferramenta apresentada pode ser facilmente adaptada para incluí-las. É importante, contudo, que, visando a maior eficiência computacional possível, as modificações na estratégia de reinicialização do método GBNM sejam implementadas pois análises de fadiga são computacionalmente muito custosas.

Referências bibliográficas

- 1 E&P MAGAZINE. *Offshore tide on rise*. Disponível em: <<https://www.epmag.com/offshore-tide-rise-670441>>. Acesso em: 08 nov. 2017.
- 2 U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. *Offshore production nearly 30% of global crude oil output in 2015*. Disponível em: <<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=28492>>. Acesso em: 12 nov. 2017.
- 3 MORAIS, J. M. d. *Petróleo em águas profundas: uma história tecnológica da petrobras na exploração e produção offshore*. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2013.
- 4 UNIVERSITY OF CALGARY. *Energy Education Encyclopedia*. Disponível em: <https://energyeducation.ca/encyclopedia/Oil_and_gas_reservoir>. Acesso em: 21 abr. 2019.
- 5 LSNMFTC - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. *Projeto RelP*. Disponível em: <<http://www.sinmec.ufsc.br/site/projetos.php?id=18>>. Acesso em: 21 abr. 2019.
- 6 TRACTEBEL OVERDICK GMBH. *Borkum West II - Substation Platform*. Disponível em: <https://overdick-offshore.com/projects/offshore-wind/borkum_west_ii_-_substation_platform>. Acesso em: 21 abr. 2019.
- 7 PROGRAMA DE ACELERAÇÃO DO CRESCIMENTO. *Chegada da plataforma P-55 a Bacia de Campos, no Rio de Janeiro*. Disponível em: <<https://www.flickr.com/photos/pacgov/13227647003/in/photostream>>. Acesso em: 21 abr. 2019.
- 8 OFFSHORE TECHNOLOGY. *British-Borneo Petroleum Syndicate oil and gas field project*. Disponível em: <<https://www.offshore-technology.com/projects/morpeth/morpeth3>>. Acesso em: 21 abr. 2019.
- 9 EMPRESA BRASIL DE COMUNICACAO. *Profissionais offshore contam desafio de trabalhar e descansar a 240 km da costa*. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2017-11/profissionais-offshore-contam-desafio-de-trabalhar-e-descansar-240-km-da-costa>>. Acesso em: 21 abr. 2019.
- 10 O PETROLEO. *Petrobras inicia fase para venda dos campos de Piranema e Piranema Sul*. Disponível em: <<https://www.opetroleo.com.br/petrobras-campos-de-piranema-e-piranema-sul>>. Acesso em: 21 abr. 2019.

- 11 SINAVAL. *Fornecedores de olho no offshore da Guiana*. Disponível em: <<http://sinaval.org.br/2017/07/fornecedores-de-olho-no-offshore-da-guiana>>. Acesso em: 21 abr. 2019.
- 12 TN PETROLEO. *FMC Technologies recebe encomenda de cinco manifolds adicionais para o pre-sal*. Disponível em: <<https://tnpetroleo.com.br/noticia/fmc-technologies-recebe-encomenda-de-cinco-manifolds-adicionais-para-o-pre-sal>>. Acesso em: 21 abr. 2019.
- 13 JOURNAL OF PETROLEUM TECHNOLOGY. *Direct Electrical Heating of a Flexible Pipe*. Disponível em: <<https://www.spe.org/en/jpt/jpt-article-detail/?art=2246>>. Acesso em: 21 abr. 2019.
- 14 SWAN HUNTER. *Swan Hunter Flexible Installation Spread completes Spooling and now Works Hard in the Field*. Disponível em: <<http://swanhunter.com/swan-hunter-flexible-installation-spread-completes-spooling-and-now-works-hard-in-the-field>>. Acesso em: 21 abr. 2019.
- 15 BECTARTE, F.; COUTAREL, A. Instability of tensile armour layers of flexible pipes under external pressure. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *ASME 2004 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. [S.l.], 2004. p. 155–161.
- 16 ALLSEAS. *Welding equipment*. Disponível em: <<https://allseas.com/equipment/welding-equipment/>>. Acesso em: 21 abr. 2019.
- 17 AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *Recommended Practice 2RD: Design of risers for floating production systems (FPSs) and tension-leg platforms (TLPs)*. Washington, D.C., EUA, 1998.
- 18 TOWARDS DATA SCIENCE. *Introduction to Genetic Algorithms*. Disponível em: <<http://towardsdatascience.com>>. Acesso em: 21 abr. 2019.
- 19 HAFTKA, R. T.; GÜRDAL, Z. *Elements of structural optimization*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012. v. 11.
- 20 DJEBLI, M. A. et al. The application of a smartphone in ship stability experiment. *Journal of Marine Science and Application*, Springer, v. 14, n. 4, p. 406–412, 2015.
- 21 VIEIRA, I. N.; LIMA, B. S. L. P.; JACOB, B. P. Optimization of steel catenary risers for offshore oil production using artificial immune system. In: SPRINGER. *International Conference on Artificial Immune Systems*. [S.l.], 2008. p. 254–265.
- 22 IHS CERA. The role of deepwater production in global oil supply. *Press release, Cambridge Energy Research Associates, Cambridge, EUA*, 2010.
- 23 RIGGS, H. R. Automated preliminary design of flexible riser configurations. 1989.

- 24 RIGGS, H. R.; LERAAND, T. Efficient static analysis and design of flexible risers. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, American Society of Mechanical Engineers, v. 113, n. 3, p. 235–240, 1991.
- 25 LARSEN, C. M.; HANSON, T. Optimization of catenary risers. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, American Society of Mechanical Engineers, v. 121, p. 90–94, 1999.
- 26 RODRIGUES, G. J. O. *Ferramentas computacionais para otimização e síntese de sistemas híbridos de risers baseados no conceito de bóia de superfície*. Doutorado em Engenharia Civil — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.
- 27 VIEIRA, L. T. et al. Application of genetic algorithms to the synthesis of riser configurations. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *22nd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. [S.l.], 2003. p. 391–396.
- 28 LIMA, B. S. L. P.; JACOB, B. P.; EBECKEN, N. F. F. A hybrid fuzzy/genetic algorithm for the design of offshore oil production risers. *International Journal for numerical methods in engineering*, Wiley Online Library, v. 64, n. 11, p. 1459–1482, 2005.
- 29 PINA, A. A. et al. Tailoring the particle swarm optimization algorithm for the design of offshore oil production risers. *Optimization and engineering*, Springer, v. 12, n. 1, p. 215–235, 2011.
- 30 VIEIRA, I. N.; LIMA, B. S. L. P.; JACOB, B. P. Bio-inspired algorithms for the optimization of offshore oil production systems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Wiley Online Library, v. 91, n. 10, p. 1023–1044, 2012.
- 31 CUNLIFFE, N. D. et al. Evolutionary design of marine riser systems. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. [S.l.], 2004.
- 32 ORCAFLEX. Orcina ltd. *Daltongate, UK*.
- 33 TANAKA, R. L.; MARTINS, C. A. A genetic algorithm approach to steel riser optimization. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. [S.l.], 2006.
- 34 TANAKA, R. L.; MARTINS, C. A. Dynamic optimization of steel risers. In: INTERNATIONAL SOCIETY OF OFFSHORE AND POLAR ENGINEERS. *The Seventeenth International Offshore and Polar Engineering Conference*. [S.l.], 2007.
- 35 TANAKA, R. L. *Otimização da configuração de risers rígidos*. Tese (Doutorado em Engenharia) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 2009.

- 36 ANDRADE, E. Q. et al. Optimization procedure of steel lazy wave riser configuration for spread moored FPSOs in deepwater offshore Brazil. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE. *Offshore Technology Conference*. [S.l.], 2010.
- 37 MOURELLE, M.; GONZALEZ, E.; JACOB, B. Anflex-computational system for flexible and rigid riser analysis. In: *Proceedings of the 9th International Symposium on Offshore Engineering, Brazil*. [S.l.: s.n.], 1995.
- 38 NARIÑO, G. A. R. *Otimização de Risers em Catenária com Amortecedores Hidrodinâmicos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2014.
- 39 PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. - PETROBRAS. Ludimar L. Aguiar, Ivan Fábio Mota Menezes e Márcio M. Mourelle. *Amortecedor hidrodinâmico para tubo ascendente em catenária*. WO 2011041860 A1, out. 2009.
- 40 YANG, H. Z.; ZHENG, W. Metamodel approach for reliability-based design optimization of a steel catenary riser. *Journal of Marine Science and Technology*, Springer, v. 16, n. 2, p. 202–213, 2011.
- 41 THOMAS, J. E. *Fundamentos de engenharia de petróleo*. [S.l.]: Interciência, 2001.
- 42 FERREIRA FILHO, V. *Gestão de operações e logística na produção de petróleo*. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2017.
- 43 BAI, Y.; BAI, Q. *Subsea pipelines and risers*. [S.l.]: Elsevier, 2005.
- 44 FRAGA, C. C. et al. Campos basin-25 years of production and its contribution to the oil industry. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE. *Offshore Technology Conference*. [S.l.], 2003.
- 45 KEPRATE, A. *Appraisal of riser concepts for FPSO in Deepwater*. Dissertação (Mestrado) — University of Stavanger, Norway, 2014.
- 46 AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *Recommended Practice 17B: Recommended practice for flexible pipe*. Washington, D.C., EUA, 2008.
- 47 AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *Recommended Practice 17J: Specification for unbonded flexible pipe*. Washington, D.C., EUA, 1998.
- 48 PALMER, A. C.; KING, R. A. *Subsea pipeline engineering*. [S.l.]: PennWell Books, 2004.
- 49 CARDOSO, P. et al. Optimization of catenary risers with hydrodynamic dampers. *Ocean Engineering*, Elsevier, v. 184, p. 134–142, 2019.
- 50 DNV GL. *Offshore Standard DNVGL-ST-F201: Dynamic risers*. Hovik, Noruega, January, 2018.
- 51 AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *Standard 2RD: Dynamic risers for floating production systems*. Washington, D.C., EUA, 2013.

- 52 NOCEDAL, J.; WRIGHT, S. Numerical optimization, series in operations research and financial engineering. *Springer, New York, USA, 2006*, 2006.
- 53 LUENBERGER, D. G.; YE, Y. *Linear and Nonlinear Programming*. [S.l.]: Springer, 2015. v. 228.
- 54 POTRA, F. A.; WRIGHT, S. J. Interior-point methods. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Elsevier, v. 124, n. 1-2, p. 281–302, 2000.
- 55 DEB, K. *Optimization for engineering design: Algorithms and examples*. [S.l.]: PHI Learning Pvt. Ltd., 2012.
- 56 BERTSEKAS, D. P. *Nonlinear programming*. [S.l.]: Athena Scientific, 1999.
- 57 NELDER, J. A.; MEAD, R. A simplex method for function minimization. *The computer journal*, Oxford University Press, v. 7, n. 4, p. 308–313, 1965.
- 58 ZAHARA, E.; KAO, Y.-T. Hybrid nelder–mead simplex search and particle swarm optimization for constrained engineering design problems. *Expert Systems with Applications*, Elsevier, v. 36, n. 2, p. 3880–3886, 2009.
- 59 WANG, L.; XU, Y.; LI, L. Parameter identification of chaotic systems by hybrid nelder–mead simplex search and differential evolution algorithm. *Expert Systems with Applications*, Elsevier, v. 38, n. 4, p. 3238–3245, 2011.
- 60 CHELOUAH, R.; SIARRY, P. A hybrid method combining continuous tabu search and nelder–mead simplex algorithms for the global optimization of multimima functions. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 161, n. 3, p. 636–654, 2005.
- 61 CHELOUAH, R.; SIARRY, P. Genetic and nelder–mead algorithms hybridized for a more accurate global optimization of continuous multimima functions. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 148, n. 2, p. 335–348, 2003.
- 62 LUERSEN, M. A.; RICHE, R. L. Globalized nelder–mead method for engineering optimization. *Computers & structures*, Elsevier, v. 82, n. 23-26, p. 2251–2260, 2004.
- 63 GHIASI, H.; PASINI, D.; LESSARD, L. Constrained globalized nelder–mead method for simultaneous structural and manufacturing optimization of a composite bracket. *Journal of composite materials*, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 42, n. 7, p. 717–736, 2008.
- 64 BAULAC, M.; DEFRANCE, J.; JEAN, P. Optimization of multiple edge barriers with genetic algorithms coupled with a nelder–mead local search. *Journal of sound and vibration*, Elsevier, v. 300, n. 1-2, p. 71–87, 2007.
- 65 RITTO, T. et al. Robust optimization of a flexible rotor-bearing system using the campbell diagram. *Engineering Optimization*, Taylor & Francis, v. 43, n. 1, p. 77–96, 2011.

- 66 DUDA, R. O.; HART, P. E.; STORK, D. G. Pattern classification and scene analysis 2nd ed. ed: *Wiley Interscience*, 1995.
- 67 LAGARIAS, J. C. et al. Convergence properties of the nelder–mead simplex method in low dimensions. *SIAM Journal on optimization*, SIAM, v. 9, n. 1, p. 112–147, 1998.
- 68 BLICKLE, T.; THIELE, L. A comparison of selection schemes used in evolutionary algorithms. *Evolutionary Computation*, MIT Press, v. 4, n. 4, p. 361–394, 1996.
- 69 FORTIN, F.-A. et al. DEAP: Evolutionary algorithms made easy. *Journal of Machine Learning Research*, v. 13, p. 2171–2175, jul 2012.
- 70 AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Boletim da produção de petróleo e gás natural. v. 102, Fevereiro 2019.
- 71 SCHLUTER, M.; GERDTS, M.; RUCKMANN, J. Midaco: New global optimization software for minlp. *MIDACO-Solver*, 2011.
- 72 PELIKAN, M.; GOLDBERG, D. E.; CANTÚ-PAZ, E. Boa: The bayesian optimization algorithm. In: MORGAN KAUFMANN PUBLISHERS INC. *Proceedings of the 1st Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation-Volume 1*. [S.l.], 1999. p. 525–532.
- 73 FRAZIER, P. I. A tutorial on bayesian optimization. *arXiv preprint arXiv:1807.02811*, 2018.