



**Giovanny Alfredo Rey Nariño**

**Otimização de *Risers* em Catenária com  
Amortecedores Hidrodinâmicos**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil do Departamento de  
Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Luiz Fernando Campos Ramos Martha  
Co-Orientador: Ivan Fábio Mota de Menezes

Rio de Janeiro  
Abril de 2014



**Giovanny Alfredo Rey Nariño**

**Otimização de *Risers* em Catenária com  
Amortecedores Hidrodinâmicos**

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

**Prof. Luiz Fernando Campos Ramos Martha**

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. Ivan Fábio Mota de Menezes**

Co-orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Raul Rosas e Silva**

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Prof. André Maués Brabo Pereira**

Universidade Federal Fluminense

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro  
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 08 de abril de 2014

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

### **Giovanny Alfredo Rey Nariño**

Graduado em Engenharia Civil pela Universidad Industrial de Santander (UIS) Bucaramanga – Colômbia, em 2009. Graduado em Gestão de Projetos de Engenharia Civil pela Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) Piedecuesta – Colômbia, em 2010

#### Ficha Catalográfica

Rey Nariño, Giovanny Alfredo

Otimização de Risers em Catenária com Amortecedores Hidrodinâmicos / Giovanny Alfredo Rey Nariño; orientador: Luiz Fernando Campos Ramos. Martha; co-orientador: Ivan F. M. Menezes, - 2014. 119 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2014

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Risers. 3. Otimização estrutural. 4. Algoritmos genéticos. I. Martha, Luiz Fernando Campos Ramos II. Menezes, Ivan Fábio Mota de. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD:624

## **Agradecimentos**

A Deus, por me acompanhar sempre, todos os dias da minha vida.

Aos meus adorados pais Blanca Isabel e Alfredo pela confiança e amor incondicional.

Ao meu avô Jose pelo apoio até o último dia de sua vida, meu segundo pai.

À minha namorada Yeilly pelo sacrifício de manter o relacionamento apesar da distância.

Aos meus orientadores Luiz Fernando Martha e Ivan Menezes, pela confiança dada durante a realização deste trabalho.

Ao Edmundo Queiroz de Andrade, Engenheiro do Cenpes/PDEP/TDUT, pela grande ajuda com relação à utilização do programa modeFRONTIER e pelos arquivos iniciais com a modelagem do riser RCHA no programa anflex.

A todos meus amigos da Colômbia e do Brasil, pela força e incentivos dados.

Aos amigos do TecGraf que contribuíram, direta ou indiretamente, para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os funcionários e professores do Departamento de Engenharia Civil da PUC.

Ao TecGraf pelo apoio financeiro e tecnológico durante o curso de mestrado.

À CAPES pelo apoio financeiro durante o curso de mestrado.

## Resumo

Rey, Giovanni Alfredo Nariño; Martha, Luiz Fernando; Menezes, Ivan Fabio da Mota. **Otimização de *Risers* em Catenária com Amortecedores Hidrodinâmicos**. Rio de Janeiro, 2014. 119p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia de Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A crescente demanda de óleo observada nas últimas décadas tem motivado as indústrias de petróleo a explorarem novas reservas em águas cada vez mais profundas, o que representa um maior desafio operacional, de segurança e econômico. Nesse novo cenário, as condições ambientais se tornam mais severas, conferindo às unidades flutuantes movimentos de amplitude cada vez maiores. Em consequência, os *risers*, que são os principais componentes responsáveis pelo transporte de óleo desde o reservatório até as unidades flutuantes, passam a ser solicitados de forma mais intensa. Um grande desafio tem sido colocado para as indústrias de petróleo no sentido de desenvolverem configurações para os *risers* capazes de reduzir os efeitos dinâmicos que lhes são impostos e, conseqüentemente, viabilizarem o seu uso em águas profundas e ultraprofundas. Configurações do tipo *Lazy-S*, *Pliant-Wave*, entre outras, têm sido propostas, porém, além de complexas, demandam muita logística e apresentam elevados custos para a sua implantação. Esta dissertação propõe uma solução alternativa que consiste no estudo de configurações “ótimas” de *risers* em catenária utilizando amortecedores hidrodinâmicos. As dimensões e o posicionamento desses amortecedores são obtidos por meio de técnicas de otimização multiobjetivo, buscando-se minimizar os efeitos provocados pelas ondas de compressão ao longo dos *risers* e os custos envolvidos na utilização desses amortecedores, respeitando-se algumas restrições geométricas. O processo de otimização é realizado por meio do algoritmo genético *NSGA-II*, disponível no programa modeFRONTIER. O equilíbrio dinâmico dos *risers*, verificado em cada passo da otimização, é obtido por meio do programa Anflex. Exemplos representativos são utilizados para demonstrar a eficiência e a viabilidade da utilização da metodologia proposta.

## Palavras-chave

Projeto de *risers*; Anflex; amortecedores hidrodinâmicos; otimização estrutural; algoritmos genéticos.

## Abstract

Rey, Giovanni Alfredo Nariño; Martha, Luiz Fernando (Advisor); Menezes, Ivan Fabio da Mota (Co-Advisor). **Optimization of Catenary Riser with Hydrodynamic Dampers**. Rio de Janeiro, 2014. 119p. MSc Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia de Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The growing demand for oil, observed in recent decades has motivated the oil industry to exploit new oil reserves in ever-deeper waters, representing a greater operational challenge, security and economic. In this new scenario, the environmental conditions become more severe, causing the floating units movements with increasing amplitude. Consequently, the risers, which are the main components responsible for the transport of oil from the reservoir to the floating units, shall be requested more intensely. The oil industry confronts a major challenge in order to develop riser configurations that can reduce the dynamic effects that are imposed on it and hence to enable its use in deep and ultra-deep waters. Lazy-S, Pliant-Wave, among others riser configurations, have been proposed, however, besides complex, require a lot of logistics and have high costs for their deployment. This thesis proposes an alternative solution that consists of the study of optimum catenary risers configurations using hydrodynamic dampers. The dimensions and placement of these dampers are obtained by means of multi-objective optimization techniques seeking to minimize the effects caused by compression waves over the risers and the costs involved in using these dampers, fulfilling certain geometric constraints. The optimization process is performed by the genetic algorithm NSGA-II, available at modeFRONTIER program. The dynamic equilibrium of risers, evaluated at each step of the optimization is obtained through Anflex program. Representative examples are used to demonstrate the efficiency and feasibility of using the proposed methodology.

## Keywords

Riser Design; Anflex; Hydrodynamic Dampers; Structural Optimization; Genetic Algorithm.

## Sumário

<b>1 Introdução</b>	16
1.1. Motivação	16
1.1.1. Trabalhos relacionados	17
1.2. Objetivo	18
1.2.1. Objetivos específicos	18
1.3. Organização do trabalho	18
 <b>2 Sistemas de produção offshore</b>	 19
2.1. Prática de projetos de <i>risers</i> , ancoragem e unidades flutuantes	19
2.1.1. Análise hidrodinâmica da unidade flutuante	20
2.1.2. Análise estrutural do <i>riser</i>	21
2.1.2.1. Análise global	21
2.1.2.2. Análise local	23
2.2. Unidade flutuante	24
2.2.1. Plataforma fixa	25
2.2.1.1. Plataforma rígida	25
2.2.1.2. Plataforma flexível	26
2.2.2. Plataformas móveis	27
2.3. Linhas de ancoragem	29
2.3.1. Ancoragem em catenária	30
2.3.2. Ancoragem em <i>taut-leg</i>	30
2.3.3. Ancoragem vertical	31
2.4. <i>Risers</i>	31
2.4.1. Configurações geométricas adotadas para <i>risers</i>	33
2.4.1.1. <i>Riser</i> em catenária SCR ( <i>steel catenary riser</i> )	33
2.4.1.2. <i>Riser lazy-S</i>	34
2.4.1.3. <i>Riser pliant-wave</i>	34
2.4.1.4. <i>Riser steep-wave</i> e <i>steep-S</i>	35
2.4.1.5. <i>Riser</i> vertical	35
2.4.1.6. <i>Riser</i> vertical complacente	36

2.4.1.7. <i>Riser</i> em catenária hidro-amortecidos RCHA	37
2.5. Esforços nos <i>risers</i> oriundos das condições ambientais	37
2.6. Considerações sobre a escolha da configuração RCHA	39
<b>3 Otimização</b>	42
3.1. Conceitos básicos	43
3.1.1. Função objetivo	43
3.1.2. Variáveis de projeto	43
3.1.3. Restrições	44
3.1.4. Espaço de busca	44
3.1.5. Ponto ótimo	44
3.1.6. Programação matemática	45
3.2. Classificação dos problemas de otimização	45
3.2.1. Com relação ao comportamento das funções	45
3.2.2. Com relação à existência de restrições	47
3.3. Otimização multiobjetivo	48
3.3.1. Definição de um problema multiobjetivo	51
3.3.2. Definições de Pareto	52
3.3.3. Exemplo ilustrativo da Fronteira de Pareto	54
3.4. Algoritmos genéticos	55
3.4.1. Generalidades	55
3.4.2. Aplicações dos algoritmos genéticos	56
3.4.3. Diferença entre algoritmos genéticos e clássicos de otimização	57
3.4.4. Analogia do método de algoritmos genéticos com a teoria da genética	58
3.4.5. Esquema básico de um algoritmo genético simples	59
3.4.6. Parâmetros de controle dos algoritmos genéticos	61
3.4.7. Codificação de variáveis	62
3.4.8. Seleção	62
3.4.9. Operadores genéticos	63
3.4.9.1. Cruzamento	63
3.4.9.2. Mutação	64
3.4.9.3. Elitismo	65



3.4.10. Vantagens e desvantagens do uso de algoritmos genéticos na otimização	65
3.4.11. Escolha do algoritmo genético NSGA- II no presente trabalho	66
3.4.11.1. NSGA ( <i>non-dominated sorting genetic algorithm</i> )	66
3.4.11.2. NSGA-II ( <i>elitist non-dominated sorting genetic algorithm</i> )	67
<b>4 Formulação matemática e implementação computacional</b>	69
4.1. Introdução	69
4.2. Descrição do <i>riser</i> RCHA	69
4.3. Formulação matemática	71
4.3.1. Definição do problema de otimização	71
4.3.1.1. Variáveis de projeto	71
4.3.1.2. Funções objetivo	73
4.3.1.3. Restrições	74
4.4. Implementação computacional	75
4.4.1. Modelagem do problema de otimização	76
4.4.1.1. Fluxo de otimização ( <i>workflow</i> )	76
<b>5 Exemplo de aplicação</b>	85
5.1. Introdução	85
5.2. Descrição do modelo	85
5.3. Variáveis de Entrada	90
5.4. Análise de otimização	91
5.4.1. Comparação entre as abordagens avaliadas	108
<b>6 Conclusões</b>	114
6.1. Sugestões para trabalhos futuros	115
<b>Referências</b>	117

## Lista de Figuras

Figura 2.1 – Sistema <i>offshore</i> para a exploração e produção de petróleo (Martins, 2011)	20
Figura 2.2 – Modelo hidrodinâmico da unidade flutuante (Senra, 2004)	21
Figura 2.3 – Modelo hidrodinâmico do sistema de <i>risers</i> (Senra, 2004)	22
Figura 2.4 – Modelo de elementos finitos de um <i>riser</i> (Teófilo, 2010).	23
Figura 2.5 – Relação entre modelo global e local (Teófilo, 2010).	23
Figura 2.6 – Principais tipos de plataforma marinha na indústria do petróleo.	24
Figura 2.7 – Tipos de Plataformas rígidas (Rueda, 2009): (a) <i>Jacket</i> , (b) <i>Steel gravity</i> ; (c): <i>Concrete gravity</i>	25
Figura 2.8 – Tipos de Plataformas flexíveis: (a) <i>Compliant tower</i> ; (b) <i>SPAR tower</i> ; (c) <i>TLP</i> ; (d) Mini <i>TLP</i> .	27
Figura 2.9 – Tipos de Plataformas moveis: (a) <i>Drilling ships</i> ; (b) Semi-submersível; (c) <i>Jack-up</i> ; (d) <i>FPSO</i> .	28
Figura 2.10 – Tipos de plataforma marinha usados em atividades <i>offshore</i>	29
Figura 2.11 – Ancoragem em catenária e ancoragem em <i>taut-leg</i>	30
Figura 2.12 – Ancoragem vertical (Carbono, 2005)	31
Figura 2.13 – Tipos de <i>riser</i> (a) flexível, (b) rígido.	33
Figura 2.14 – Configuração <i>steel catenary riser</i> (SCR)	34
Figura 2.15 – Configuração <i>Lazy-S</i> .	34
Figura 2.16 – Configuração <i>pliant-wave</i> (Martins, 2011)	35
Figura 2.17 – Configuração <i>steep wave</i> e <i>steep S</i>	35
Figura 2.18 – Configuração vertical.	36
Figura 2.19 – Configuração vertical complacente (Martins, 2011)	36
Figura 2.20 – Configuração de <i>riser</i> em catenária hidro-amortecido	37
Figura 2.21 – Região de altas tensões sofridas pelo <i>riser</i> (Andrade, 2011)	38
Figura 3.1 – Busca do ponto ótimo baseada em métodos clássicos	46
Figura 3.2 – Classificação geral dos métodos de otimização.	48
Figura 3.3 – Distribuição de "soluções ótimas" no espaço de soluções (Martins, 2011): (a) Mal distribuidas (b) Com boa distribuição.	49
Figura 3.4 – Mapeamento das variáveis de projeto no espaço objetivo (Martins, 2011).	50

Figura 3.5 – Exemplo do conceito de dominância no espaço objetivo (Martins, 2011).	52
Figura 3.6 – Funções $g$ e $h$ de um problema multiobjetivo (Schaffer, 1984)	54
Figura 3.7 – Identificação de uma Fronteira de Pareto.	55
Figura 3.8 – Analogia entre os algoritmos genéticos e a teoria da genética.	59
Figura 3.9 – Esquema básico (fluxograma) de um algoritmo genético simples.	60
Figura 3.10 – Exemplo de cruzamento de um único ponto.	64
Figura 3.11 – Exemplo de cruzamento de dois pontos.	64
Figura 3.12 – Exemplo de cruzamento uniforme.	64
Figura 3.13 – Exemplo de mutação de um cromossomo.	65
Figura 3.14 – Representação da classificação dos indivíduos no <i>NSGA</i> (Martins, 2011)	67
Figura 3.15 – Esquema do <i>NSGA-II</i> .	68
Figura 4.1 – Configuração geométrica do <i>riser</i> RCHA	70
Figura 4.2 – Disposição dos flutuadores no <i>riser</i>	70
Figura 4.3 – Variáveis de entrada da configuração RCHA.	72
Figura 4.4 – Altura mínima $H$ do primeiro trecho com amortecedores.	74
Figura 4.5 – Esquema gráfico do processo de otimização.	75
Figura 4.6 – Esquema simplificado do fluxo de otimização no modeFRONTIER	76
Figura 4.7 – Fluxo de otimização das tensões em função do ângulo de topo	77
Figura 4.8 – Dados de entrada do fluxo de dados.	78
Figura 4.9 – Arquivo <i>"input"</i> do Anflex.	79
Figura 4.10 – <i>Script</i> usado para o acoplamento do Anflex e do modeFRONTIER	80
Figura 4.11 – Arquivo <i>"output"</i> gerado pelo Anflex.	81
Figura 4.12 – Definição dos objetivos e restrições no fluxo do modeFRONTIER	82
Figura 4.13 – Parâmetros de otimização do algoritmo genético <i>NSGA-II</i> .	83
Figura 4.14 – "Calculadora" para determinar a maior tensão ao longo do <i>riser</i>	84
Figura 5.1 – Modelos com a quantidade variável de amortecedores hidrodinâmicos	88
Figura 5.2 – Gráfico das envoltórias "ótimas" de valores de <i>DNL</i> para	

cada um dos modelos analisados variando de (a) 1 a (e)	
5 trechos com amortecedores	89
Figura 5.3 – Gráfico comparativo das envoltórias de valores de <i>DNL</i>	90
Figura 5.4 – Resumo das simulações realizadas - caso (a)	93
Figura 5.5 – Proporção de violação das restrições - caso (a)	94
Figura 5.6 – Gráfico dos valores da função objetivo ao longo do processo de otimização do caso (a)	94
Figura 5.7 – Gráfico 4D para a escolha da solução ótima - caso (a)	95
Figura 5.8 – Gráfico de coordenadas paralelas de parâmetros de otimização - caso (a)	97
Figura 5.9 – Configuração ótima encontrada na abordagem 1 – caso (a).	97
Figura 5.10 – Resumo das simulações realizadas - caso (b)	98
Figura 5.11 – Proporção de violação das restrições - caso (b)	99
Figura 5.12 – Gráfico dos valores da função objetivo ao longo do processo de otimização do caso (b).	99
Figura 5.13 – Gráfico 4D para a escolha da solução ótima - caso (b).	100
Figura 5.14 – Gráfico de coordenadas paralelas de parâmetros de otimização - caso (b).	102
Figura 5.15 – Configuração ótima encontrada na abordagem 2 – caso (b).	103
Figura 5.16 – Resumo das simulações realizadas - caso (c).	104
Figura 5.17 – Proporção de violação das restrições - caso (c).	104
Figura 5.18 – Gráfico dos valores da função objetivo ao longo do Processo de otimização das variações de amplitudes das tensões de <i>Von Mises</i> - caso (c).	105
Figura 5.19 – Gráfico dos valores da função objetivo ao longo do processo de otimização dos comprimentos de trechos com amortecedores - caso (c).	106
Figura 5.20 – Espaço objetivo do problema multiobjetivo.	106
Figura 5.21 – Fronteira de Pareto do problema multiobjetivo – caso (c).	107
Figura 5.22 – Gráfico de coordenadas paralelas de parâmetros de otimização - caso (c).	108
Figura 5.23 – Envoltórias dos fatores <i>DNL</i> da configuração original sem amortecedores e das configurações ótimas referentes	109

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Classificação dos problemas de otimização quanto ao comportamento das funções objetivo e das restrições	47
Tabela 3.2 – Relação de dominância entre pontos no espaço objetivo.	53
Tabela 5.1 – Propriedades físicas e geométricas do <i>riser</i> .	86
Tabela 5.2 – Funções harmônicas equivalentes aos deslocamentos aplicados no topo do <i>riser</i>	86
Tabela 5.3 – Segmentos ou trechos que compõem o <i>riser</i> em estudo.	87
Tabela 5.4 – Variáveis de entrada do exemplo de aplicação.	91
Tabela 5.5 – Melhores configurações do problema referente ao caso (a).	96
Tabela 5.6 – Parâmetros da configuração ótima - caso (a)	97
Tabela 5.7 – Melhores configurações do problema referente ao caso (b).	101
Tabela 5.8 – Parâmetros da configuração ótima – caso (b).	102
Tabela 5.9 – Parâmetros das configurações da Fronteira de Pareto – caso (c)	107
Tabela 5.10 – Resumo dos resultados das simulações por abordagem.	110
Tabela 5.11 – Proporção de violações das restrições por abordagem.	111
Tabela 5.12 – Intervalos de variação dos parâmetros de otimização das configurações viáveis em cada abordagem.	111
Tabela 5.13 – Variáveis de entrada das configurações ótimas referentes a cada abordagem.	112
Tabela 5.14 – Ganho percentual do valor da função objetivo durante o processo de otimização.	113

## Lista de Abreviaturas

<b>Ang_Top</b>	Ângulo entre o topo do riser e o eixo vertical
<b>AH</b>	Amortecedor Hidrodinâmico
<b>DNV</b>	Det Norske Veritas
<b>FPSO</b>	<i>Floating Production Storage and Offloading</i>
<b>MOGA</b>	<i>Multi-Objective Genetic Algorithm</i>
<b>MOOP</b>	<i>Multi-Objective Optimization Problem</i>
<b>NPGA</b>	<i>Niched Pareto Genetic Algorithm</i>
<b>NSGA</b>	<i>Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm</i>
<b>NSGA-II</b>	<i>Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm</i>
<b>OSR</b>	Otimização Sem Restrições
<b>OCR</b>	Otimização Com Restrições
<b>RCHA</b>	<i>Riser em Catenária Hidro-Amortecido</i>
<b>SCR</b>	<i>Steel Catenary Riser</i>
<b>SLWR</b>	<i>Steel Lazy Wave Riser</i>
<b>SOOP</b>	<i>Single-Objective Optimization Problem</i>
<b>Spac</b>	Espaçamento entre flutuadores
<b>TDP</b>	<i>Touch Down Point</i>
<b>TDZ</b>	<i>Touch Down Zone</i>
<b>VEGA</b>	<i>Vector Evaluated Genetic Algorithm</i>
<b>VIV</b>	Vibrações induzidas por vórtices
<b>VME</b>	Tensão de von Mises na parede externa do <i>riser</i>
<b><math>\Delta</math>VME</b>	Diferença entre o valor máximo e o mínimo de VME na parede externa do riser

## Lista de Símbolos

$f_{obj\ i}$	Primeira função objetivo avaliada
$f_{obj\ ii}$	Segunda função objetivo avaliada
$f_{obj\ iii}$	Terceira função objetivo avaliada
$f_{obj}$	Função Objetivo
$g_i$	i-ésima restrição de desigualdade
$h_j$	j-ésima restrição de igualdade
$H$	Distância vertical entre o primeiro trecho de amortecedores e o solo marinho
$L_f$	Comprimento do flutuador
$L_{tf}$	Comprimento total dos segmentos de amortecedores
$lb_k$	Limite inferior da variável de projeto $x_k$ ,
$n_x$	número de variáveis de projeto
$n$	Quantidade de experimentos planejados
$n_g$	número de restrições de desigualdade
$n_h$	número de restrições de igualdade
$x_k$	k-ésimo elemento do vetor de variáveis de projeto
$ub_k$	Limite superior da variável de projeto $x_k$
$x$	vetor de decisão
$x_i$	variáveis de decisão
$X$	espaço das variáveis de decisão
$y$	vetor objetivo
$Y$	espaço objetivo