



**Alonso Joaquin Juvinao Carbono**

**Otimização da Disposição de Linhas de Ancoragem  
Utilizando Algoritmos Genéticos**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientadores: Luiz Fernando C. R. Martha  
Ivan Fábio Menezes



**Alonso Joaquin Juvinao Carbono**

## **Otimização da Disposição de Linhas de Ancoragem Utilizando Algoritmos Genéticos**

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

**Luiz Fernando Campos Ramos Martha**

Presidente / Orientador  
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Dr. Ivan Fábio Mota de Menezes**

Co-Orientador  
PUC-Rio

**Prof. Luiz Eloy Vaz**

UFRJ

**Prof. Raul Rosas e Silva**

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco**

UERJ

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 30 de Setembro de 2005

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

**Alonso Joaquin Juvinao Carbono**

Graduou-se em Engenharia Civil, pela Unicosta CUC – Corporação Universitária da Costa (Colômbia) em 1997. Desenvolveu seu trabalho de pesquisa com ênfase em computação gráfica aplicada.

Ficha Catalográfica

Juvinao Carbono, Alonso Joaquin

Otimização da disposição de linhas de ancoragem utilizando algoritmos genéticos / Alonso Joaquin Juvinao Carbono ; orientadores: Luiz Fernando C. R. Martha, Ivan Fábio Menezes. – Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Civil, 2005.

91 f. ; 29,7 cm

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

Inclui bibliografia

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

CDD: 624

## **Agradecimentos**

A Deus, pela sua ajuda diária.

À minha mãe e irmãos, pelo seu amor e apoio.

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

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

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

À Rita Cássia e 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

Carbono, Alonso Juvinao; Martha, Luiz Fernando, Menezes, Ivan F. M (Orientadores). **Otimização da Disposição de Linhas de Ancoragem Utilizando Algoritmos Genéticos**. Rio de Janeiro, 2005. 91p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Com o crescimento da demanda de óleo, as empresas de petróleo têm sido forçadas a explorar novas reservas em águas cada vez mais profundas. Em função do alto custo das operações de exploração de petróleo, torna-se necessário o desenvolvimento de tecnologias capazes de aumentar a eficiência e reduzir os custos envolvidos. Neste contexto, a utilização de unidades flutuantes torna-se cada vez mais freqüente em águas profundas. O posicionamento das unidades flutuantes durante as operações de exploração de óleo é garantido pelas linhas de ancoragem, que são estruturas flexíveis compostas, geralmente, por trechos de aço, amarras e/ou cabos sintéticos. O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um Algoritmo Genético (AG) para solucionar o problema da disposição das linhas de ancoragem de unidades flutuantes utilizadas nas operações de exploração de petróleo. A distribuição das linhas de ancoragem é um dos fatores que influencia diretamente nos deslocamentos (*offsets*) sofridos pelas unidades flutuantes quando submetidas às ações ambientais, como ventos, ondas e correntes. Desta forma, o AG busca uma disposição “ótima” das linhas de ancoragem cujo objetivo final é a minimização dos deslocamentos da unidade flutuante. Os operadores básicos utilizados por este algoritmo são mutação, *crossover* e seleção. Neste trabalho, foi adotada a técnica *steady-state*, que só efetua a substituição de um ou dois indivíduos por geração. O cálculo da posição de equilíbrio estático da unidade flutuante é feito aplicando-se a equação da catenária para cada linha de ancoragem com o objetivo de se obterem as forças de restauração na unidade, e empregando-se um processo iterativo para calcular a sua posição final de equilíbrio.

## Palavras-chave

Linhas de Ancoragem, Otimização Estrutural, Algoritmos Genéticos.

## Abstract

Carbono, Alonso Juvinao; Martha, Luiz Fernando, Menezes, Ivan F. M (Supervisors). **Mooring Pattern Optimization Using Genetic Algorithms**. Rio de Janeiro, 2005. 91p. MSc Dissertation – Civil Engineering Department, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.

With the increasing demand for oil, oil companies have been forced to exploit new fields in deep waters. Due to the high cost of oil exploitation operations, the development of technologies capable of increasing efficiency and reducing costs is crucial. In this context, the use of floating units in deep waters has become more frequent. The positioning of the floating units during oil exploitation operations is done using mooring lines, which are flexible structures usually made of steel wire, steel chain and/or synthetic cables. This work presents the development of a Genetic Algorithm (GA) procedure to solve the problem of the mooring pattern of floating units used in oil exploitation operations. The distribution of mooring lines is one of the factors that directly influence the displacements (offsets) suffered by floating units when subjected to environmental conditions such as winds, waves and currents. Thus, the GA seeks an optimum distribution of the mooring lines whose final goal is to minimize the units' displacements. The basic operators used in this algorithm are mutation, crossover and selection. In the present work, the steady-state GA has been implemented, which performs the substitution of only one or two individuals per generation. The computation of the floating unit's static equilibrium position is accomplished by applying the catenary equilibrium equation to each mooring line in order to obtain the out-of-balance forces on the unit, and by using an iterative process to compute the final unit equilibrium position.

## Keywords

Mooring Pattern, Structural Optimization, Genetic Algorithm.

# Sumário

1	Introdução	13
1.1.	Motivação	13
1.2.	Objetivo	14
1.3.	Organização do trabalho	15
2	Sistemas de Produção Offshore	16
2.1.	Introdução	16
2.2.	Casco	16
2.2.1.	Plataforma Semi-submersível	17
2.2.2.	Navios	17
2.2.3.	TLP – <i>Tension Leg Platform</i>	18
2.2.4.	SPAR	19
2.3.	Linhas de Ancoragem	19
2.3.1.	Amarras	19
2.3.2.	Cabos de Aço	19
2.3.3.	Cabos de Poliéster	20
2.4.	Tipos de Ancoragem	21
2.4.1.	Ancoragem em Catenária	21
2.4.2.	Ancoragem em Taut-Leg	21
2.4.3.	Ancoragem Vertical	22
2.5.	<i>Risers</i>	23
2.6.	Sistemas de Ancoragem	24
2.6.1.	Ancoragem com Ponto Único	25
2.6.2.	Amarração com Quadro de Ancoragem (SM)	27
2.6.3.	Ancoragem com Posicionamento Dinâmico	28
3	Métodos de Otimização	30
3.1.	Introdução	30
3.2.	Otimização	30
3.2.1.	Programação Linear	30
3.2.2.	Programação Não-Linear	31
3.3.	Computação Natural	32

3.3.1. Recozimento Simulado	32
3.3.2. Fractais	33
3.3.3. Lógica Nebulosa	33
3.3.4. Redes Neurais Artificiais	34
3.3.5. Computação Evolucionária	34
3.3.5.1. Programação Evolutiva	36
3.3.5.2. Estratégias Evolutivas	36
3.3.5.3. Programação Genética	36
3.3.5.4. Algoritmos Genéticos	37
4 Implementação Computacional	56
4.1. Introdução	56
4.2. Formulação Matemática	56
4.3. Codificação das Variáveis de Projeto	58
4.4. Cálculo dos Deslocamentos	58
4.5. Função <i>Fitness</i>	59
4.6. Operador <i>Crossover</i>	60
4.7. Operador Mutação	60
4.8. Fator <i>Generation GAP</i>	60
4.9. Algoritmo SSGA	61
4.10. Aplicação	61
4.10.1. Treliça de 2 Barras	62
4.10.2. Treliça de 3 Barras	63
4.10.3. Treliça de 10 Barras	65
4.10.4. Treliça Espacial de 25 Barras	67
4.10.5. Treliça Plana de 52 Barras	69
4.10.6. Funções Contínuas	73
4.10.7. Comparações com o algoritmo do ICA	77
5 Aplicações	79
5.1. Introdução	79
5.2. Exemplo 1 – Plataforma semi-submersível	79
5.3. Exemplo 2 – FPSO	82
6 Conclusões	87
6.1. Sugestões para trabalhos futuros	88





## Lista de figuras

Figura 2.1 – Plataforma semi-submersível [1].	17
Figura 2.2 – Navio FPSO [1].	18
Figura 2.3 – Unidade TLP [1].	18
Figura 2.4 – Cabos de aço [1]	20
Figura 2.5 – Cabo de poliéster [1].	21
Figura 2.6 – Ancoragem em catenária x Ancoragem <i>taut-leg</i> [1].	22
Figura 2.7 – Ancoragem Vertical – TLP [1].	23
Figura 2.8 – Exemplos de <i>Risers</i> : (a) Flexível e (b) Rígido [1].	23
Figura 2.9 – <i>Turret</i> externo [1].	25
Figura 2.10 – Ancoragem tipo CALM com <i>hawser</i> [1].	26
Figura 2.11 – SALM com <i>riser</i> e <i>yoke</i> [1].	26
Figura 2.12 – Plataforma semi-submersível com amarração de quadro de ancoragem [1].	27
Figura 2.13 – Vista 3D de um sistema DICAS [1].	28
Figura 2.14 – Sistema de ancoragem DP [1].	29
Figura 3.1 – Principais algoritmos evolucionários.	35
Figura 3.2 – Representação geral de um algoritmo evolucionário.	36
Figura 3.3 – Representação em pseudo-código de um AG genérico.	40
Figura 3.4 – Representação em pseudo-código de um AG geracional.	41
Figura 3.5 – Representação em pseudo-código de um AG em regime permanente.	41
Figura 3.6 – Representação do operador <i>crossover</i> [2].	42
Figura 3.7 – Exemplo da aplicação do operador mutação	43
Figura 4.1 – Representação de um sistema de ancoragem com 8 linhas.	57
Figura 4.2 – Deslocamentos sofridos por uma unidade flutuante sob a ação de cargas externas.	57
Figura 4.3 – Representação de linhas de ancoragem por meio de molas não-lineares.	59
Figura 4.4 – Treliça de 2 barras.	62
Figura 4.5 – Gráfico de convergência para a otimização discreta da treliça de 2 barras.	63
Figura 4.6 – Treliça de 3 barras.	64
Figura 4.7 – Gráfico de convergência para a otimização discreta da treliça de 3	

barras	64
Figura 4.8 – Treliça plana de 10 barras.	65
Figura 4.9 – Gráfico de convergência para a otimização discreta da treliça de 10 barras.	66
Figura 4.10 – Treliça espacial de 25 barras.	67
Figura 4.11 – Gráfico de convergência para a otimização discreta da treliça espacial de 25 barras.	69
Figura 4.12 – Treliça plana de 52 barras.	70
Figura 4.13 – Gráfico de convergência para a otimização discreta da treliça plana de 52 barras – <i>crossover</i> de um ponto (1X).	72
Figura 4.14 – Gráfico de convergência para a otimização discreta da treliça plana de 52 barras – <i>crossover</i> de dois pontos (2X).	72
Figura 4.15 – Gráfico de convergência do processo de otimização da Função F1.	74
Figura 4.16 – Gráfico de convergência do processo de otimização da Função Goldprice.	75
Figura 4.17 – Gráfico de convergência do processo de otimização da Função Quartic.	75
Figura 4.18 – Gráfico de convergência do processo de otimização da Função Shubert.	76
Figura 4.19 – Gráfico de convergência do processo de otimização da Função Brown3.	77
Figura 5.1 – Vista de topo da unidade flutuante (Exemplo 1).	80
Figura 5.2 – Gráfico de convergência do processo de otimização (Exemplo 1).	82
Figura 5.3 – Disposição final das linhas de ancoragem (Exemplo 1)	79
Figura 5.4 – Vista de topo da unidade flutuante (Exemplo 2).	84
Figura 5.5 – Gráfico de convergência do processo de otimização (Exemplo 2).	85
Figura 5.6 – Disposição final das linhas de (Exemplo 2).	86

## Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Termos básicos relacionados com os AG.	38
Tabela 3.2 – Comparação dos AG com os métodos clássicos.	39
Tabela 3.3 – Avaliação dos indivíduos da população inicial.	52
Tabela 4.1 – Comparação de resultados obtidos com a treliça de 2 barras.	63
Tabela 4.2 – Comparação de resultados obtidos com a treliça de 3 barras.	65
Tabela 4.3 – Comparação de resultados obtidos com a treliça de 10 barras.	66
Tabela 4.4 – Grupos de elementos da treliça espacial de 25 barras.	68
Tabela 4.5 – Detalhe de cargas da treliça espacial de 25 barras.	68
Tabela 4.6 – Comparação de resultados obtidos com a treliça espacial de 25 barras.	69
Tabela 4.7 – Seções disponíveis para o exemplo da treliça de 52 barras.	71
Tabela 4.8 – Comparações de resultados obtidos com a treliça plana de 52 barras.	73
Tabela 4.9 – Comparações dos resultados obtidos com as funções contínuas.	77
Tabela 4.10 – Comparação de resultados de funções contínuas com referencia [28].	78
Tabela 5.1 – Propriedades dos materiais do Exemplo 1.	80
Tabela 5.2 – Restrições laterais das variáveis de projeto (Exemplo 1).	80
Tabela 5.3 – Forças externas atuando sobre a unidade flutuante (Exemplo 1).	81
Tabela 5.4 – Azimutes finais da unidade flutuante (Exemplo 1).	81
Tabela 5.5 – Propriedades dos materiais do Exemplo 2.	83
Tabela 5.6 – Restrições laterais das variáveis de projeto (Exemplo 2).	83
Tabela 5.7 – Forças externas atuando sobre a unidade flutuante (Exemplo 2).	84
Tabela 5.8 – Azimutes finais da unidade flutuante (Exemplo 2).	85