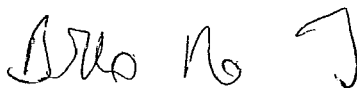


ALGORITMOS EVOLUTIVOS APLICADOS À SÍNTESE E OTIMIZAÇÃO DE
SISTEMAS DE ANCORAGEM

Carl Horst Albrecht

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS
EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Aprovada por:



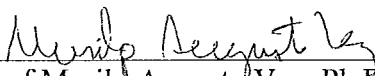
Prof. Breno Pinheiro Jacob, D.Sc.



Prof. Sérgio Hamilton Sphaier, Dr.Ing.



Profª Beatriz de Souza Leite Pires de Lima, D.Sc.



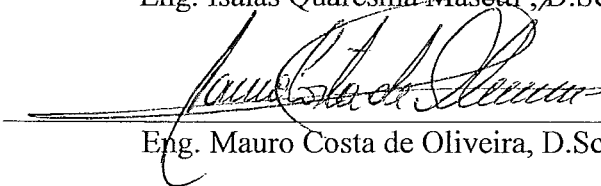
Prof Murilo Augusto Vaz, Ph.D.



Prof. Kazuo Nishimoto, D.Sc.



Eng. Isaías Quaresma Masetti, D.Sc.



Eng. Mauro Costa de Oliveira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2005

ALBRECHT, CARL HORST

Algoritmos Evolutivos Aplicados à Síntese e
Otimização de Sistemas de Ancoragem [Rio de
Janeiro] 2005

VII, 166 p. 29.7cm (COPPE/UFRJ, D.Sc.,
Engenharia Oceânica, 2004)

Tese – Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Sistemas *Offshore*
2. Sistemas de ancoragem
3. Otimização
4. Algoritmos Evolutivos

I. COPPE/UFRJ, II. Título (série)

**À minha esposa Rosane
e às minhas filhas Letícia e Luíza.**

Agradecimentos

Aos meus orientadores, especialmente ao professor Breno Pinheiro Jacob, pelo incentivo e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

À Rosane pela dedicação e compreensão nestes anos e pelo apoio na finalização da tese. À Letícia e Luiza, pela paciência e compreensão.

Ao Departamento de Expressão Gráfica da Escola Politécnica da UFRJ, por permitir a minha dedicação exclusiva ao trabalho de finalização da tese.

Aos amigos do Laboratório de Modelagem e Visualização (LAMVI), do Departamento de Expressão Gráfica, especialmente ao Rodrigo Alves Pons pelo apoio no desenvolvimento do sistema.

À professora Beatriz de Souza Leite Pires de Lima pelo apoio com os métodos evolutivos.

Aos amigos do Laboratório de Métodos Computacionais em Sistemas Offshore (LAMCSO) da COPPE/UFRJ, especialmente ao Luciano Tardelli Vieira pelo apoio com os algoritmos genéticos.

À PETROBRAS, que por intermédio do engenheiro Isaias Quaresma Masetti permitiu e incentivou o uso do sistema SITUA/PROSIM.

Aos engenheiros Ronaldo Rossi e Octavio pela orientação nas questões de ancoragem de plataformas.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

ALGORITMOS EVOLUTIVOS APLICADOS À SÍNTESE E OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE ANCORAGEM

Carl Horst Albrecht

Março/2005

Orientadores: Sérgio Hamilton Sphaier
Breno Pinheiro Jacob

Programa: Engenharia Oceânica

Com a descoberta de petróleo a profundidades cada vez maiores e a utilização de grandes plataformas para a exploração de campos gigantes, o projeto de sistemas de ancoragem torna-se cada vez mais crítico. Por outro lado o tempo disponível para o desenvolvimento destes projetos é sempre pouco. Assim, faz-se necessário o desenvolvimento de ferramentas computacionais que consigam aumentar a eficiência no projeto destes sistemas através de métodos de otimização.

Neste trabalho é feita uma comparação entre diversos métodos de otimização baseados nos conceitos de evolução de uma população, e sua aplicação ao projeto de sistemas de ancoragem para águas profundas. Com especial enfoque nos métodos dos Algoritmos Genéticos e no método do Enxame de Partículas.

A metodologia de projeto de sistemas de ancoragem é apresentada, bem como a formulação de análise acoplada de sistemas casco-linhas.

As análises do sistema de ancoragem são feitas utilizando-se a metodologia acoplada de análise de sistemas flutuantes implementada no programa SITUA/PROSIM.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

EVOLUTIONARY ALGORITHMS APPLIED TO MOORING SYNTHESIS AND OPTIMIZATION

Carl Horst Albrecht

March/2005

Advisors: Sérgio Hamilton Sphaier
Breno Pinheiro Jacob

Department: Ocean Engineering

As offshore oil exploration activities progress towards even deeper waters, large floating platforms have been considered for use in giant fields, and the design of mooring systems is then a critical issue. On the other hand, the available time for the development of such projects is always short. This motivates the development of innovative computational tools that are able to improve the efficiency in the design of mooring systems through optimization methods.

This work presents the development, implementation and comparison of several optimization methods based on evolutionary concepts, and their application to the design of mooring system for deepwater offshore platforms. Particular emphasis is dedicated to Genetic Algorithms and Particle Swarm methods.

The methodology for design of mooring systems is presented, together with the formulation for the coupled analysis of the hull of the platform and its mooring lines and risers, that is implemented in the SITUA/PROSIM program employed in the analysis of the moored system with its risers.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
1.1 - MOTIVAÇÃO	1
1.2 – OBJETIVO	2
1.3 – HISTÓRICO	3
1.3.1 – <i>Exploração em Alto Mar – Bacia de Campos</i>	3
1.3.2 – <i>Ancoragem</i>	5
1.4 – ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	7
CAPÍTULO 2: SISTEMAS DE EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO NO MAR	8
2.1 – INTRODUÇÃO	8
2.2 – CASCO	9
2.2.1 - <i>Plataforma semi-submersível</i>	9
2.2.2 - <i>Navios</i>	10
2.2.3 – <i>TLP</i>	10
2.2.4 - <i>Spar</i>	11
2.3 – RISERS	12
2.4 – LINHAS DE ANCORAGEM	13
2.4.1 - <i>Ancoragem Convencional</i>	13
2.4.2 – <i>Complacência Diferenciada (DICAS)</i>	15
2.4.3 - <i>Linha Retesada (Taut-leg)</i>	16
2.4.4 – <i>Tendões</i>	17
2.4.5 – <i>Âncoras</i>	17
2.4.6 - <i>Amarras</i>	20
2.4.7 - <i>Cabos de aço</i>	21
2.4.8 – <i>Cabos de Poliéster</i>	22
CAPÍTULO 3: PROJETO DE SISTEMAS DE ANCORAGEM	25
3.1 - INTRODUÇÃO	25
3.2 - CONDIÇÕES AMBIENTAIS PARA PROJETO	27
3.2.1 - <i>Condição Máxima de Projeto</i>	27
<i>Ancoragens Permanentes</i>	27
<i>Ancoragens Provisórias</i>	28
3.2.2 - <i>Condição Máxima de Operação</i>	28
3.3 - SITUAÇÕES A SEREM ANALISADAS	29
3.3.1 - <i>Situação Intacta</i>	29
3.3.2 - <i>Situação Avariada</i>	30
3.3.3 - <i>Situação Transiente</i>	30
3.3.4 - <i>Análise de Fadiga</i>	30
3.4 – OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE ANCORAGEM	31
CAPÍTULO 4: METODOLOGIA DE ANÁLISE DE SISTEMAS DE ANCORAGEM	33
4.1 – INTRODUÇÃO	33
4.2 - ANÁLISE QUASI-ESTÁTICA	34
<i>Cálculo das Tensões</i>	34
<i>Cálculo de Offsets</i>	34
4.3 – ANÁLISE DINÂMICA	36
4.3.1 – <i>Domínio da Frequência</i>	36
4.3.2 – <i>Domínio do Tempo</i>	36
4.4 - METODOLOGIA DESACOPLADA	37

4.4.1 - <i>Análise de Movimentos da Unidade Flutuante</i>	38
4.4.2 - <i>Análise Estrutural dos Risers</i>	40
4.5 – METODOLOGIA ACOPLADA	42
CAPÍTULO 5: FORMULAÇÃO PARA ANÁLISE ACOPLADA	43
5.1 – INTRODUÇÃO	43
5.2 - EQUAÇÕES DE MOVIMENTO DA UNIDADE FLUTUANTE	43
5.2.1 - <i>Sistemas de Referência</i>	44
<i>Sistema Global Geral (Constante, “inercial”)</i>	44
<i>Sistema Estrutural da Plataforma (Móvel, “Fixo no Corpo”)</i>	44
<i>Sistema Local dos Membros da Plataforma e dos Elementos Finitos das Linhas</i>	44
5.2.2 - <i>Formulação das Equações de Movimento</i>	46
<i>Deslocamento de Translação</i>	46
<i>Deslocamento de Rotação</i>	46
<i>Transformação de Coordenadas</i>	48
<i>Transformação de Velocidades</i>	49
<i>Segunda Lei de Newton</i>	49
<i>Equações de Movimento</i>	51
5.3 - FORMULAÇÃO ESTRUTURAL DAS LINHAS	54
5.3.1 - <i>Modelo Matemático - Solução Numérica</i>	54
5.3.2 - <i>Discretização Espacial</i>	55
<i>Elemento de Treliça</i>	55
<i>Elemento de Pórtico</i>	56
5.3.3 - <i>Discretização no Tempo</i>	56
5.4 - CARREGAMENTOS AMBIENTAIS.....	58
5.4.1 – <i>Correnteza</i>	58
5.4.2 - <i>Vento</i>	59
5.4.3 - <i>Ondas</i>	62
5.4.4 - <i>Cálculo das Forças</i>	62
<i>Formulação de Morison</i>	63
5.5 – ANÁLISE ESTATICA ACOPLADA	67
CAPÍTULO 6: OTIMIZAÇÃO	69
6.1 – INTRODUÇÃO	69
6.2 - OTIMIZAÇÃO ANALÍTICA E OTIMIZAÇÃO NUMÉRICA.....	71
6.3 – ÓTIMO LOCAL E ÓTIMO GLOBAL	72
6.4 - RESTRIÇÕES E PENALIDADE.....	73
6.5 – MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO NUMÉRICA.....	75
6.6 – ELEMENTOS DA OTIMIZAÇÃO	77
CAPÍTULO 7: MÉTODOS ALEATÓRIOS	78
7.1 – INTRODUÇÃO	78
7.2 – ESTRATÉGIA EVOLUTIVA (EE).....	80
7.3 - ALGORITMO GENÉTICO (AG)	83
7.3.1 – <i>População</i>	85
7.3.2 - <i>Material Genético e Codificação Binária</i>	86
7.3.3 - <i>Função aptidão</i>	87
7.3.4 - <i>Seleção</i>	89
7.3.5 - <i>Reprodução e Operadores Genéticos</i>	91
7.3.6 - <i>Sobrevivência</i>	93
7.3.7 - <i>Crítérios de Parada</i>	93
7.3.8 – <i>Codificação Real</i>	94
<i>Cruzamento</i>	94
<i>Mutação</i>	96

7.4 - MICRO ALGORITMO GENÉTICO (MGA).....	96
7.5 - ENXAME DE PARTÍCULAS (PSO).....	97
7.5.1 – Histórico.....	97
7.5.2 – Algoritmo Básico.....	98
7.5.3 – Inércia.....	100
7.5.4 – Melhor Global e Melhor Local.....	100
7.5.5 – Variação Linear da Inércia.....	101
7.5.6 – Coeficiente de Construção.....	102
7.5.7 – Variação Não Linear da Inércia.....	103
7.5.8 – Congregação Passiva.....	105
7.5.9 – Atração Social.....	107
CAPÍTULO 8: IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	108
8.1 – INTRODUÇÃO.....	108
8.2 – MÉTODOS IMPLEMENTADOS.....	111
8.2.1 - Algoritmo genético (GA clássico).....	111
8.2.2 - Micro Algoritmo Genético (Micro GA).....	111
8.2.3 - Enxame de Partículas (PSO).....	111
8.2.4 - Estratégia Evolutiva (Evolutivo).....	112
8.3 – PARÂMETROS DE ACOMPANHAMENTO DA EVOLUÇÃO.....	112
8.4 - EXEMPLOS COMPARATIVOS.....	115
8.4.1 – Funções de Comparação.....	116
8.4.2 – Análises Comparativas.....	119
8.4.3 – Resultados do teste com Semente Aleatória idêntica.....	121
Teste Unimodal.....	121
Schaffer f6.....	122
Rosenbrock.....	123
8.4.4 – Resultados do teste com várias realizações.....	124
Teste Unimodal.....	124
Schaffer f6.....	125
Rosenbrock.....	126
8.4.5 – Análise de Resultados e Seleção de Métodos.....	127
8.4.6 – Ajuste da Inércia do PSO.....	127
CAPÍTULO 9: SÍNTESE E OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE ANCORAGEM	129
9.1 – MODELO ACOPLADO ANCORAGEM-RISER (SITUA/PROSIM).....	129
9.1.1 - Dados ambientais.....	129
9.1.2 - Plataforma.....	130
9.1.3 - Linhas.....	131
9.1.4 - Diagrama de Offset.....	133
9.2 - EXEMPLOS PROPOSTOS.....	135
9.2.1 – Modelo 1 – P1.....	135
9.2.2 – Modelo 2 – P2.....	138
9.2.3 - Dados ambientais comuns aos dois modelos.....	141
9.3 - MODELO DE OTIMIZAÇÃO.....	142
9.3.1 - Variáveis livres.....	142
9.3.2 - Função Objetivo e Restrição.....	142
9.3.3 - Algoritmo de Otimização.....	145
Azimute.....	146
Raio de ancoragem.....	147
Tração Média de Trabalho.....	147
Análise.....	148

CAPÍTULO 10: RESULTADOS OBTIDOS 149

10.1 – MODELO P1 149

10.1.1 – *Aplicação dos Métodos*..... 150

10.1.2 – *Modelo P1 Otimizado*..... 151

10.2 – MODELO P2 153

10.2.1 – *Aplicação dos Métodos*..... 154

10.2.2 – *Modelo P2 Otimizado*..... 154

CAPÍTULO 11: CONCLUSÃO 156

11.1 – COMENTÁRIOS 156

11.2 – TRABALHOS FUTUROS 158

CAPÍTULO 12: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 159

ANEXO A..... 167

A.1 - RESULTADO DE EXECUÇÃO DE ENXAME DE PARTÍCULAS - EXEMPLO P1 168

A.2 - RESULTADO DE EXECUÇÃO DE MICRO ALGORITMO GENÉTICO - EXEMPLO P1 171

Capítulo 1: Introdução

1.1 - Motivação

Com a descoberta de campos petrolíferos marinhos em águas cada vez mais profundas, a utilização de plataformas de exploração e exploração suportadas por estruturas rígidas e fixas ao fundo tornaram-se impraticáveis. Novas soluções foram desenvolvidas para possibilitar a exploração em alto mar em profundidades maiores que 400 metros e que chegam hoje a 2000 metros. Uma das soluções mais empregadas em águas profundas é a utilização de unidades flutuantes ancoradas.

A exploração de petróleo em alto mar é uma atividade relativamente nova do ponto de vista tecnológico e muitas fronteiras ainda estão para ser superadas. Do ponto de vista dos sistemas de ancoragem, e em especial no caso brasileiro, uma destas fronteiras é o aumento da profundidade da locação em que a unidade irá operar. Nestas profundidades torna-se impossível a utilização de sistemas convencionais compostos de amarras e cabos de aço e a adoção de novos materiais, como o poliéster, bem como a adoção de sistemas que trabalham sob tração, com raio curto, passam a tornar-se viáveis.

O custo do sistema de ancoragem é pequeno quando comparado aos custos dos outros sistemas como “risers”, casco ou equipamentos de bordo, no entanto, um bom projeto de ancoragem tem impacto direto no projeto de alguns destes sistemas, principalmente no sistema de “risers”, que é diretamente afetado pelo passeio da plataforma.

A motivação deste trabalho é analisar métodos que permitam a otimização eficiente do sistema de ancoragem visando uma maior segurança de todo o sistema bem como a redução dos custos globais do projeto através da definição de um passeio mínimo para a embarcação.

1.2 – Objetivo

O objetivo deste trabalho é estudar métodos de otimização que permitam ao projetista desenvolver um sistema de ancoragem mais seguro e eficiente em termos do passeio da embarcação e das trações nas linhas de ancoragem.

O enfoque principal será nas etapas iniciais do projeto, quando faz-se necessário uma ferramenta computacional de fácil uso, e que permita ao projetista alterar de forma rápida e segura as variáveis de definição da ancoragem.

Será desenvolvida uma metodologia de síntese baseada em um método de otimização evolutiva. Serão analisados alguns métodos evolutivos, com ênfase nos Algoritmos Genéticos e Enxame de Partículas.

Será apresentada uma proposta de modificação da formulação do método do Enxame de Partículas com a introdução de um novo termos que leva em consideração a influência do conhecimento do enxame na definição da velocidade de cada partícula.

Exemplos numéricos serão utilizados para comparar estes métodos e exemplos de ancoragens serão desenvolvidos para analisar a aplicabilidade dos mesmos na obtenção de sistemas ótimos de ancoragem.

Os modelos de ancoragem serão otimizados em relação ao seu raio de ancoragem, azimutes, comprimento das linhas e pré-tração de trabalho.

Apesar da análise dinâmica ser a mais indicada para obter uma melhor resposta do comportamento do sistema de ancoragem [BULGARELLI et al.,1997], [KWAN, 1991], neste trabalho será utilizada somente análise estática , por razões de racionalização dos custos computacionais e por tratar-se de uma etapa inicial do processo de projeto.

Análises dinâmicas podem ser efetuadas nas melhores soluções encontradas no processo de otimização, evitando que tempo computacional e de projeto seja desperdiçado na busca de uma solução ótima.

1.3 – Histórico

1.3.1 – Exploração em Alto Mar – Bacia de Campos

A exploração de petróleo na bacia de Campos iniciou-se na década de 70. Embora a primeira descoberta comercial, o Campo de Garoupa, tenha sido feita em 1974, a produção só começou realmente em agosto de 1977, no Campo de Enchova - na realidade o segundo campo a ser descoberto, em 120m de profundidade de água.

O sistema de Garoupa/Namorado começou a produzir em fevereiro de 1979 e era composto por quatro poços produtivos do campo de Garoupa, em 120m de lâmina d'água, e quatro poços do Campo de Namorado, em 160m.

Em 1983, outro passo importante foi tomado para o desenvolvimento da Bacia, com a instalação de sete plataformas fixas em sequência: PNA-1, PCE-1 (Central), PCH-2, PNA-2, PGP-1 (Central), PCH-1 e PPM-1 (Central), em profundidade de lâmina d'água de no máximo 170 metros [ROSSI, 2002].



Figura 1- Plataforma Fixa

Quando as profundidades envolvidas eram da ordem de dezenas até uma centena de metros, era possível manter os equipamentos de exploração marinha posicionados através de uma torre treliçada apoiada no fundo. Com o aumento da profundidade de

exploração, este tipo de estrutura fixa no fundo não pode mais ser utilizada, e a solução de utilizar unidades de produção flutuantes e ancoradas no fundo passou a ser a única viável.

Em 1984, o Campo de Albacora foi descoberto, seguido pelo de Marlim em 1985. Com essas descobertas, a Bacia de Campos começou a mostrar todo seu potencial, isto é, a existência de gigantescos campos em águas profundas. No entanto, essas novas descobertas estavam localizadas em águas ainda mais profundas, que iam de 300 a mais de 1.000m, e, por isso, tornaram-se a principal força motora no aumento do esforço para desenvolver e testar novos conceitos, mais uma vez, diretamente no campo.

Outras descobertas igualmente importantes seguiram: Albacora Leste (1986), Marlim Sul (1987), Marlim Leste (1987), Barracuda (1989), Caratinga (1989), Espadarte (1994), Roncador (1996), Jubarte (2002) e Cachalote (2002) [ROSSI, 2002].

A figura 2 apresenta a evolução da produção brasileira de petróleo de 1982 a 2002. Pode-se ver claramente o aumento da importância dos campos em águas profundas (>400m).

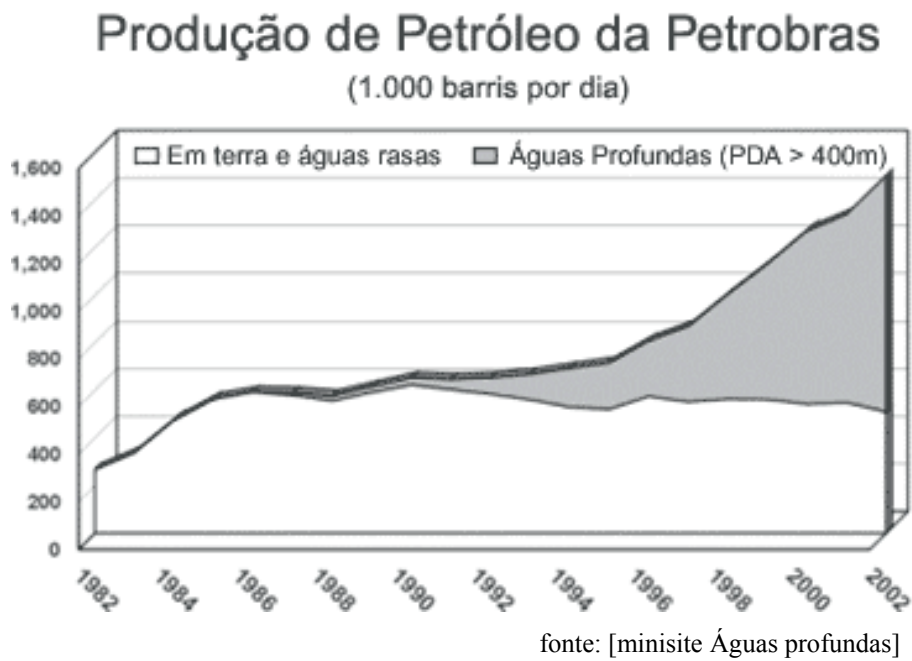


Figura 2 - Evolução da produção de Petróleo

1.3.2 – Ancoragem

Manter uma embarcação em uma mesma locação, com um mínimo de deriva e com uma confiabilidade tal que garanta a segurança dos equipamentos e pessoas é um problema tão antigo quanto a própria navegação. Desde a antiguidade este problema foi equacionado com o uso de um objeto com peso suficiente e um cabo conectando este objeto à embarcação. Registros indicam que desde os tempos de César, imperador Romano, as embarcações já levavam diversas âncoras para as diversas situações de ancoragem [HINZ, 1986].

A tecnologia de ancoragem avançou muito dos tempos de César até hoje, mas a forma mais usual de manter o posicionamento de unidades flutuantes para produção de petróleo em alto mar ainda é através da utilização de linhas de amarração presas ao fundo por meio de âncoras ou estacas. Este sistema deve ser capaz de garantir uma rigidez tal que o movimento da unidade seja mínimo sem que as forças envolvidas não ultrapassem limites de segurança pré estabelecidos [API, 1996].

No entanto, ao mesmo tempo que garantem ao sistema a rigidez suficiente, as linhas também transmitem as cargas ambientais que sobre elas atuam. Portanto, a escolha correta da topologia da ancoragem e da configuração de cada linha é de fundamental importância na performance do sistema flutuante como um todo. Pode-se citar os sistemas DICAS [GARZA-RIOS, et al., 1997], [MASETTI, 1997] como exemplo da importância da definição da ancoragem .

O problema da escolha da melhor solução é crítico pois tem-se explorado petróleo em profundidades de lâmina d'água cada vez maiores [ROSSI et al., 2001], [D'SOUZA et al., 1992]. Além disso, as plataformas concentram um número cada vez maior de “risers”, aumentando, em magnitude, as forças que atuam sobre o sistema. Esta combinação de maior profundidade com maior número de linhas leva a um aumento da importância do sistema de ancoragem na limitação dos movimentos da plataforma.

Para cada locação da unidade flutuante diversas soluções de amarração são possíveis. Escolher a melhor é uma tarefa difícil. Principalmente numa área de

conhecimento em que não se tem muita experiência anterior acumulada. E, em unidades de perfuração, ou no caso de embarcações de lançamento de dutos como a Balsa de Lançamento BGL-1, da Petrobras [MASETTI et al., 2003], a definição da configuração da ancoragem é uma tarefa rotineira, tendo que ser efetuada diversas vezes num curto período de tempo e muitas vezes em fundos com grande quantidade de obstáculos.

Tem-se, portanto dois aspectos no projeto de ancoragem. A necessidade de uma escolha ótima que garanta menor custo e maior segurança, e a necessidade de ferramentas computacionais que garantam velocidade e confiabilidade nos processos de análise e síntese envolvidos nesta escolha.

Diversas técnicas de otimização podem ser utilizadas para auxiliar uma tomada de decisão deste tipo: sistemas especialistas, redes neurais, otimização não linear, etc. Mas a técnica que nos parece mais promissora, pelas características do problema, é a que utiliza algoritmos evolutivos para a busca de soluções [MAFFRA et al., 2001], [BRITO, 2001], [SANTOS, 2000], [RODRIGUES, 2004].

Os Algoritmos Genéticos inserem-se no grupo dos Algoritmos Evolutivos, no qual estão incluídos também outros métodos como a Estratégia Evolutiva e o método de otimização por Enxame de Partículas.

Neste trabalho estes métodos serão comparados sob o ponto de vista do projeto de ancoragem, e sua aplicabilidade a problemas práticos será avaliada. E uma nova abordagem é proposta para o projeto de ancoragem, baseada em análise acoplada do sistema ancoragem-“risers”-casco e aplicação de algoritmos evolutivos, especialmente o Método do Enxame de Partículas. É proposta também uma modificação na formulação deste método de otimização com o objetivo de aumentar a sua eficiência.

1.4 – Organização do Trabalho

No Capítulo 2 será feita uma breve apresentação dos sistemas mais comuns de exploração de petróleo em alto mar, com ênfase nas linhas de ancoragem.

Nos capítulos 3, 4 e 5 serão apresentados os métodos e metodologias de análise e projeto de sistemas de ancoragem em uso atualmente. O capítulo 3 trata das metodologias de análise, apresentando a análise estática, quase-estática e dinâmica, além de apresentar as metodologias desacoplada e acoplada de análise de movimentos. O capítulo 4 traz os elementos do projeto de ancoragem, como as condições ambientais e as situações a serem analisadas. O capítulo 5 apresenta a formulação para a análise acoplada.

Os capítulos 6 a 8 tratam de otimização. O 6 faz uma apresentação geral do problema de otimização com apresentação de conceitos básicos, o capítulo 7 apresenta com mais detalhes os métodos evolutivos de otimização e o capítulo 8 apresenta as comparações entre os diversos métodos.

Os capítulos 9 e 10 apresentam os exemplos utilizados para verificar a aplicabilidade dos métodos ao projeto de sistemas de ancoragem. No capítulo 9 são detalhados os modelos utilizados e as considerações feitas na montagem destes modelos. O capítulo 10 traz os resultados das comparações.

Capítulo 2: Sistemas de Exploração de Petróleo no Mar

2.1 – Introdução

O conjunto de equipamentos utilizados para exploração e exploração de petróleo no mar são conhecidos como “Sistemas Offshore” e compreendem basicamente 4 grupos: O casco, as linhas, os equipamentos submarinos e os poços.

Por fugir ao escopo deste trabalho não trataremos dos equipamentos submarinos, como “manifolds”, dutos, válvulas, etc. e nem dos equipamentos de perfuração e produção que constituem os poços de exploração de petróleo.

No entanto, o casco, e principalmente as linhas, são de importância fundamental para o desenvolvimento do trabalho e serão analisados mais detalhadamente.

Tanto a fixação das unidades flutuantes por meio de ancoragem, quanto o transporte de óleo e informações entre o fundo do mar e o flutuante são feitos através de estruturas esbeltas comumente chamadas de linhas. As linhas podem ser: ancoragens, “risers”, cabos elétricos e umbilicais. A principal característica das linhas é a sua esbeltez em relação ao comprimento. Sua análise estrutural é complexa devido às grandes não linearidades decorrentes desta esbeltez.

2.2 – Casco

À medida que foram sendo descobertos novos reservatórios de petróleo em lâminas d'água mais profundas, além de 200m, foram necessárias novas unidades de produção. As unidades baseadas em plataformas fixas em uso para profundidades menores não serviam para estas profundidades. Foram desenvolvidas então as plataformas flutuantes. Hoje podemos classificar as plataformas flutuantes em semi-submersíveis, navios, pernas atirantadas (TLP – “Tension Leg Platform”) e SPAR

2.2.1 - Plataforma semi-submersível

As semi-submersíveis (figura 3) são plataformas com estruturas flutuantes largamente empregadas para produção, completação e perfuração. Consistem de um casco compartimentado e composto por flutuadores e colunas. Os flutuadores, também denominados de “pontoons”, apóiam as colunas, também chamadas de pernas, e que por sua vez sustentam os conveses.



Figura 3 – Plataforma Semi-submersível

Devido a pequena área na linha d'água, a plataforma semi-submersível não admite uma variação muito grande de carga sem alterar significativamente o calado. Por isso não é indicada para armazenar o óleo produzido, necessitando de facilidades de exportação deste óleo.

2.2.2 - Navios

Devido a forma do casco os navios são indicados para armazenar o óleo produzido pelos poços, podendo dispensar um sistema de exportação contínua, sendo denominados de Unidade de Produção, Armazenamento e Alívio de Petróleo, ou sua sigla em inglês FPSO (Floating Production, Storage and Offloading Vessel) (Fig 4). Muitas vezes são utilizados como suporte de outras plataformas para armazenar e exportar óleo. Nestes casos são chamados de FSO (Floating Storage and Offloading Vessel).



Figura 4 – Unidade FPSO

2.2.3 – TLP

A TLP (*tension leg platform*) consiste numa estrutura similar à semi-submersível, sendo mantida na locação através de tirantes (pernas) que são ancorados no fundo através de estacas e tracionados no topo pela força resultante entre peso e empuxo (*restauração hidrostática*). Seu casco é semelhante ao casco da plataforma Semi-submersível.

Em relação a outros cascos, o TLP possui movimentos bem menores, o que possibilita que a completação dos poços seja do tipo ‘seca’, isto é, que o controle e intervenção nos poços seja feito na plataforma e não no fundo do mar, reduzindo assim os custos de instalação e produção do poço.

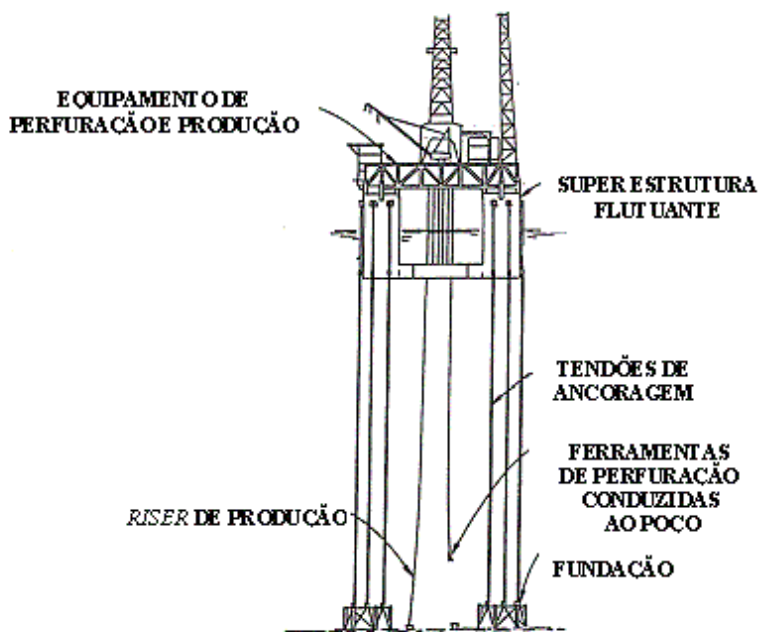


Figura 5 – Tension Leg Platform (TLP)

2.2.4 - Spar

O sistema Spar consiste em um único cilindro vertical de aço de grande diâmetro, ancorado, operando com um calado de profundidade constante de cerca de 200 metros, o que gera apenas pequenos movimentos verticais e, conseqüentemente, possibilita o uso de “risers” rígidos de produção. Neste tipo de plataforma há utilização de supressores de vórtices em torno do cilindro com o objetivo de inibir vibrações induzidas pelo fenômeno de *vortex shedding* gerado principalmente pelas correntes marinhas.

Os sistemas flutuantes estão mais susceptíveis às ações dinâmicas, originadas das ações ambientais, do que as plataformas fixas. Também devido à elevada complacência destes sistemas, as ferramentas numéricas tiveram que se desenvolver de forma a considerar não só os efeitos dinâmicos como também os efeitos não lineares devido aos grandes deslocamentos a que a unidade está sujeita.

2.3 – Risers

Para transportar o óleo e o gás do fundo do mar até às unidades flutuantes ou fixas são necessárias tubulações. Estes tubos suspensos, geralmente dispostos em configurações de catenária, recebem a denominação de “risers” (figura 6) e podem ser flexíveis, formados por camadas alternadas de plástico e aço, ou rígidos, constituídos de aço. “Risers” rígidos também podem ser empregados como proteção externa para a coluna de perfuração durante a exploração do poço, sendo então denominados “riser” de perfuração (figura 6).

Além de trazer o óleo e o gás do fundo para a superfície os “risers” são usados para injetar a água necessária para estimular o poço.

Os cabos elétricos e umbilicais são cabos finos, quando comparados ao “risers” de produção.

Neste trabalho não será feita distinção entre “risers” de produção, injeção, umbilicais e cabos elétricos, sendo todos referenciados como “risers”.



Figura 6 – “Riser” Flexível / “Riser” Rígido de perfuração

2.4 – Linhas de Ancoragem

As linhas de ancoragem têm como função o fornecimento das forças de restauração que mantêm em posição os sistemas flutuantes, tais como, plataformas semi-submersíveis ou navios.

São estruturas esbeltas dispostas em catenária (ancoragem convencional), linhas retesadas (*taut-leg*) ou tendões.

Os materiais mais utilizados nas linhas de ancoragem são as amarras de aço, os cabos de aço e mais recentemente os cabos de poliéster [ROSSI et al., 2001].

Normalmente utilizam-se amarras nos trechos iniciais e finais das linhas de ancoragem por este material ser mais resistente ao manuseio e ao atrito com o fundo, e com os guinchos das plataformas.

2.4.1 - Ancoragem Convencional

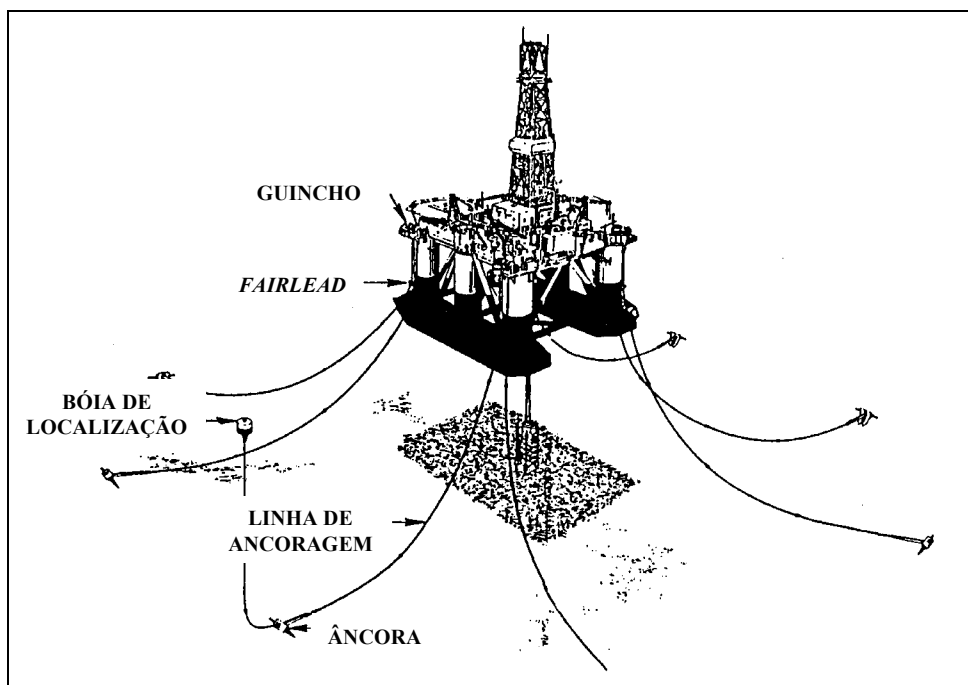
A ancoragem cujas linhas possuem a forma de catenária é denominada de ancoragem convencional (Figura 7). Esta técnica de ancoragem é utilizada em operações de produção ou perfuração. A ancoragem em catenária mantém a unidade flutuante em uma locação através da força de restauração das linhas. As linhas ancoradas são presas ao fundo do mar por âncoras de resistência horizontal.

Uma das características interessantes deste tipo de ancoragem é que o próprio trecho de linha apoiado no fundo contribui com a força de restauração através do atrito com o fundo. No entanto, o custo da linha é aumentado pela necessidade deste grande trecho no fundo, geralmente de amarra.

Para atender aos critérios de projeto para passeio das unidades flutuantes ancoradas, faz-se necessário ter um raio de ancoragem razoavelmente grande. Conseqüentemente, em um campo de exploração de petróleo, isto gera um congestionamento entre as linhas de ancoragem e linhas de uma outra unidade próxima ou com os dutos e com os equipamentos submarinos.

Em relação a um navio, a plataforma semi-submersível é menos sensível à direcionalidade dos carregamentos ambientais, por isso a distribuição simétrica de

linhas de ancoragem em torno da embarcação é mais utilizada. Esta configuração é conhecida como SPM (“Spread Mooring System”).



Fonte : [API,2001]

Figura 7 –Ancoragem Convencional

Os navios, pela forma do casco, tendem mais a se alinhar com os carregamentos de correnteza, onda e vento. Para evitar uma sobrecarga no sistema de ancoragem utiliza-se um sistema no qual as linhas de ancoragem e os “risers” são conectados a uma estrutura em forma de torre. O casco da embarcação liga-se a esta estrutura através de um anel deslizante de tal forma que pode se alinhar com os carregamentos ambientais, girando assim em torno de um ponto limite - a torre. Este sistema é conhecido como SPM (“Single Point Mooring”) (figura 8).

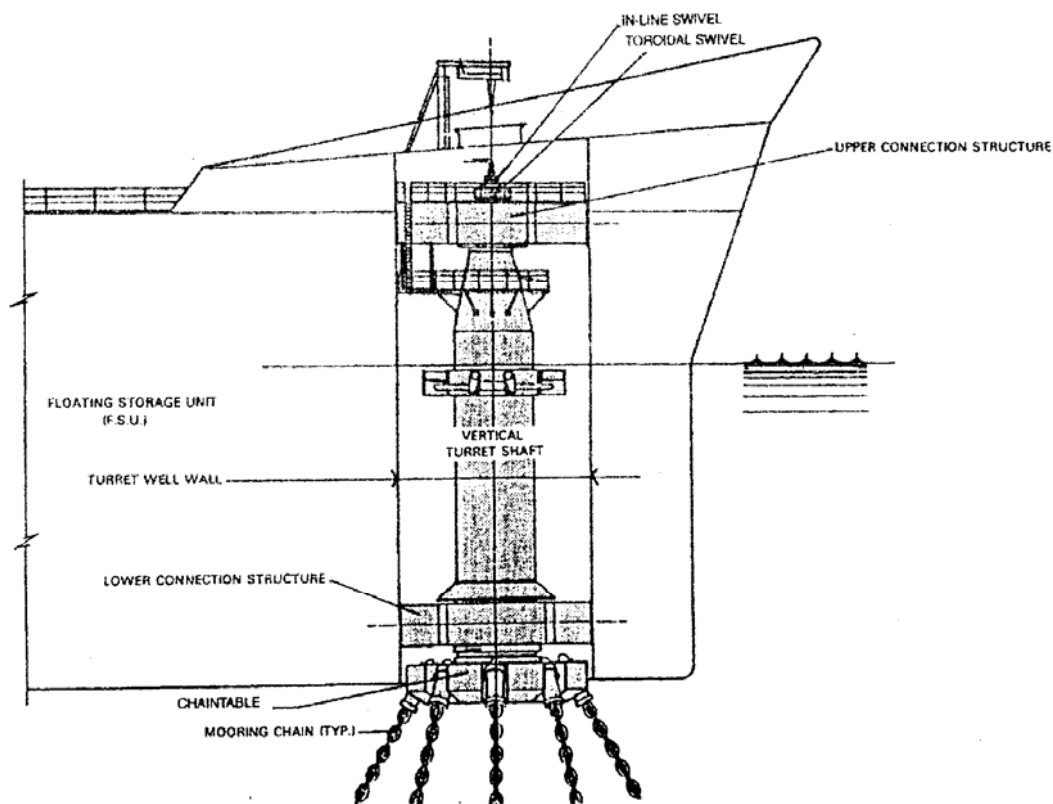


Figure 4—Typical Internal Turret Mooring Arrangement

Fonte : [API,2001]

Figura 8 – “Single Point Mooring”

2.4.2 – Complacência Diferenciada (DICAS)

O sistema de ancoragem descrito anteriormente é bastante eficiente, entretanto o seu custo é bastante elevado. A PETROBRAS desenvolveu um novo sistema de ancoragem [GARZA-RIOS et al.,1997], [MASETTI, 1997] chamado DICAS que constitui-se num sistema com complacência diferenciada entre as linhas de popa e proa da embarcação.

O DICAS foi desenvolvido a partir da experiência adquirida pela PETROBRAS na operação de um FSO no campo de Caravelas na Bacia de Campos em 1993.

As linhas de popa oferecem uma resistência menor aos movimentos da embarcação, permitindo que a mesma se alinhe com as cargas ambientais dentro de um

limite angular (5 a 7 graus). Apesar do custo menor, o sistema só pode ser empregado em locações com pequena variação angular média da resultante do carregamento.

2.4.3 - Linha Retesada (Taut-leg)

A ancoragem Taut-Leg (Figura 9) é constituída por linhas retesadas com um ângulo de topo de aproximadamente 45° com a vertical. Conseqüentemente, tem-se uma projeção horizontal menor do que a obtida com a ancoragem convencional, considerando-se a mesma ordem de grandeza da profundidade da lâmina d’água.

As linhas da ancoragem Taut-Leg são constituídas por cabos de aço ou amarras nas suas extremidades e cabo de poliéster ou aço no seu trecho intermediário.

O maior problema para o uso de sistemas “taut-leg” é a necessidade de âncoras que suportem esforço vertical, por isso são utilizadas estacas de sucção, VLA (“Vertically Loaded Anchors”) ou estacas de fundeio para a fixação das linhas ao fundo.

A ancoragem “taut-leg” é geralmente empregada em sistemas para grandes profundidades pois a ancoragem em catenária demandaria um raio de ancoragem muito grande.

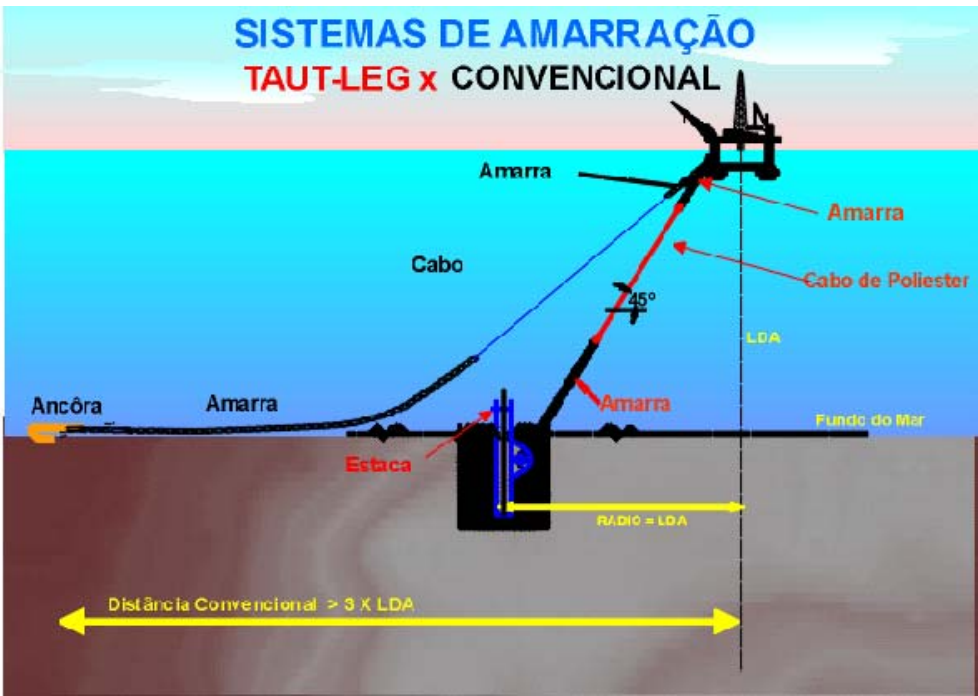


Figura 9 – Sistema de ancoragem Taut-Leg x Convencional

2.4.4 – Tendões

Os tendões são linhas de ancoragem verticais constantemente tracionadas, proporcionando alta rigidez no plano vertical e baixa rigidez no plano horizontal. Podem ser constituídos de cabo de aço ou material sintético

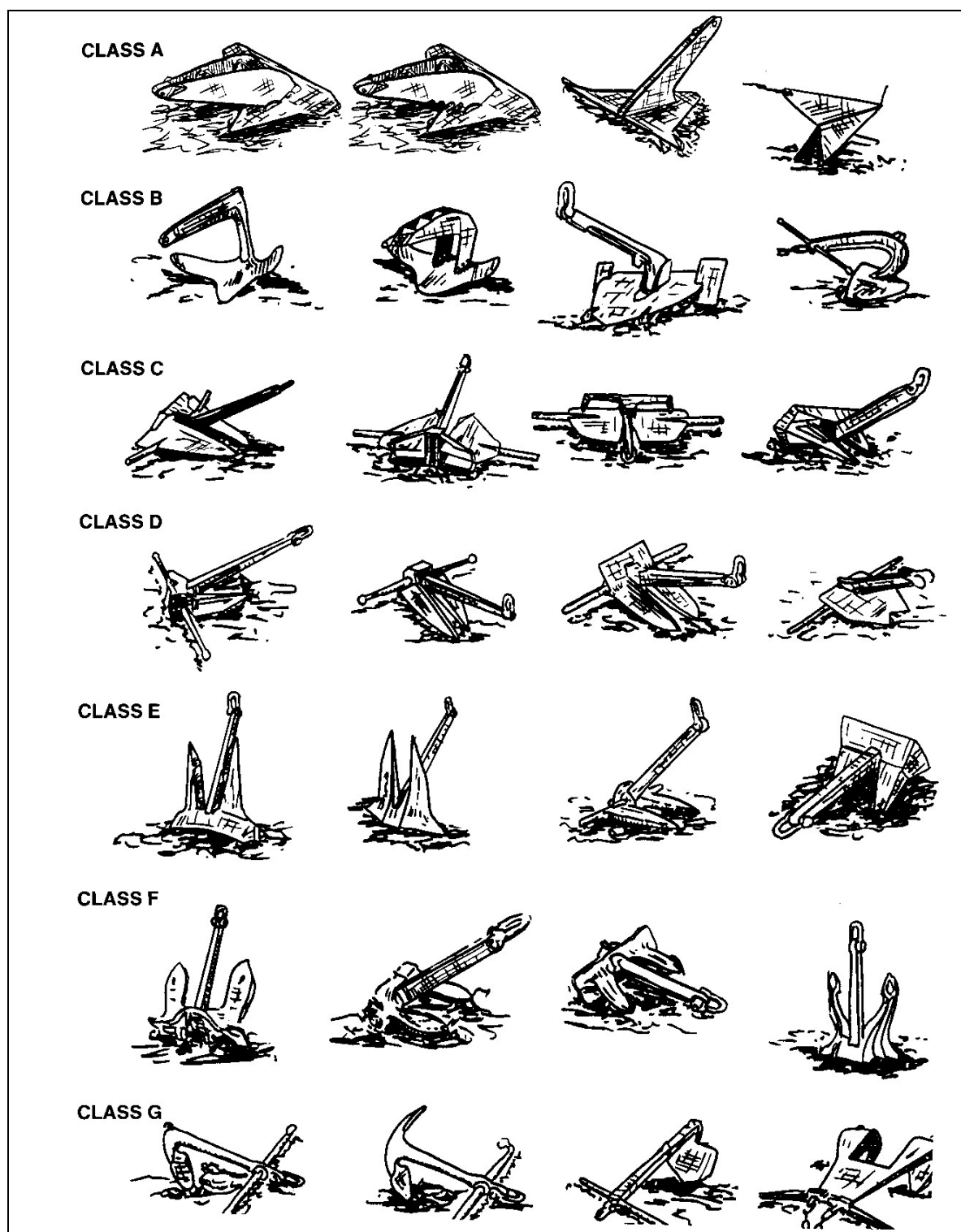
Este tipo de ancoragem é utilizada em sistemas que proporcionem um excesso de flutuabilidade capaz de manter os tendões permanentemente tracionados, como as TLPs ou bóias de sub-superfície.

2.4.5 – Âncoras

A função principal das linhas de ancoragem é manter a posição horizontal de uma unidade flutuante. Para tal a linha deve ter um ponto de fixação ao fundo do mar de forma a transmitir os esforços do sistema para o mesmo. A este ponto dá-se o nome de ponto de ancoragem e o elemento responsável pela fixação deste ponto é chamado de âncora.

O ponto de fixação dependerá da forma de ancoragem utilizada, no que diz respeito a uma característica básica: a capacidade de resistir a cargas verticais.

Na ancoragem convencional, em catenária, o mais comum é utilizar âncoras de arraste (figura 10). Este tipo de âncora resiste bem às trações horizontais e são bastante fáceis de instalar. No entanto, necessitam de um longo trecho de linha apoiado no fundo para garantir que não sofrerão cargas verticais.



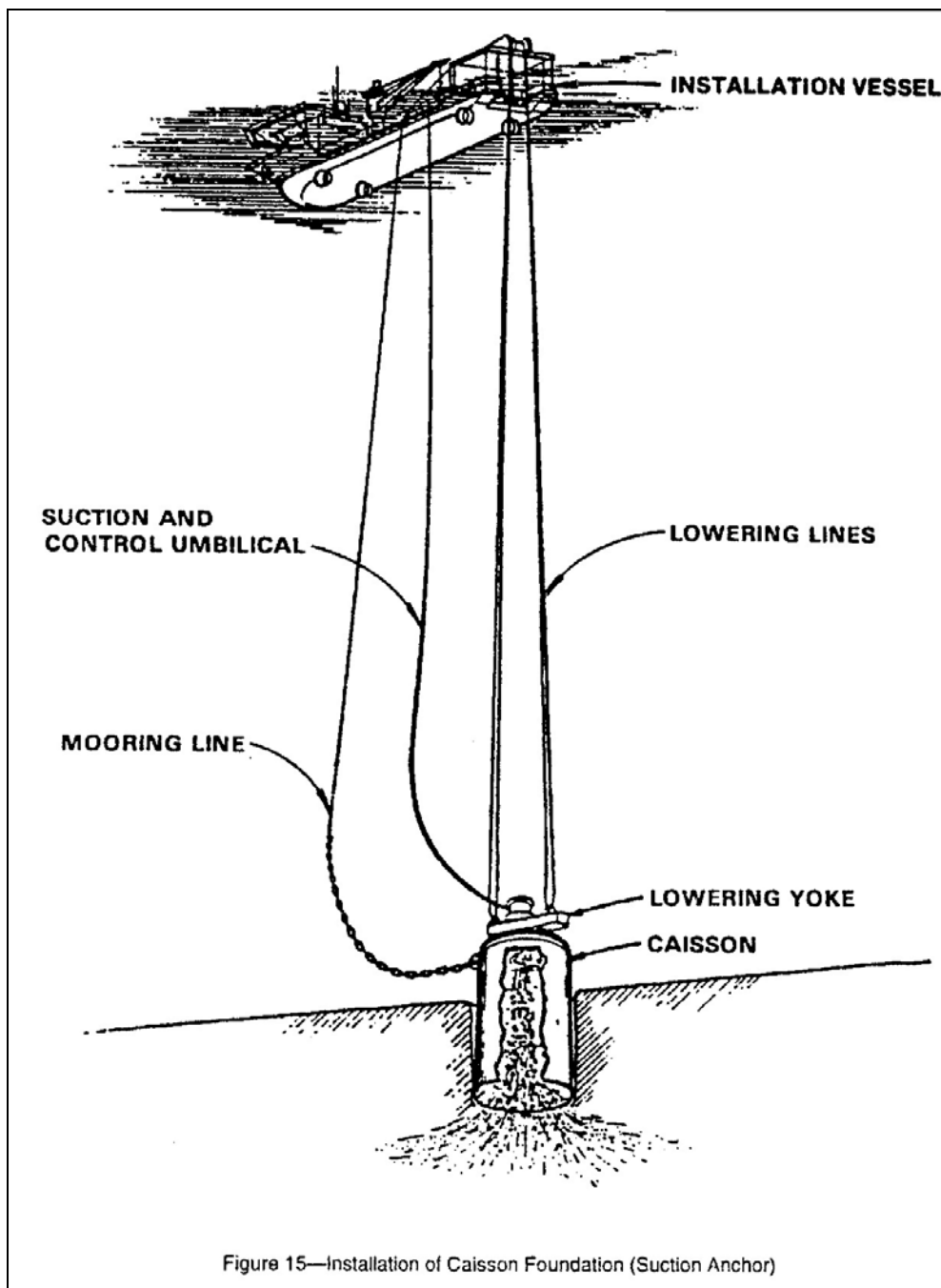
Fonte: Vryhof Ankers BV - Anchor Manual 1990 edition

Figura 10 – Tipos de Âncora de Arraste

No caso de linhas retesadas o ponto de fixação deverá ser capaz de suportar cargas verticais de grande magnitude. Podem ser do tipo âncora VLA (“Vertically Loaded Anchors”) ou estaca.

As estacas mais comuns são:

- Estacas de sucção, ou estacas caixão, que são tubulões de grande diâmetro apoiado no fundo e fechado no topo. Ao se retirar a água do seu interior cria-se uma diferença de pressão que faz com que o tubulão se enterre



Fonte: [API, 2001]

Figura 11 – Estaca de Sucção

- Estacas cravadas por percussão, como as estacas da construção civil, são cravadas por intermédio de batidas no topo
- Estacas torpedo, que são estacas propriamente ditas que são cravadas no fundo por intermédio da força de gravidade. São deixadas cair de uma determinada altura ($\sim 100\text{m}$) e a própria energia da queda faz com que a estaca atinja a penetração necessária no solo.

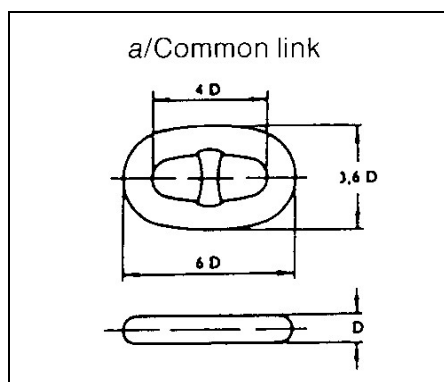
Um estudo mais detalhado sobre âncoras pode ser encontrado em [ELTAHER et al., 2003]

2.4.6 -Amarras

O tipo de amarra mais comumente utilizado na ancoragem de plataformas são as que possuem elos com malhete. As dimensões de um elo de corrente são múltiplos do diâmetro da corrente.

O grau de uma amarra determina a resistência ao escoamento do aço utilizado na sua fabricação. A amarra grau 4 é atualmente a mais resistente, seguida pela ORQ (Oil Rig Quality). Uma amarra grau 3 tem aproximadamente 93 % da tração de ruptura de uma amarra ORQ equivalente.

Existem muitos tipos de componentes utilizados para unir duas partes de corrente. O mais comumente empregado é o elo Kenter. Embora estes elementos tenham carga de ruptura igual ou superior a de uma corrente de mesma dimensão, a durabilidade à fadiga é sensivelmente menor. Portanto, as linhas de ancoragem devem utilizar o menor número possível destes elos de ligação.



Fonte: [VARDARO,2003]

Figura 12 – Elos de Amarra

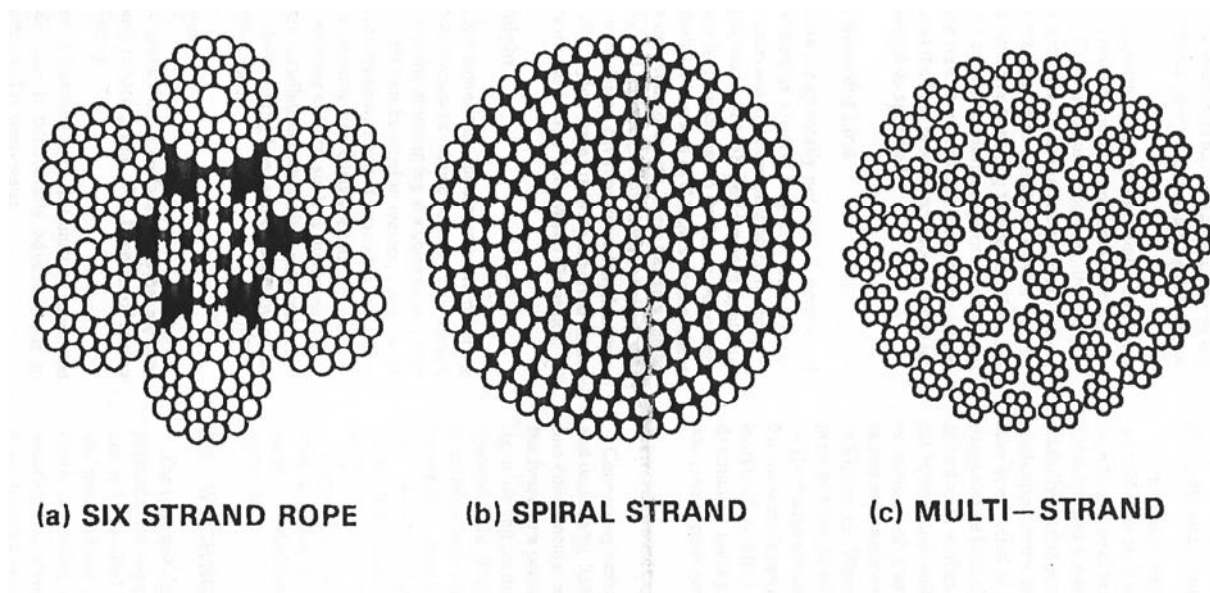
2.4.7 - Cabos de aço

Os principais tipos de cabo de aço empregados na ancoragem de sistemas flutuantes são o “six strand” e o “spiral strand”. Os cabos “six stand” são mais comumente utilizados em unidades de perfuração devido ao seu fácil manuseio. Já cabos do tipo “spiral strand” são empregados mais frequentemente em unidades de produção devido a sua resistência e durabilidade.

Os cabos “spiral strand” com torque balanceado são melhores que os cabos “six stand” e podem ter uma durabilidade muito grande quando são encapados com uma camada plástica. A desvantagem deste tipo de cabo é que ele é mais caro e deve ter um raio de curvatura mínimo (MBR) de aproximadamente $22 \cdot D$, onde D é o diâmetro externo do cabo. Esta limitação dificulta o manuseio e a utilização em guinchos de tambor, o que torna a sua aplicação mais adequada para unidades de produção do que para unidades de perfuração.

A corrosão da trança metálica é um problema que ocorre frequentemente e pode ser diminuído com o emprego de cabos galvanizados. Atualmente, a vida útil de um cabo de ancoragem é bem inferior a vida útil de uma amarra.

Em relação à resistência dos arames que formam o cabo, normalmente são empregados dois tipos: IPS (Improved Plow Steel) ou EIPS (Extra Improved Plow Steel). O cabo com fios EIPS é mais resistente à tração e recomendado para unidades flutuantes.

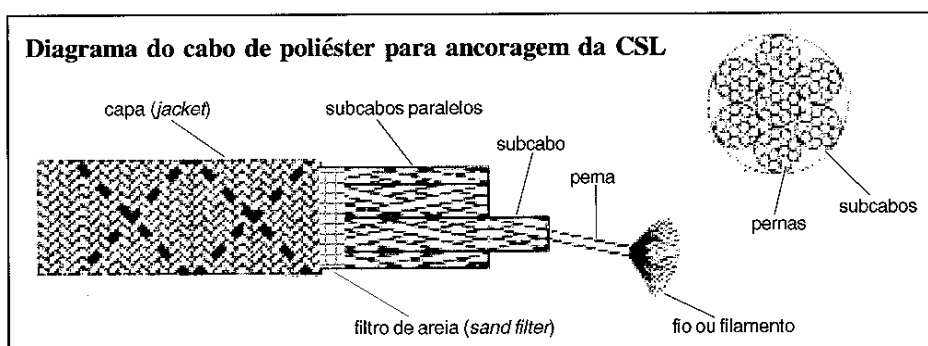


Fonte: [API,1997]

Figura 13 – Cabos de Aço

2.4.8 – Cabos de Poliéster

Cabos de fibra e cordas são formados por fios naturais ou sintéticos, torcidos e retorcidos em forma de hélice, utilizados para tração. Normalmente, classificam-se como cabos todos os cabos sintéticos, e como cordas, todos os cabos e cordas feitos de qualquer fibra.



Fonte: [SENRA,2004]

Figura 14 – Cabo de Poliéster

As fibras mais frequentemente utilizadas são: sisal, polietileno, poliamida (que tem o nome comercial de *nylon*), poliéster (muito utilizado para ancoragem de plataformas, esperando-se que atinja uma vida útil de 20 anos), polipropileno, poliaramida (cuja fibra possui grande módulo de elasticidade e tem nomes comerciais

tais como *Kevlar*, *twaron* e *technora*) e *HMPE* (*High Modulus Polyethylene*, que tem nomes comerciais tais como *dyneema* e *spectra*).

Hawsers sintéticos têm sido usados em sistemas CALM, onde elevada elasticidade é uma importante propriedade. Estes *hawsers* (tipicamente cabo de nylon) podem ser frequentemente inspecionados e substituídos.

Nas linhas de ancoragem, o cabo sintético mais utilizado é o poliéster.

É obtida uma construção de alta eficiência mantendo, tanto quanto possível, as fibras posicionadas formando pequenos ângulos em relação ao eixo do cabo. Atualmente, para atender a este requisito, três construções de cabos estão sendo fabricados: fios paralelos, sub-cabos paralelos e tipo cabo de aço.

A resistência específica (*carga de ruptura/massa por unidade de comprimento*) e a rigidez específica (*((carga/massa por unidade de comprimento)/deformação)* de cabos de poliéster com as três construções mencionadas acima são muito semelhantes. Para as construções de sub-cabos paralelos e tipo cabo de aço, isto se deve ao uso de configurações de baixa torção. Para o cabo de fios paralelos, isso é explicado pela dificuldade em aproveitar-se todo o potencial do fio, devido à variação de propriedades entre filamentos dentro do fio e às diferenças no comprimento dos fios.

Tabela 1 Propriedades do Cabo de Poliéster

CARGA DE RUPTURA NOMINAL (<i>t</i>)	DIÂMETRO APROXIMADO (<i>mm</i>)	CIRCUNFERÊNCIA APROXIMADA (<i>pol</i>)	MASSA APROXIMADA A 2% DA CARGA DE RUPTURA (<i>kg/100m</i>)	
			NO AR	NA ÁGUA
500	120	15	1135	310
630	136	17	1510	415
710	144	18	1645	450
1000	190	24	2450	670

Fonte: [SENRA, 2000]

Para a mesma carga de ruptura, os cabos de fibra de poliéster têm uma constante axial de mola substancialmente mais baixa do que a dos cabos de aço.

O desempenho dos cabos de poliéster, no que diz respeito a manutenção de posição e tensões nas linhas, em um sistema *taut-leg*, é função das características de tensão-deformação dos cabos utilizados. O alongamento pode ser considerado como uma função complexa tanto da carga quanto do tempo.

O alongamento máximo total durante a vida do sistema acontecerá como função da fluência ou em função do processo de instalação, se a âncora for instalada sob grandes cargas.

Capítulo 3: Projeto de Sistemas de Ancoragem

3.1 - Introdução

Considera-se como sistema de ancoragem o conjunto das linhas de ancoragem e suas respectivas âncoras, a disposição das linhas em relação ao fundo e à embarcação e a composição das linhas em relação a tipo de material e comprimentos utilizados.

Como já foi dito, a principal função do sistema de ancoragem é manter a posição do sistema de produção. Por ser um sistema elástico, não será possível manter uma posição exata, invariante, da embarcação. Um passeio horizontal sempre ocorrerá.

No entanto, este passeio deve ser tal que não danifique a estrutura dos “risers” conectados à plataforma, no caso de uma unidade de produção, ou não prejudique a operação de uma unidade de perfuração.

O projeto da ancoragem deve ser tal que garanta que a plataforma não vá derivar mais do que o especificado pelo projeto dos “risers”.

Assim, uma medida de eficiência do sistema de ancoragem é a dimensão do passeio, ou excursão, que a unidade faz sob a condição de tempo mais severa. O passeio é a distância horizontal que a unidade percorre desde a sua posição de equilíbrio neutro até a posição de equilíbrio sob o carregamento ambiental. Este passeio é normalmente medido como um percentual da lâmina d'água.

Quanto mais rígido for o sistema de ancoragem menor será o passeio. No entanto, o tipo de material utilizado nas linhas de ancoragem determinará o limite superior para a rigidez do sistema, pois aumentar a rigidez implica em aumentar as trações aplicadas às linhas, aumentando consequentemente a tensões internas. Estas tensões devem permanecer dentro de um intervalo de segurança [API,1997].

Além disso a composição do sistema deve ser tal que garanta a integridade do mesmo durante o tempo de operação da unidade. Ou seja, o sistema não deve falhar por fadiga.

Temos portanto um ponto ótimo de operação onde o passeio será mínimo com as tensões dentro dos limites de segurança. A determinação deste ponto ótimo é feita através do projeto de ancoragem.

3.2 - Condições Ambientais Para Projeto

Modelos estatísticos são essenciais para a descrição adequada dos parâmetros ambientais, devendo ser aplicados para a avaliação das condições máximas de projeto e operação. Quando se tem um conjunto de medidas de dados ambientais, é importante estabelecer a correspondência entre eles, principalmente para vento e onda, altura e período de onda, onda e corrente e suas direções correspondentes, definindo as probabilidades de ocorrência de cada um e de combinações.

Duas condições ambientais são tipicamente aplicadas em projeto de ancoragem:

- Condição máxima de projeto;
- Condição máxima de operação.

3.2.1 - Condição Máxima de Projeto

A condição máxima de projeto é definida como uma combinação de vento, onda e corrente para a qual o sistema de ancoragem é projetado. É a condição extrema que o sistema deve suportar sem danos.

Ancoragens Permanentes

Normalmente, o critério de projeto adotado para dados oceanográficos é o de 100 anos para a recorrência de um evento. Ou seja, deve-se projetar o sistema para um carregamento ambiental que tem a probabilidade de ocorrer uma vez a cada 100 anos. Análises de risco podem justificar um maior ou menor intervalo de recorrência.

Várias combinações de onda, vento e corrente podem resultar em uma carga extrema. Na prática, a condição máxima de projeto é algumas vezes aproximada pelo uso de vários grupos de critérios de projeto. Por exemplo, no caso de condição ambiental de projeto de 100 anos [DNV, 2001]:

- a) Vento médio e onda correspondendo a 100 anos de período de retorno, combinado com uma corrente de 10 anos de período de retorno;

- b) Velocidade de corrente e onda correspondendo a 100 anos de período de retorno, combinado com uma velocidade de vento de 10 anos de período de retorno;

Deve-se adotar a combinação direcional mais desfavorável de forças de vento, onda e corrente.

Ancoragens Provisórias

Entende-se como ancoragem provisória, os sistemas que permanecerão menos de 5 anos em uma locação, como, por exemplo as plataformas de perfuração. Para estes sistemas as condições ambientais de projeto podem ser amenizadas.

- a) Operações longe de outras estruturas – período de retorno mínimo de 5 anos. Para análises de risco, um período de retorno reduzido pode ser determinado, mas nunca menor que 1 ano;
- b) Operações próximas a outras estruturas – devem ser determinadas por uma análise de risco que avalia a consequência da falha da ancoragem. Entretanto, esta deve ter um período de retorno mínimo de 10 anos.

3.2.2 - Condição Máxima de Operação

A condição máxima de operação é efetivamente a combinação de máximos de vento, onda e corrente em que operações de produção e/ou perfuração podem ser conduzidas. O critério ambiental de operação deve ser conhecido pela pessoa responsável pela operação de perfuração ou produção, de modo que planejamentos de saída de operação possam ser preparados em ocasiões necessárias. Geralmente, estas condições são menos rigorosas que as condições máximas de projeto.

Em algumas operações, onde o sistema de produção flutuante é designado a continuar produzindo durante uma tempestade severa, a condição máxima de operação será a mesma que a condição máxima de projeto [API, 1997].

3.3 - Situações a serem Analisadas

A norma API RP 2SK [API, 1997] sugere a determinação de diferentes situações para a análise do sistema de ancoragem, de acordo com o tipo de ancoragem, se permanente ou temporária, e a fase de projeto. As situações intacta e avariada precisam ser avaliadas através de técnicas de análise quase-estática ou dinâmica. Além disso, uma análise para a situação transiente é algumas vezes requerida. A tabela seguinte apresenta um resumo das técnicas e situações de análise aplicadas a cada tipo de ancoragem.

Tabela 2 Técnicas de análise aplicadas a ancoragem

TIPOS DE ANCORAGEM		TÉCNICA DE ANÁLISE	SITUAÇÕES A SEREM ANALISADAS
Ancoragem Permanente	Pré-projeto	Quase-estática ou dinâmica	Intacta e avariada
	Projeto Definitivo	Dinâmica	Intacta, avariada e transiente
	Fadiga	Dinâmica	Intacta
Ancoragem Móvel	Longe de outras estruturas	Quase-estática ou dinâmica	Intacta
	Linhas de ancoragem próxima a dutos	Quase-estática ou dinâmica	Intacta e avariada
	Embarcação próxima a uma plataforma	Quase-estática ou dinâmica	Intacta, avariada e transiente

Fonte: [API, 1997]

3.3.1 - Situação Intacta

É a situação em que todas as linhas são consideraradas intactas, e a posição de equilíbrio da embarcação sob cargas permanentes é baseada no conhecimento do comportamento carga-passeio do sistema de ancoragem.

3.3.2 - Situação Avariada

Nesta situação considera-se que houve o rompimento de uma linha de ancoragem e a embarcação tende a buscar uma nova posição de equilíbrio. A retirada de uma linha de ancoragem reduz o somatório de forças das linhas de ancoragem presentes. Com uma linha rompida, a rotação do sistema de ancoragem pode tornar-se grande e o ângulo da linha em relação aos eixos da embarcação pode mudar significativamente, devendo ser considerados na técnica de solução.

Atualmente já se avalia também a situação com o rompimento da segunda linha mais carregada.

3.3.3 - Situação Transiente

Se uma linha rompe, uma carga repentina é transmitida da linha de ancoragem para a embarcação. Isto resulta na perda da posição de equilíbrio estático e oscilações do período natural da ancoragem. Estas oscilações são atenuadas e a embarcação se acomoda em uma posição de equilíbrio danificada.

Devido ao fato da rigidez e amortecimento da ancoragem serem não-lineares é preciso executar uma simulação no domínio do tempo das equações de movimento, definindo-se, o instante em que a linha de ancoragem se rompe, causando o transiente. Não está claro atualmente em que momento a ruptura de uma linha resultará num pico de tensão máxima no sistema.

3.3.4 - Análise de Fadiga

Fadiga não tem mostrado ser o principal mecanismo de falha para linhas de ancoragem [NOBLE DENTON, 1996]. O cálculo de vida à fadiga para linhas de ancoragem é fortemente dependente da oscilação de tração induzida pelos movimentos na frequência da onda.

Neste trabalho não será tratado o problema de fadiga as linhas.

3.4 – Otimização de Sistemas de Ancoragem

Diversos trabalhos já foram desenvolvidos abordando a otimização de sistemas de ancoragem.

Uma interessante abordagem do problema de otimização de sistema de ancoragem é feita por [FERRARI, 1993]. A otimização é baseada na distribuição direcional das forças ambientais incidentes. O arranjo de linhas e o aproamento da plataforma são otimizados, bem como a composição das linhas.

[BULGARELLI et al., 1997] propõe uma otimização baseada em análise dinâmica das linhas, mas com uma grande simplificação da aplicação, onde somente um carregamento é considerado e poucas variáveis de projeto são utilizadas.

[FYLLING, 1997], apresenta um interessante trabalho em otimização de sistemas de ancoragem, onde são considerados vários carregamentos ambientais e uma boa definição das linhas de ancoragem. Fylling conclui que a otimização de sistemas de ancoragem é factível, e que a análise utilizada no método (domínio da frequência) ainda deve ser melhorada. Foi utilizado um método de otimização direto, baseado em gradiente.

[SANTOS, 2000] e [MAFFRA et al., 2001] apresentam aplicações de algoritmos evolutivos a sistemas de ancoragem, sendo que [SANTOS, 2000] aplica Estratégia Evolutiva à otimização do sistema de ancoragem de um FPSO, e [MAFFRA et al., 2001] apresenta um trabalho com aplicação de algoritmos genéticos à otimização de sistemas de ancoragem com bons resultados. Um aspecto interessante deste trabalho é que, ao invés do custo do sistema de ancoragem, a função de mérito representa o passeio da embarcação, avaliado em várias condições de mar. Os resultados obtidos são bastante interessantes, apesar dos autores reconhecerem que o algoritmo precisa ser revisado para aplicações práticas.

[ROSSI et al., 2001] apresenta um programa baseado em sistemas especialistas para apoio ao projeto de ancoragens de plataformas de perfuração (MODU) em águas profundas. Este programa mostrou-se bastante eficiente, contando com interface gráfica para verificação do projeto, e é utilizado na prática diária de ancoragens de plataformas de perfuração na Bacia de Campos(SEANC).

Atualmente, a PETROBRAS utiliza o programa EXMOOR, que possui um algoritmo de síntese e otimização de ancoragem, e utiliza análise quase-estática para a análise de movimentos e algoritmo de Box para a otimização [AUGUSTO et al., 1998].

Ainda como otimização, poder-se-ia citar os trabalhos de [AUGUSTO et al., 2002] e [SOUZA et al., 2001]. O primeiro trata da otimização da operação de instalação de âncora, onde as trações envolvidas e os comprimentos dos cabos utilizados são otimizados para um melhor aproveitamento dos recursos. O segundo trata da otimização de um cabo de ancoragem em função das trações envolvidas. Este trabalho apresenta uma abordagem bastante interessante em relação ao problema da otimização, utilizando lógica fuzzy e algoritmos genéticos.

Capítulo 4: Metodologia de Análise de Sistemas de ancoragem

4.1 – Introdução

Tradicionalmente, são utilizadas duas aproximações de análise para determinar a resposta do sistema [API, 1997]:

- Análise quase-estática;
- Análise dinâmica.

A análise dinâmica se faz necessária nas seguintes situações:

- Nos casos onde a embarcação apresentar grandes valores de resposta na frequência da onda. Assim, uma embarcação tipo navio irá requerer análises dinâmicas das linhas mais frequentemente do que uma semi submersível;
- Quando a profundidade da lâmina d'água exceder 200 m;
- Quando a configuração da linha de ancoragem contiver grandes elementos de arrasto;
- Quando for necessário fazer uma análise de fadiga, devido à significativa componente de tensão dinâmica na linha.

4.2 - Análise Quasi-estática

A análise quase-estática avalia o sistema de ancoragem aplicando-se um offset estático, causado pelas condições ambientais estáticas e dinâmicas sobre a unidade.

Cálculo das Tensões

As forças permanentes de deriva de vento, corrente e onda sobre a embarcação, são previamente calculadas e aplicadas sobre o sistema de ancoragem, resultando em uma posição de equilíbrio, derivada de uma rigidez estática não-linear do sistema, onde são avaliadas as tensões máximas nas linhas.

Cálculo de Offsets

Ambas as normas, API RP 2SK [API, 1997] e DNV/POSMOOR [DNV, 2001], sugerem que o offset máximo deve ser determinado pelo seguinte procedimento:

$$\text{Se } S_{lfmax} > S_{wfmax} , \text{ então } S_{max} = S_{mean} + S_{lfmax} + S_{wfsig}$$

$$\text{Se } S_{wfmax} > S_{lfmax} , \text{ então } S_{max} = S_{mean} + S_{wfmax} + S_{lfsig}$$

Onde:

S_{mean} = Offset médio da embarcação;

S_{max} = Offset máximo da embarcação;

S_{wfmax} = Movimento na frequência da onda máximo;

S_{wfsig} = Movimento na frequência da onda significativo;

S_{lfmax} = Movimento de baixa frequência máximo;

S_{lfsig} = Movimento de baixa frequência significativo.

A análise quasi-estática é um dos métodos mais utilizados para a análise de sistemas de ancoragem de unidades flutuantes [VARDARO, 2003]. Neste método o comportamento das linhas de ancoragem é descrito pela equação da catenária.

Este método consiste nas seguintes etapas:

1. Seleciona-se um padrão geométrico de ancoragem e as dimensões dos componentes do sistema. Determina-se a curva característica das linhas ($T \times D$), a curva comprimento suspenso ($L \times D$) e a curva de restauração do sistema de ancoragem ($F_h \times D$); Onde D é o deslocamento do topo, T a tração, L o comprimento suspenso e F_h a força de restauração horizontal.
2. Considerando os esforços constantes de vento, correnteza e onda, agindo na mesma direção, determina-se a deriva média (“offset” estático), tração média e rigidez do sistema de ancoragem, a partir das curvas $F_h \times D$ e $T \times D$;
3. Determina-se o movimento de baixa frequência e, posteriormente a parcela dinâmica de deriva (“offset” dinâmico) superpondo-se com o movimento de primeira ordem (alta frequência). A forma de combinar estes movimentos é sugerido pelo API RP 2SK [API, 1997] e DNV POSMOOR [DNV, 2001].
4. A deriva máxima (“offset” máximo) é obtida somando-se a deriva média com a parcela dinâmica, obtendo-se a tração máxima na linha da curva ($T \times D$) e o comprimento de linha suspensa da curva ($L \times D$).
5. Verifica-se se o sistema de ancoragem atende aos requisitos e critérios de projeto. Caso os requisitos e critérios não sejam satisfeitos, repetir os itens (1) a (4).

4.3 – Análise Dinâmica

Dois métodos são utilizados para a predição da resposta dinâmica das linhas: análise no domínio da frequência e no domínio do tempo.

4.3.1 – Domínio da Frequência

A análise no domínio da frequência, como o próprio nome diz, analisa o problema decompondo os movimentos envolvidos em função de sua frequência. É uma análise linear, e portanto é necessária a linearização de todas as não linearidades envolvidas tais como: deformações, geometria, carga devido ao fluido e interação com o fundo.

4.3.2 – Domínio do Tempo

Na análise no domínio do tempo todas as não linearidades podem ser modeladas. Tanto as não linearidades geométricas quanto as físicas. A posição das linhas é atualizada a cada intervalo de tempo e a interação com o fundo pode ser calculada incluindo-se um modelo friccional.

Como é necessário recalcular cada termo de massa, amortecimento, rigidez e carga a cada intervalo de tempo, a análise no domínio do tempo utiliza mais recurso computacional, como tempo e memória, do que a análise no domínio da frequência. No entanto, com o custo dos equipamentos cada vez menor e o poder de processamento instalado cada vez maior, a utilização da análise no domínio do tempo como ferramenta de projeto está cada vez mais acessível.

4.4 - Metodologia Desacoplada

As metodologias e critérios de projeto adotados pelas empresas de petróleo, inclusive a Petrobras, não têm tipicamente considerado a integração no projeto de sistemas de ancoragem e “*risers*”, sendo executados por equipes distintas de projetistas [SENRA, 2004].

Uma maior integração no projeto pode começar pela consideração, de forma mais adequada, da contribuição dos “*risers*” como parte do sistema ancorado, em termos de cargas hidrodinâmicas, rigidez, amortecimento e massa adicionada.

A forma mais rigorosa de se efetuar um projeto integrado, que pode ser considerada em fases mais avançadas do projeto, é empregando um programa baseado em uma formulação totalmente acoplada, capaz de fornecer, em uma única análise, tanto os movimentos do casco quanto uma análise estrutural detalhada do sistema de ancoragem e dos “*risers*”. Para tal, seria necessária a representação de todas as linhas através de uma malha de Elementos Finitos consideravelmente refinada.

Devido ao fato de várias dezenas de “*risers*” poderem estar conectados à unidade flutuante, percebe-se que a utilização de programas acoplados pode requerer custos computacionais excessivamente elevados comprometendo assim a viabilidade da análise. Sendo assim, é necessário estabelecer níveis diferentes de integração e complexidade em fases distintas do projeto, justificados pelo compromisso entre custo e benefício potenciais.

A seguir são descritas, sucintamente, as características dos métodos desacoplado e acoplado.

No procedimento “desacoplado”, duas etapas distintas podem ser identificadas:

A primeira etapa consiste na análise de movimentos da unidade flutuante, na qual as linhas são representadas de forma simplificada, por modelos escalares, podendo ser uma análise dinâmica ou quase-estática;

A segunda etapa consiste na análise estrutural das linhas, representadas por um modelo de Elementos Finitos, aplicando-se no topo os movimentos da unidade flutuante, calculados na 1ª etapa.

A seguir, apresenta-se uma breve descrição destas etapas.

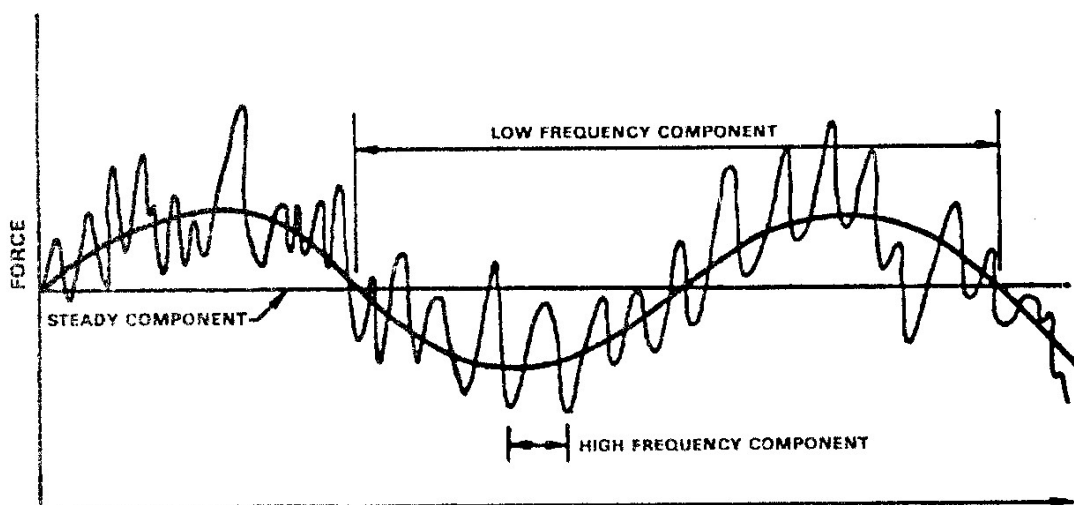
4.4.1 - Análise de Movimentos da Unidade Flutuante

A primeira etapa, que é tradicionalmente associada ao **projeto do sistema de ancoragem**, consiste em efetuar análises de modelos hidrodinâmicos da unidade flutuante, para a determinação dos movimentos, estimativa das trações nas linhas de ancoragem e comparações destes resultados com os valores estabelecidos nos critérios de projeto.

A ação do vento, da correnteza e da onda geram esforços sobre uma unidade flutuante ancorada no mar. Estes esforços devem ser resistidos pelo sistema de ancoragem e normalmente são divididos nas seguintes parcelas:

- Esforços constantes que não variam ao longo do tempo;
- Esforços de alta frequência que têm um período de variação na faixa do período das ondas (5 ~ 15 s);
- Esforços de baixa frequência que têm um período de variação muito maior que o período das ondas (150 ~ 300 s).

Estes esforços sobre a unidade flutuante farão com que a mesma perca o seu equilíbrio neutro inicial e busque uma nova posição de equilíbrio dinâmico.



Fonte: [API, 2001]

Figura 15 – Componentes de força de onda

Nestas análises, as linhas de ancoragem são representadas por coeficientes escalares, incorporados na equação de movimento da unidade flutuante para representar rigidez, massa, amortecimento e parcela de carga de correnteza nas linhas, como ilustrado na figura 16. Estes coeficientes podem ser determinados a partir de modelos analíticos simplificados (por exemplo, baseados na equação da catenária) ou calibrados a partir de modelos experimentais. A contribuição dos “*risers*” também deve ser incluída no cálculo destes coeficientes, mas, em muitas aplicações práticas, têm sido simplesmente ignorada.

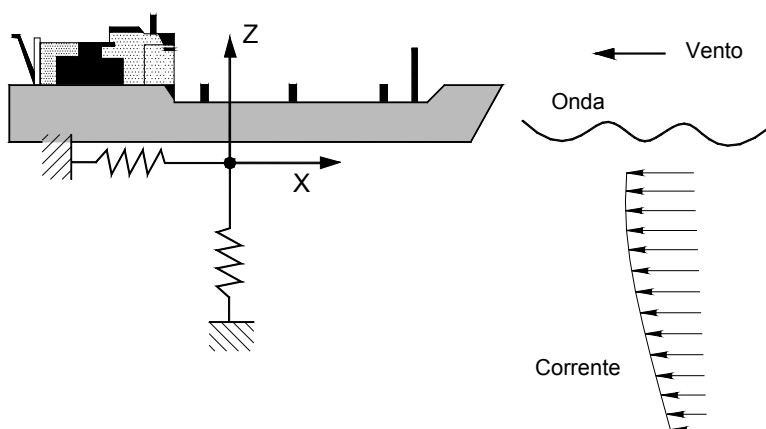


Figura 16 – Modelo desacoplado

A **rigidez** das linhas sobre a embarcação é normalmente representada por molas lineares ou molas não-lineares (associadas a curvas de restauração). No DMOOR, que é um dos programas de análise e projeto do sistema de ancoragem adotado pela Petrobras, apenas a rigidez linear das linhas de ancoragem é calculada, sem fazer qualquer consideração sobre a rigidez dos “*risers*”. Para levar em consideração a rigidez dos “*risers*”, é necessário montar um modelo de Elementos Finitos, à parte, com todas as linhas de “*risers*”, para a determinação de sua rigidez e, em seguida, adicioná-la à rigidez das linhas de ancoragem.

A parcela da **massa** das linhas de ancoragem e “*risers*” que afeta os movimentos da embarcação é estimada como uma fração da massa das linhas. Nos

procedimentos recentes adotados pela Petrobras, não é usual considerar a contribuição das linhas para o **amortecimento**.

A parcela da **carga de correnteza** nas linhas de ancoragem e “*risers*” sobre a embarcação é considerada como uma carga concentrada, somada no lado direito da equação de movimento.

Em uma análise dinâmica, a resposta da linha de ancoragem pode ser obtida tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência.

A aproximação no domínio da frequência usa o princípio da superposição linear. Desta forma, os termos não-lineares precisam ser linearizados para a análise.

Na aproximação no domínio do tempo, todos os efeitos não-lineares podem ser modelados. Neste caso, a análise pode ser feita com um modelo de onda regular determinística ou onda irregular aleatória. Para cada passo de tempo, os termos da massa, amortecimento, rigidez e carga são recalculados. A norma [API, 1997] sugere que o pico de tração na linha na frequência da onda pode ser determinado, primeiro gerando uma série temporal para a duração da tempestade (usualmente 3 horas), e depois calculando a resposta de tração. Por causa da natureza aleatória do problema, a tração máxima na frequência da onda deve ser determinada também por:

- Várias simulações de tempestade, ajustando uma distribuição estatística de máximos para os picos das simulações. Esta distribuição é usada para determinar a tração máxima esperada na frequência da onda;
- Modificando a tração máxima pelo fator de Rayleigh depois de uma única análise.

4.4.2 - Análise Estrutural dos Risers

A segunda etapa do procedimento desacoplado, é, tradicionalmente, associada ao **projeto dos “risers”** e consiste em efetuar análises de modelos de Elementos Finitos de um “*riser*”, sob a aplicação, no topo, dos movimentos da unidade flutuante calculados na 1ª etapa, bem como dos carregamentos de onda e correnteza ao longo da linha. O

objetivo destas análises é obter a resposta estrutural do “riser”, de forma que os esforços nos trechos mais críticos possam ser comparados aos critérios de projeto.

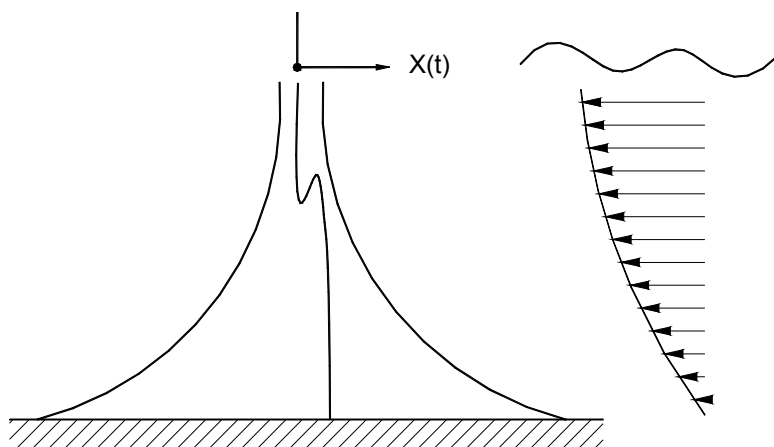


Figura 17 – Plataforma como modelo hidrodinâmico.

No procedimento atual para o projeto de “risers”, definem-se situações de carregamento *Near*, *Far*, *Cross* e *Transverse*. Para cada uma destas situações, a resposta dinâmica no domínio do tempo é determinada através da seguinte sequência de análises:

Inicialmente, efetua-se uma análise não-linear estática para a determinação da configuração de equilíbrio, sob ação das parcelas estáticas do carregamento: peso próprio, correnteza, pré-tração e *offset* estático da embarcação (determinados na análise da ancoragem). O carregamento é aplicado incrementalmente. No primeiro passo aplica-se apenas a carga total do peso próprio, e nos demais, aplica-se incrementalmente a correnteza e o *offset* estático (como deslocamento prescrito no nó do topo do “riser”). Para a situação *Far*, o *offset* estático da embarcação e a correnteza são aplicados de modo a afastar o nó do topo do ponto da âncora. Para a situação *Near*, este carregamento é aplicado no sentido inverso, de modo a aproximar o nó do topo do ponto da âncora. Para a situação *Cross*, o carregamento é aplicado na direção perpendicular ao plano da linha. Para a situação *Transverse*, o carregamento é aplicado a 90 graus do plano da linha.

4.5 – Metodologia Acoplada

A prática de projeto “desacoplada” tem sido utilizada com relativo sucesso em projetos de unidades flutuantes de maior porte, mas com um número relativamente pequeno de “*risers*” conectados e em águas pouco profundas.

No entanto, à medida que avança a exploração de campos em águas cada vez mais profundas e um número cada vez maior de “*risers*” é empregado, tem sido reconhecido que as simplificações decorrentes desta prática de projeto “desacoplada”, na qual a interação entre o casco e as linhas não é considerada de forma rigorosa, podem ter efeitos prejudiciais e penalizar seriamente a qualidade dos resultados.

A necessidade de abordagens que considerem a simulação acoplada de uma formulação completa das linhas com as equações de movimento do navio é apresentada por [MASETTI, 1994], [NOBLE DENTON, 1996], [MASETTI, 1997], [NOBLE DENTON, 1998] e [PORTELLA, 2001].

Este fato motivou o desenvolvimento de programas baseados em uma formulação *acoplada*, como o programa PROSIM [JACOB, 2005] que foi o primeiro a utilizar esse conceito de análise acoplada. Este programa vem sendo desenvolvido desde 1997, de forma cooperativa por pesquisadores da Petrobras e do LAMCSO – Laboratório de Métodos Computacionais e Sistemas Offshore, do PEC/COPPE/UFRJ.

Nesta nova abordagem o casco e as linhas de ancoragem e “*risers*” são analisados em conjunto durante uma simulação estática ou dinâmica. Com isso os efeitos de interação de massa e amortecimento de todos os elementos do sistema podem ser melhor avaliados. No capítulo 5 será apresentado um resumo da formulação matemática utilizada pelo PROSIM e no capítulo 8 serão apresentados os modelos acoplados utilizados neste trabalho.

Capítulo 5: Formulação para Análise Acoplada

5.1 – Introdução

Neste capítulo será apresentada, de forma sucinta, a formulação utilizada pelo programa PROSIM para análise acoplada.

No presente trabalho, será utilizada somente o módulo de análise estática do referido programa. Isto se justifica pois o enfoque principal do trabalho é na viabilidade do uso dos algoritmos evolutivos à otimização de sistemas de ancoragem, e a análise estática atende bem como ferramenta de análise simplificada.

5.2 - Equações De Movimento Da Unidade Flutuante

O procedimento de análise acoplada é baseado na integração numérica no domínio do tempo das equações de movimento de corpo rígido da plataforma.

Nesta seção, apresenta-se de forma resumida a formulação das equações de movimento de grande amplitude que representam os movimentos de corpo rígido da plataforma. Maiores detalhes sobre a formulação podem ser encontrados em [MEIROVICH, 1970].

As equações de movimento consideram efeitos não lineares geométricos decorrentes de grandes deslocamentos do corpo. Além disso, outros efeitos não-lineares são considerados na formulação do modelo acoplado, relacionados ao comportamento hidrodinâmico na interação fluido-estrutura (incluindo a força de arrasto viscosa, função quadrática da velocidade relativa entre o fluido e o corpo), e à interação não-linear com as linhas de ancoragem e “*risers*” modelados por elementos finitos, configurando o modelo acoplado.

5.2.1 - Sistemas de Referência

Sistema Global Geral (Constante, “inercial”)

O sistema de coordenadas **global geral** (X,Y,Z) primário, único, é definido inicialmente, e é em relação a ele que estarão referenciados todos os demais sistemas (figura 18). Os eixos X e Y deste sistema global estão contidos em um plano horizontal, e o eixo Z corresponde à direção vertical, orientado de baixo para cima.

As coordenadas dos nós da malha de elementos finitos que representam as linhas no modelo acoplado são expressas neste sistema global geral (eventualmente também referido como o sistema “inercial”).

Sistema Estrutural da Plataforma (Móvel, “Fixo no Corpo”)

Define-se também um sistema de coordenadas **estrutural** (x,y,z) , específico da unidade flutuante. Trata-se de um sistema **móvel** que acompanha os movimentos do corpo.

As equações são expressas nos sistemas inercial e/ou móvel, de acordo com a conveniência da formulação.

A definição da posição inicial da origem do sistema estrutural (x,y,z) , em relação ao sistema global geral (X,Y,Z) , é feita através de três valores que definem a distância de sua origem até a origem do sistema global geral, e de um quarto valor que representa o ângulo, em graus, que define o aproamento da unidade flutuante. Este ângulo é medido no plano horizontal, entre o eixo X global geral e o eixo x estrutural da unidade.

Sistema Local dos Membros da Plataforma e dos Elementos Finitos das Linhas

Finalmente, cada elemento da malha de elementos finitos para as linhas, e cada membro reticulado da plataforma tem seu próprio sistema de referência **local** $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$.

As propriedades dos elementos ou membros devem ser fornecidas neste sistema local. A origem deste sistema está localizada no nó 1 do membro. A direção local $\bar{x}$ coincide com o eixo do membro, e é orientada do nó 1 para o nó 2; as direções locais $\bar{y}$ e $\bar{z}$, ortogonais a $\bar{x}$, estão contidas na seção transversal do membro. Para um membro com orientação geral no espaço, a direção local $\bar{x}$ é horizontal, e a direção local $\bar{z}$ é perpendicular às direções $\bar{x}$ e $\bar{y}$. Para um membro horizontal, a direção local $\bar{z}$ é vertical, paralela ao eixo global Z. Para um membro vertical, a direção local horizontal $\bar{y}$ é paralela ao eixo global Y. Por sua vez, a direção local $\bar{z}$, também horizontal, é paralela ao eixo global X (mas em sentido contrário).

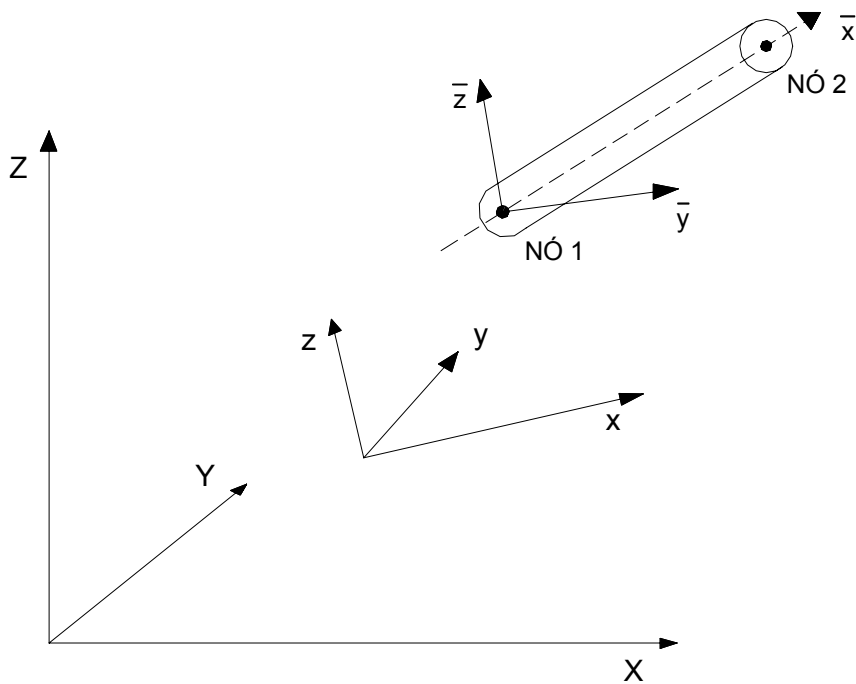


Figura 18 – Sistemas de Referência

5.2.2 - Formulação das Equações de Movimento

O deslocamento do corpo pode ser expresso como o somatório de uma translação da origem do sistema de coordenadas estrutural da plataforma, e uma rotação em torno de um eixo passando pela origem do sistema estrutural:

Deslocamento de Translação

A translação $\mathbf{x}_l(t)$ é expressa pela variação da origem do sistema estrutural da plataforma (x,y,z) , medida em relação ao sistema global (X,Y,Z) . As componentes de $\mathbf{x}_l$ são $x_{l1}(t)$, $x_{l2}(t)$, $x_{l3}(t)$.

Deslocamento de Rotação

De forma similar, o movimento de rotação é a variação angular dos eixos do sistema estrutural em relação ao sistema global. Para expressar a posição relativa rotacional desses dois sistemas de referência, empregam-se os *ângulos de Euler*, denominados γ , β , α . A sequência de rotações que define estes ângulos é descrita a seguir e ilustrada na figura 19.

- Assume-se que originalmente o sistema da plataforma (x,y,z) e o sistema global (X,Y,Z) são coincidentes.
- Inicialmente, a plataforma gira em torno do seu eixo-z através do ângulo de yaw γ .
- Em seguida, a partir da posição resultante, gira em torno do eixo-y através do ângulo de pitch β ;
- Finalmente, a partir desta última posição, gira em torno do eixo-x através do ângulo de roll α .

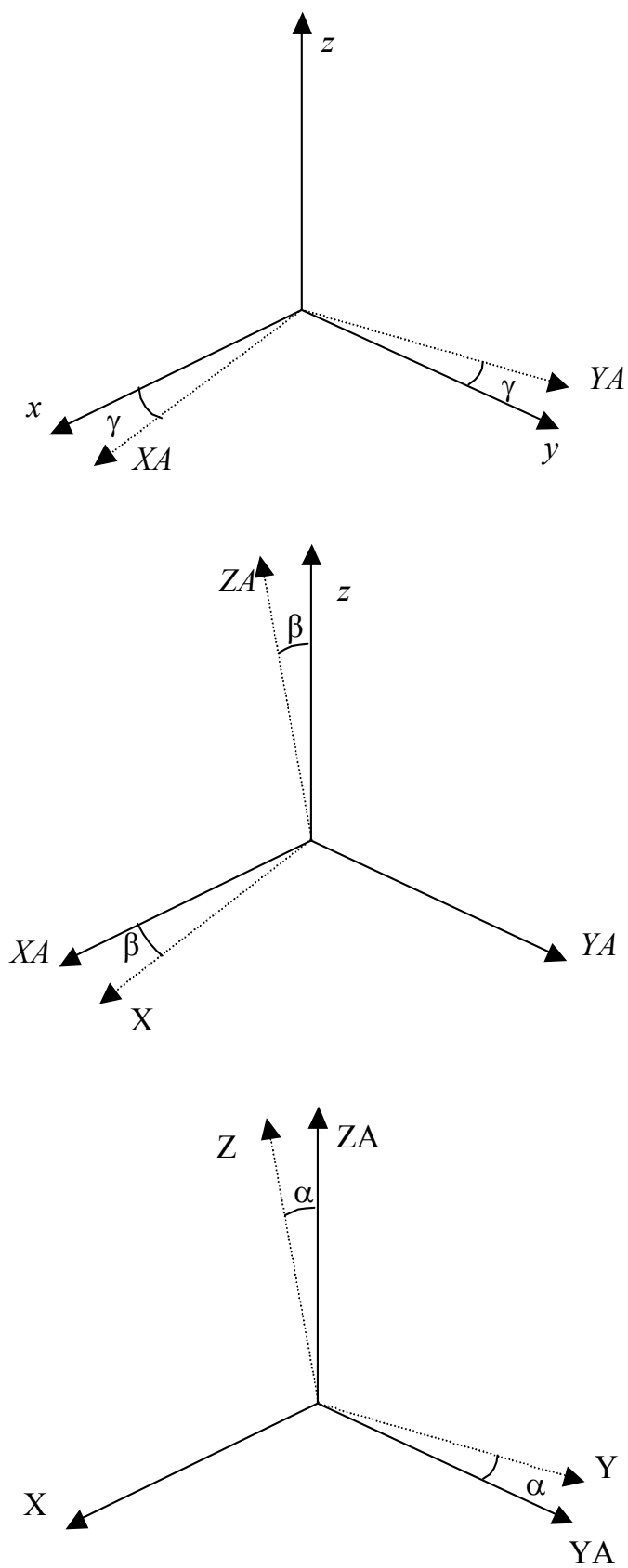


Figura 19 – Transformação do Sistema de Coordenadas

Transformação de Coordenadas

Após o movimento do corpo, a seguinte expressão relaciona as coordenadas de um ponto, expressas no sistema estrutural da plataforma $\mathbf{x} = (x, y, z)$, com as coordenadas do mesmo ponto expressas no sistema global $\mathbf{X} = (X, Y, Z)$, em função do movimento de translação $\mathbf{x}_l = (x_{l1}, x_{l2}, x_{l3})$ e do movimento de rotação definido pelos ângulos de Euler γ, α, β :

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta\cos\alpha & \sin\beta\cos\alpha & -\sin\alpha \\ -\sin\beta\cos\gamma + \cos\beta\sin\alpha\sin\gamma & \cos\beta\cos\gamma + \sin\beta\sin\alpha\sin\gamma & \cos\alpha\sin\gamma \\ \sin\beta\sin\gamma + \cos\beta\sin\alpha\cos\gamma & -\cos\beta\sin\gamma + \sin\beta\sin\alpha\cos\gamma & \cos\alpha\cos\gamma \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x - x_l \\ y - x_2 \\ z - x_3 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

A equação (1) define a transformação geral rotacional de coordenadas, relacionando o sistema de coordenadas globais fixo no espaço com o sistema de coordenadas fixo na plataforma. Esta relação pode ser reescrita na forma seguinte, onde, com a exceção de $\mathbf{X}$, as letras maiúsculas e em negrito representam matrizes e as letras minúsculas e em negrito representam vetores:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_l) \quad (2)$$

Na equação (2), $\mathbf{X}$ é o vetor cujas componentes são (X, Y, Z) , $\mathbf{x}$ e $\mathbf{x}_l$ são similarmente definidas em termos das coordenadas globais do ponto em consideração e as translações das coordenadas de origem, e $\mathbf{A}$ é a matriz de rotação de coordenadas 3x3. Observando-se que $\mathbf{A}$ é uma transformação ortogonal, sua inversa é igual à sua transposta, e a transformação inversa será dada por:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_l + \mathbf{A}^T \mathbf{X} \quad (3)$$

Transformação de Velocidades

Considerando que ω seja o vetor de velocidades angulares do corpo expressa em termos de $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ em torno dos eixos X,Y,Z, a relação entre ω e a derivada no tempo dos ângulos de Euler é dada pela equação (4):

$$\omega = B \dot{\theta} \quad (4)$$

Onde:

$$\dot{\theta} = \{\dot{\gamma}, \dot{\alpha}, \dot{\beta}\}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & \cos \gamma & \sin \gamma \cos \alpha \\ 0 & -\sin \gamma & \cos \gamma \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (5)$$

B , em geral, é uma matriz quadrada e não singular, portanto a sua inversa existe e assim a transformação inversa de (5) pode ser escrita como:

$$\dot{\theta} = B^{-1} \omega \quad (6)$$

Segunda Lei de Newton

A segunda lei de Newton para movimentos translacionais e rotacionais é dada pela equação (7):

$$f = \frac{d}{dt} (Mv) \quad (7)$$

$$m = \frac{d}{dt} (I\omega)$$

onde f e m são os vetores de força e momento externos, M e I são matrizes 3x3 compostas da massa do corpo, e seus momentos e produtos de inércia de acordo com as equações (8) e (9):

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$I = \begin{bmatrix} I_{11} & -J_{12} & -J_{13} \\ -J_{21} & I_{22} & -J_{23} \\ -J_{31} & -J_{32} & I_{33} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Onde: m = massa da plataforma

I_{ii} = momento de inércia em torno dos eixos i ;

$$I_{ii} = \int (x_j^2 + x_k^2) \, dm \quad j, k \neq i \quad (10)$$

J_{ij} = ij -ésimo produto de inércia

$$J_{ij} = \int x_i x_j \, dm \quad i \neq j \quad (11)$$

$$J_{ij} = J_{ji}.$$

O lado direito das equações (7) representa as derivadas no tempo do momento e do momento angular. Se a velocidade translacional, v , do centro de gravidade do corpo e o vetor de forças, f , forem expressos em relação ao sistema de referência inercial, X, Y, Z , a primeira das equações (7) torna-se:

$$f = M \frac{dv}{dt} \quad (12)$$

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (13)$$

onde $X = \{X_I, Y_I, Z_I\}$ são as coordenadas do centro de gravidade do corpo em relação ao sistema de referência X, Y, Z .

É conveniente que a equação de momento angular seja avaliada em relação ao sistema de referência móvel, que permanece fixo no corpo, visto que a matriz de inércia é constante neste sistema. A derivada no tempo do momento angular é, portanto,

avaliada num sistema de coordenadas que está girando, assim a segunda das equações (7) torna-se:

$$m = I \frac{d\omega}{dt} + \omega \times (I\omega) \quad (14)$$

Equações de Movimento

As equações (6), (12), (13) e (14) podem ser rearranjadas e reescritas como:

$$\frac{dv}{dt} = M^{-1}f \quad (15.a)$$

$$\frac{dx}{dt} = v \quad (15.b)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = I^{-1} [m - \omega \times (I\omega)] \quad (15.c)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = B^{-1} \omega \quad (15.d)$$

As equações (15) podem ser vistas como um sistema de doze equações de primeira ordem nas variáveis v , x , ω e θ . Estas variáveis, dependentes do tempo, expressam as velocidades e posição do corpo. É importante ressaltar dois tipos de não linearidade que ocorrem nestas equações:

- Os vetores de força e momento, f e m , são funções não lineares da posição do corpo e do estado de movimento;
- O produto vetorial $\omega \times (I\omega)$ e a matriz de transformação B^{-1} contêm termos não lineares envolvendo, respectivamente, produtos e potências das velocidades angulares, e funções trigonométricas dos ângulos de Euler.

Neste ponto, formulações simplificadas poderiam assumir pequenas amplitudes de movimento e desprezar termos de ordem superior contendo produtos ou potências de quantidades de menor ordem de grandeza. No entanto, como mencionado

anteriormente, a presente formulação mantém todos os termos não-lineares e, portanto, é válida para grandes amplitudes de movimento. Isto será possível já que a integração das equações será feita no domínio do tempo.

Para a integração no tempo das equações de movimento, será empregado o método de Runge-Kutta de quarta ordem. Este método pode operar sobre um sistema de equações diferenciais acopladas da forma $\frac{dy}{dt} = f(y,t)$, que, como pode ser visto, é similar às equações (15). Trata-se de um método baseado em extrapolações polinomiais da variável principal no intervalo de tempo seguinte, e na determinação dos coeficientes do polinômio a partir de valores estimados das derivadas em instantes ao longo do intervalo de tempo.

Os vetores de força e momento, **f** e **m**, têm componentes que são proporcionais às acelerações do corpo (as parcelas de inércia da fórmula de Morison). Estas componentes irão gerar termos de massa adicionada, que variam ao longo do tempo. Separando as parcelas de **f** e **m** que dependem das acelerações, e que são afetados por termos de massa adicionada, pode-se reorganizar as equações (15.a) e (15.c) da seguinte forma:

$$\mathbf{M} \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\mathbf{A} \frac{d\mathbf{v}}{dt} - \mathbf{B} \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} + \mathbf{f}_I \quad (16)$$

$$\mathbf{I} \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = -\mathbf{C} \frac{d\mathbf{v}}{dt} - \mathbf{D} \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} + \mathbf{m}_I - \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I} \boldsymbol{\omega})$$

Nestas expressões, **A** e **D** são as matrizes de massa adicionada avaliadas em cada instante de tempo; **B** e **C** são os termos cruzados de massa adicionada; **f_I** e **m_I** são as parcelas dos termos de força e momento que dependem da posição, velocidade e tempo, mas são independentes da aceleração.

Neste caso, para permitir a utilização do método de Runge-Kutta, transferem-se os termos com derivadas das incógnitas básicas para o lado esquerdo. As equações (16) são então novamente re-arranjadas transformando-se em:

$$(\mathbf{M}+\mathbf{A}) \frac{d\mathbf{v}}{dt} + \mathbf{B} \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = \mathbf{f}_I \quad (17)$$

$$\mathbf{C} \frac{d\mathbf{v}}{dt} + (\mathbf{I}+\mathbf{D}) \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = \mathbf{m}_I - \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I} \boldsymbol{\omega})$$

ou, em forma matricial,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} + \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{I} + \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{d\mathbf{v}}{dt} \\ \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{f}_I \\ \mathbf{m}_I - \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I} \boldsymbol{\omega}) \end{Bmatrix} \quad (18)$$

onde a matriz de massa global é dada por:

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{M} + \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{I} + \mathbf{D} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Pode-se demonstrar que $\bar{\mathbf{A}}$ é uma matriz simétrica e, em geral, não singular, de modo que sua inversa pode ser expressa, numa forma particionada, como:

$$\bar{\mathbf{A}}^{-1} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{A}}_{11} & \bar{\mathbf{A}}_{12} \\ \bar{\mathbf{A}}_{21} & \bar{\mathbf{A}}_{22} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Pode-se agora pré-multiplicar os dois lados de (18) por $\bar{\mathbf{A}}^{-1}$, obtendo-se

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \bar{\mathbf{A}}_{11} \mathbf{f}_I + \bar{\mathbf{A}}_{12} [\mathbf{m}_I - \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I} \boldsymbol{\omega})] \quad (21)$$

$$\frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = \bar{\mathbf{A}}_{21} \mathbf{f}_I + \bar{\mathbf{A}}_{22} [\mathbf{m}_I - \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I} \boldsymbol{\omega})] \quad (22)$$

Estas equações encontram-se agora em uma forma apropriada para aplicação do algoritmo de integração no tempo, uma vez que o lado direito não possui termos com derivadas das incógnitas básicas.

5.3 - FORMULAÇÃO ESTRUTURAL DAS LINHAS

Prosseguindo na descrição da formulação de análise acoplada de plataformas flutuantes apresenta-se, a seguir, a formulação e o procedimento de solução do modelo matemático que representa o comportamento estrutural das linhas de ancoragem e “risers”.

5.3.1 - Modelo Matemático - Solução Numérica

O comportamento dinâmico de uma estrutura pode ser descrito matematicamente por um problema de valor inicial e de contorno (PVI/C), constituído por um sistema de equações diferenciais parciais (EDP) hiperbólicas - as *Equações de Movimento* ou *equações de equilíbrio dinâmico*. Na montagem deste sistema estão incorporadas as *Equações constitutivas* relacionando tensões às deformações, e as *Equações deformação-deslocamento*.

A essas equações diferenciais parciais, está associado um conjunto de condições de contorno no espaço, que estabelece que o contorno da estrutura está dividido em uma região com deslocamentos conhecidos e outra com forças conhecidas. Além disso, está associado também um conjunto de condições iniciais no tempo, que estabelece que os deslocamentos e velocidades em qualquer ponto do domínio espacial têm valores conhecidos no tempo $t = 0$.

A construção deste modelo matemático diferencial está baseada em conceitos da Mecânica do Contínuo e da Teoria da Elasticidade. Usualmente, no procedimento de solução do problema estrutural o modelo matemático é reescrito em uma formulação integral, baseada em princípios variacionais. Esta formulação integral pode ser obtida de diversas maneiras: através de princípios de energia, como o Princípio dos Trabalhos Virtuais ou o Princípio da Energia Potencial Estacionária; ou através do método de Galerkin, baseado na técnica de resíduos ponderados.

Uma descrição detalhada do estabelecimento e formulação destes modelos matemáticos pode ser encontrada em diversos textos [ZIENKIEWICZ, 2000], [BATHE, 1996], [HUGHES, 1987]. Uma descrição mais concisa e didática pode ser encontrada no trabalho de Kayser Junior [KAYSER, 2003].

Para a solução do problema descrito por estes modelos matemáticos contínuos, que implica na obtenção da resposta dinâmica desejada, são empregados métodos numéricos que efetuam discretizações no espaço e no tempo. O processo usual consiste em efetuar as discretizações de forma independente (*semi-discretização*), em duas etapas:

- A) Em uma primeira etapa, utiliza-se uma técnica para a discretização *espacial* do domínio. Em formulações diferenciais, as **EDP** seriam então transformadas em um sistema de equações diferenciais ordinárias (**EDO**) *semi-discretas* (porém ainda funções contínuas do tempo);
- B) Em uma segunda etapa, efetua-se a discretização das **EDO** *no tempo*, obtendo-se a resposta através de um algoritmo de integração.

5.3.2 - Discretização Espacial

No contexto da análise de estruturas esbeltas, especificamente de “risers” e linhas de ancoragem de plataformas flutuantes, a técnica de discretização empregada é o Método dos Elementos Finitos – **MEF**. A formulação do **MEF**, que tem sido extensivamente estudada ao longo das três últimas décadas, não será descrita neste texto; recomenda-se a leitura de referências clássicas da literatura, tais como [ZIENKIEWICZ, 2000], [BATHE, 1996], [HUGHES, 1987]. Novamente, uma descrição concisa e didática pode ser encontrada em [KAYSER, 2003].

Para a discretização espacial dos “risers” e linhas de ancoragem, o programa Prosim emprega elementos reticulados de treliça e pórtico. A seguir, apresenta-se uma descrição sucinta das características destes elementos.

Elemento de Treliça

Os elementos de treliça possuem 3 graus de liberdade por nó. Os graus de liberdade (U,V,W) representam movimentos lineares nas direções $\bar{x}$, $\bar{y}$ e $\bar{z}$. Como este tipo de elemento não possui graus de liberdade angulares, conseqüentemente não é

possível fornecer rigidez flexional. Por este motivo, estes elementos representam bem linhas que possuem baixa rigidez à flexão tais como linhas de ancoragem e umbilicais.

Elemento de Pórtico

O programa Prosim emprega um elemento finito de pórtico espacial baseado em uma formulação corotacional [CRISFIELD, 1990], [MATHISEN, 1990] e [MOURELLE, 1993].

O objetivo principal da formulação co-rotacional é separar os movimentos de corpo rígido dos movimentos que geram deformações. Com isso, obtém-se um elemento mais preciso, robusto e menos sensível à magnitude das rotações incrementais.

O elemento de pórtico espacial possui 6 graus de liberdade por nó. Os graus de liberdade (U,V,W,RU,RV,RW) representam movimentos lineares nas direções $\bar{x}$, $\bar{y}$ e $\bar{z}$ e movimentos angulares em torno destes mesmos eixos. Com este tipo de elemento é possível considerar a rigidez à flexão das linhas, de modo a representar linhas cuja rigidez à flexão é representativa, tais como “risers” rígidos e “risers” flexíveis.

5.3.3 - Discretização no Tempo

Como resultado da aplicação do Método dos Elementos Finitos para a discretização espacial, o modelo matemático diferencial, originalmente um PVI/C composto por um sistema de equações diferenciais parciais (**EDP**) associado a um conjunto de condições de contorno no espaço e condições iniciais no tempo, se converteria em um problema de valor inicial composto por um sistema de equações diferenciais ordinárias (**EDO**) *semi-discretas* (discretizadas no *espaço*, mas ainda funções contínuas do *tempo*), e um conjunto de condições iniciais no tempo [JACOB, 1998], [RODRIGUES, 1998].

Para problemas lineares, as EDO correspondem às *equações de movimento* escritas da seguinte forma:

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C} \dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K} \mathbf{u}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (23)$$

As incógnitas destas equações são os vetores $\mathbf{u}(t)$, $\dot{\mathbf{u}}(t)$ e $\ddot{\mathbf{u}}(t)$ contendo, respectivamente, componentes de deslocamentos, velocidades e acelerações para cada grau de liberdade da malha de elementos finitos empregada para efetuar a discretização espacial. O problema de valor inicial é composto por estas equações de movimento, associadas às seguintes condições iniciais:

$$\mathbf{u}(0) = \mathbf{u}_0 \quad ; \quad \dot{\mathbf{u}}(0) = \mathbf{v}_0 \quad (24)$$

As três parcelas do lado esquerdo das equações de movimento representam, respectivamente, forças de inércia, amortecimento e forças elásticas. Estas forças internas equilibram as forças externas no lado direito, que são representadas pelo vetor $\mathbf{F}(t)$ contendo as resultantes nodais das cargas.

Finalmente, $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$ e $\mathbf{K}$ são as matrizes de massa, amortecimento e rigidez, simétricas e constantes no tempo. As matrizes de massa e rigidez podem ser deduzidas diretamente a partir da formulação de elementos finitos. A matriz de amortecimento $\mathbf{C}$, por sua vez, é usualmente representada pela expressão de amortecimento de Rayleigh como uma combinação linear das matrizes de massa e rigidez [BATHE, 1996]:

$$\mathbf{C} = \alpha_m \mathbf{M} + \alpha_k \mathbf{K}. \quad (25)$$

onde α_m e α_k são, respectivamente, coeficientes escalares proporcionais à massa e à rigidez, a serem determinados a partir de dois pares de valores (frequência $\times$ percentagem de amortecimento crítico).

Para maiores detalhes sobre a solução do problema dinâmico ver [RODRIGUES, 2004a].

5.4 - Carregamentos Ambientais

Neste capítulo será apresentada a consideração dos carregamentos ambientais de onda, correnteza e vento nas análises dinâmicas do Prosim.

Em relação à correnteza será apresentado o procedimento para obtenção de forças a partir de velocidades de correnteza e ângulos de incidência.

Serão apresentadas formulações para obtenção de forças de vento a partir velocidade de vento, área exposta e outros fatores

E, em relação às ondas, será apresentado o modelo para obtenção de velocidade, aceleração, deslocamento e pressão das partículas do fluido e sua transformação em forças através de modelos híbridos implementado no programa Prosim.

5.4.1 – Correnteza

A correnteza é definida através de um perfil poligonal, em que são fornecidos valores de velocidade e ângulos de incidência. Este tipo de carregamento geralmente é aplicado incrementalmente à estrutura e fornecido através de uma função tempo, que pode ser associada ao carregamento de onda e correnteza.

Considera-se que a correnteza atue tanto no casco como nas linhas de ancoragens e “risers”, de acordo com o perfil poligonal.

A correnteza pode ser considerada como carregamento estático, embora existam alguns efeitos dinâmicos associados à correnteza. Pode-se mencionar por exemplo as vibrações induzidas por vórtices (VIV); e a flutuação no valor da velocidade da correnteza medida no tempo, que é usualmente ignorada.

No caso de corpos submersos, para os quais a fórmula de Morison pode ser aplicada, tais como membros reticulados de plataformas ou linhas de ancoragem e “risers”, as cargas de correnteza podem ser consideradas diretamente no cálculo da parcela de arraste da fórmula de Morison (que será apresentada adiante) que leva em conta as velocidades relativas fluido-estrutura, simplesmente efetuando uma soma vetorial das velocidades de correnteza com as velocidades do fluido devidas à onda e as velocidades da estrutura.

Em projetos recentes de plataformas em águas profundas, tem sido observado que a parcela de carga de correnteza atuando sobre as linhas pode ser da mesma ordem de grandeza da parcela que atua sobre o casco da plataforma.

5.4.2 - Vento

Esse item apresenta a formulação para o cálculo das cargas de **vento** (atuando nas áreas expostas do casco e do convés da plataforma).

As cargas de vento atuam sobre a área exposta do casco e do convés das plataformas flutuantes. As condições de vento usadas em projeto devem ser apropriadamente determinadas a partir de dados coletados, consistentes com os outros parâmetros ambientais que ocorrem simultaneamente.

Existem duas maneiras de se considerar os efeitos de vento no projeto, que dependem de parâmetros do sistema e objetivos da análise:

- Força de vento constante no tempo, calculada com base na velocidade média de 1 minuto;
- Força de vento variável, calculada em função de um componente permanente, baseado na velocidade média de 1 hora, mais uma componente variando com o tempo, calculada a partir de um espectro de vento adequado.

Para o cálculo da parcela estática da carga de vento é assumido que a área exposta à ação do vento na embarcação possa ser caracterizada por um único número, o qual representa o produto da área exposta ao vento pelo fator de forma. O programa PROSIM também fornece a opção de se interpolar ao longo do tempo a área exposta à ação do vento devido à variação do aproamento (yaw) da plataforma.

Considerando-se que o centro de pressão de vento seja conhecido, a força de vento é considerada atuando neste ponto, em cada intervalo de integração, pela seguinte equação:

$$F_{vento} = \frac{\rho}{2} A_{vento} V_{vento}^2 \quad (26)$$

onde:

ρ - densidade do ar;

A_{vento} – produto da área exposta ao vento pelo coeficiente de forma;

V_{vento} – velocidade média do vento.

Resultados de testes em túnel de vento podem ser usados para estabelecer coeficientes de força (força/velocidade²) em determinadas direções de incidência do vento. Assim, basta multiplicar o valor da velocidade de vento ao quadrado pelo coeficiente de força obtido do ensaio, para que seja determinada a força de vento sobre a embarcação. Nos ensaios, os coeficientes de força de vento são normalmente determinados para uma altura de 10 metros acima da lâmina d'água. Assim, para se obter as forças, as velocidades de vento medidas precisam ser transportadas para esta mesma altura de 10 metros, de acordo com a fórmula abaixo [DNV, 2001]:

$$V_z = V_{10m} \times \left(\frac{Z}{10} \right)^{0,13} \quad (27)$$

De modo similar às ondas, o vento também gera forças variáveis no tempo. Embora métodos para determinar a parcela de força de vento variável no tempo tenham sido extensivamente estudados, há ainda um substancial grau de incerteza nesta estimativa, particularmente na definição de um espectro de energia a partir de dados medidos de vento. Na falta de dados mais precisos, a parcela variável no tempo pode ser obtida a partir da simulação do espectro proposto pela API RP 2A , que é apresentado a seguir:

$$S(f) = \frac{\sigma(z)^2}{f_p \left[1 + 1.5 \frac{f}{f_p} \right]^{\frac{5}{3}}} \quad (28)$$

$$\sigma(z) = V(1hr, z) \times \begin{cases} 0.15 \left(\frac{z}{z_s} \right)^{-0.125} & \text{para } z \leq z_s \\ 0.15 \left(\frac{z}{z_s} \right)^{-0.275} & \text{para } z > z_s \end{cases} \quad (29)$$

$$V(1hr, z) = V(1hr, z_R) \left(\frac{z}{z_R} \right)^{0.125} \quad (30)$$

$$0.01 \leq \frac{f_p \cdot z}{V(1hr, z)} \leq 0.10 \tag{31}$$

onde:

$S(f)$ – densidade de energia espectral, na elevação z ;

f – frequência em Hz;

f_p – frequência de pico característica do espectro;

$\sigma(z)$ – desvio-padrão da velocidade de vento;

$V(1hr, z)$ – Velocidade média de vento em 1 hora, medida na elevação z ;

z_s – 20m (espessura da “camada superficial”);

z_r - 10 m (altura da referência).

A figura 20 mostra o espectro de vento para uma velocidade média horária de 35 m/s e $\frac{f_p \cdot z}{V(1hr, z)} = 0.05$.

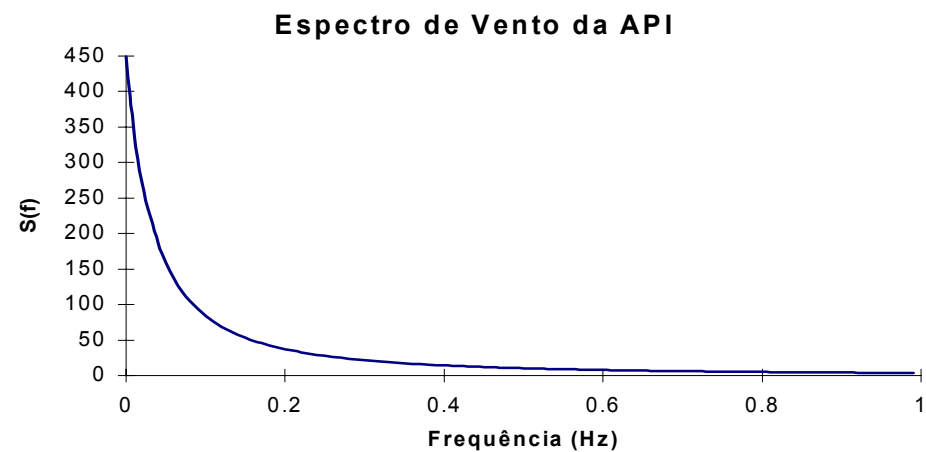


Figura 20 – Espectro de Vento

A simulação do vento consiste em uma série de componentes discretas, senoidais e unidirecionais, as quais são superpostas para se obter a velocidade instantânea do vento. Estas componentes são geradas em intervalos de igual energia do espectro, com fases distribuídas aleatoriamente no intervalo $[0, 2\pi]$.

5.4.3 - Ondas

O modelo matemático que representa o comportamento de ondas no mar é composto por um Problema de Valor de Contorno (PVC), que consiste em uma equação diferencial (Equação de Laplace) e as condições de contorno associadas. Assume-se que o fundo do oceano é plano e com profundidade d (medida a partir do nível de águas tranquilas) e que as ondas são bidimensionais, periódicas, uniformes e progredindo numa direção definida e positiva e são definidas em termos de sua altura H e período T . A incógnita básica do PVC é o potencial de velocidade do fluido Φ , a partir do qual, por derivação, podem ser obtidas as velocidades, acelerações, deslocamentos e pressões das partículas do fluido.

Este problema de valor de contorno é altamente não-linear, especialmente devido às condições de contorno de superfície livre. Desta forma, de modo geral não é possível obter uma solução analítica rigorosa para a equação diferencial de Laplace, e a solução (em termos de velocidades e acelerações das partículas fluidas induzidas pela onda) deve ser obtida introduzindo aproximações e/ou utilizando métodos numéricos. O procedimento mais usual, e que atende à prática de projeto de sistemas offshore, consiste em empregar a Teoria Linear de Airy como a solução da equação de Laplace.

A modelação do carregamento de ondas foge ao escopo do presente trabalho, mas uma descrição detalhada deste modelo pode ser encontrada em [SENRA, 2004].

5.4.4 - Cálculo das Forças

O presente item irá tratar dos procedimentos para o cálculo das **forças** no casco e nas linhas de ancoragem e “risers” exercidas pelo fluido considerando as velocidades induzidas pelas ondas e pela correnteza.

Este cálculo de forças é uma tarefa complexa, pois envolve diversas incertezas, que se somam às envolvidas na formulação do modelo de ondas, e na natureza aleatória de um estado de mar real.

Atualmente existem formulações que, tendo sido verificadas e calibradas por ensaios experimentais e monitoração no mar, se mostram adequadas para representar

com precisão as forças devidas à movimentação do fluido sobre sistemas offshore. Segundo [CHAKRABARTI, 1987], estas formulações podem ser agrupadas em três classes principais, de acordo com sua adequação aos diferentes tipos de sistemas offshore, que são a formulação de Morison, formulação de Froude-Krylov e o modelo de Difração / Radiação .

Essas formulações não necessitam ser consideradas como mutuamente exclusivas, e podem ser combinadas em modelos “híbridos” que combinam características positivas de mais de uma formulação, seguindo propostas como as apresentadas por [PAULING, 1970] e [HOOFT, 1982]. Neste modelo híbrido, implementado no programa Prosim, combinam-se as forças de primeira e segunda ordem:

As forças de primeira ordem através da formulação de Froude-Krilov e da fórmula de Morison, particularmente porque esta última representa bem os efeitos locais. Há de se comentar que os efeitos de difração e radiação são pequenos.

A fórmula de Morison vale para escoamento incidente retilíneo, o que não é o caso em ondas. Assim a parcela referente ao escoamento incidente no termo de inércia de Morison é substituído pela integral das pressões (Froude-Krylov).

Para as forças de segunda ordem de origem potencial, utilizam-se resultados derivados de programas de análise hidrodinâmica como o WAMIT.

Em tal modelo híbrido, a aplicação das diferentes formulações complementa as lacunas e reforça as vantagens de cada uma. Uma explanação completa do cálculo das forças utilizado pelo PROSIM pode ser encontrada em [RODRIGUES, 2004a] e [SENRA, 2004].

Destas parcelas a de maior interesse no presente trabalho é a de Morison, pois é a utilizada no cálculo do equilíbrio estático.

Formulação de Morison

A formulação de Morison é bastante difundida em aplicações práticas para o cálculo das forças de fluidos em corpos esbeltos, com dimensão transversal

característica D pequena em comparação com o comprimento de onda λ . Um critério usualmente empregado para definir um “corpo esbelto” consiste em verificar se a seguinte relação é atendida:

$$\frac{D}{\lambda} < 5. \quad (32)$$

Nestes casos, a formulação de Morison assume que as forças podem ser computadas através de uma aproximação na qual os parâmetros importantes do fluxo na superfície do corpo, tais como pressão, velocidade e aceleração, podem ser aproximados pelo valor correspondente calculado no eixo da seção transversal do corpo esbelto.

A formulação de Morison considera que a força de onda é composta pela soma de duas parcelas:

- Uma parcela de *arraste* associada a efeitos viscosos, proporcional às velocidades do fluido e do corpo;
- Uma parcela de *inércia*, proporcional às acelerações do fluido e do corpo.

A equação de Morison pode ser expressa da seguinte forma:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{2} \rho_w D C_d |\mathbf{u} - \dot{\mathbf{x}}| (\mathbf{u} - \dot{\mathbf{x}}) + \rho_w \frac{\pi D^2}{4} C_m \dot{\mathbf{u}} - \rho_w \frac{\pi D^2}{4} C_a \ddot{\mathbf{x}} \quad (33)$$

Nesta expressão, ρ_w é a massa específica do fluido; D é uma dimensão transversal característica do corpo (usualmente o diâmetro de um membro cilíndrico); e $\mathbf{u}$, $\dot{\mathbf{x}}$, $\dot{\mathbf{u}}$ e $\ddot{\mathbf{x}}$ são respectivamente as velocidades e acelerações do fluido e do corpo. O primeiro termo do lado direito desta equação (proporcional às velocidades) corresponde portanto à parcela de arraste; o segundo e terceiro termos (proporcionais às acelerações) correspondem à parcela de inércia. Geralmente considera-se que a formulação de Morison é mais aplicável quando a força de arraste é significativa, e os efeitos viscosos

preponderam sobre os inerciais. Este é usualmente o caso em corpos esbeltos [CHAKRABARTI, 1987].

A formulação de Morison é considerada semi-empírica, já que as parcelas de arraste e inércia são afetadas por coeficientes adimensionais C_d , C_m e C_a , que devem ser calibrados a partir da observação de resultados experimentais. Na análise de linhas de ancoragem e “risers” usualmente empregam-se valores de C_d variando entre 0,7 e 1,2, e valores de C_m em torno de 2,0. O terceiro termo, afetado pelo coeficiente C_a (usualmente definido como $C_a = C_m - 1$) é proporcional às acelerações do corpo e está associado a efeitos de “massa adicionada”.

A equação de Morison tem apresentado bons resultados em aplicações práticas tais como membros de plataformas fixas reticuladas (as *jaquetas*), e linhas de ancoragem e “risers” modelados por elementos finitos. Nestas aplicações, no entanto, deve-se ter em mente os seguintes aspectos:

- A Fórmula de Morison considera que a resposta do “riser” está alinhada com a direção do fluxo incidente. Portanto, omite forças de *lift* (sustentação) e forças de arrasto devido à vibração induzida por vórtices (*VIV*), que podem ser importantes em muitas situações.
- Não incorpora o efeito da esteira de interferência entre “risers” muito próximos (o que pode influenciar a parcela de arrasto). Um “riser” na esteira de outro pode receber menos carga, o que pode levar à colisão (*clashing*) entre os “risers”. Este efeito poderia ser modelado empiricamente, variando os valores do coeficiente C_d .

Esta equação também pode ser empregada em plataformas flutuantes compostas por membros reticulados, tais como as plataformas semi-submersíveis, TLPs ou SPAR-buoys. Nestes casos, membros muito próximos podem “confinar” uma porção da massa de fluido, que pode agir como parte da estrutura, levando ao aumento da força de massa adicionada. Assim, a utilização pura e simples da equação de Morison equivaleria a assumir que os membros, além de relativamente esbeltos, são razoavelmente espaçados entre si, de modo que o espaçamento médio entre dois membros é grande quando comparado com as dimensões transversais da seção. A força que o fluido exerce em cada membro não seria então afetada pela presença de outros membros, e a força total

pode ser obtida somando-se as forças calculadas individualmente para cada membro. O efeito de “confinamento” do fluido poderia ser modelado empiricamente, aumentando o valor do coeficiente C_a (proporcional à aceleração do corpo), mas sem alterar o valor do coeficiente C_m que afeta apenas a força de inércia proporcional à aceleração do fluido.

5.5 – *Análise Estática Acoplada*

A análise estática consiste basicamente no equilíbrio de forças e momentos resultantes dos carregamentos nas direções globais X, Y e Z.

O principal objetivo da análise estática é a obtenção de uma configuração equilibrada sem a necessidade de uma simulação dinâmica, o que resulta na possibilidade de calibração, ajuste e uma pré-análise do modelo de uma forma muito rápida e eficiente se compararmos com a metodologia utilizada até então. Na metodologia usada anteriormente, para obtenção de uma configuração equilibrada, submetida a um carregamento do tipo supracitado, era necessária uma análise dinâmica e no caso de qualquer alteração no modelo uma nova análise dinâmica e assim sucessivamente até se obter o modelo calibrado.

Além disso, com a utilização da análise estática, a análise dinâmica pode ser iniciada com o sistema já equilibrado estaticamente, o que acarreta na redução do transiente da análise dinâmica. Isto significa economia de tempo de CPU nas análises, o que pode ser muito significativo visto o grande número de graus de liberdade envolvidos em um problema com sistemas acoplados.

Para obtenção do equilíbrio do sistema utilizou-se um método puramente iterativo, e as parcelas de carregamento consideradas foram: peso das linhas, peso da plataforma, empuxo da plataforma, cargas externas concentradas, correnteza e vento nas direções globais X, Y e Z.

As equações de equilíbrio a serem atendidas são as seguintes:

$$\Sigma F_x = 0;$$

$$\Sigma F_y = 0;$$

$$\Sigma F_z = 0;$$

$$\Sigma M_x = 0;$$

$$\Sigma M_y = 0;$$

$$\Sigma M_z = 0;$$

(34)

Portanto, de uma forma geral, efetuou-se o seguinte procedimento para obtenção do equilíbrio estático de deslocamentos lineares no PROSIM:

- Define-se os valores de tolerância - **Tol**;
- Define-se o incremento de desl. inicial (porcentagem da lâmina d'água) - **Inc**;
- Calcula-se os valores de força de desequilíbrio para a posição original – **Forc**;
- Verifica convergência - **Forc < Tol**;
- Reavalia-se deslocamento total – **Desl = Desl + Inc**;
- Armazena-se o valor da força do passo anterior – **Forcant = Forc**;
- Reavalia-se os valores de força de deseq. com os novos deslocamentos - **Forc**;
- Calcula-se os valores do resíduo de força de deseq. – **Res = Forc – Forcant**;
- Calcula-se a nova rigidez a partir do resíduo – **Rig = Res / Inc**;
- Reavalia-se o valor do incremento de desl. – **Inc = Forc / Rig**.

Deve ser ressaltado que o incremento de deslocamento é sempre aplicado na direção em que a força de desequilíbrio está apontando.

Após o sistema estar em equilíbrio nos graus de liberdade lineares utiliza-se um procedimento semelhante ao apresentado anteriormente para obtenção do equilíbrio nos graus de liberdade angulares.

Deve ser ressaltado que caso a convergência não seja atingida após um determinado número de iterações, o algoritmo retorna ao início da análise, reiniciando com um incremento inicial de deslocamento igual à metade do incremento utilizado na tentativa anterior. Este recurso é utilizado, no caso de não-convergência do problema até que o incremento atinja um determinado limite inferior.

Capítulo 6: Otimização

6.1 – Introdução

Muitas definições diferentes para otimização tem sido dadas, e uma extensa literatura existe a respeito do assunto. [SCHACHTER, 1990], coloca a otimização como sendo a tentativa de se obter o melhor resultado possível para um problema, atendendo a certos critérios e obedecendo a certas restrições.

De uma forma geral, o problema de otimização consiste em encontrar-se um máximo ou mínimo, de uma função que represente o problema em questão. Para simplificar, neste trabalho, a otimização será considerada como um problema de maximização.

Quando a função é bastante simples, uma busca direta, exaustiva, pode ser feita. Todo o espaço pode ser explorado e o ponto máximo pode ser encontrado por inspeção direta. Este método é conhecido como “Busca Exaustiva” ou “Método Da Força Bruta” [LACERDA e CARVALHO, 1999] e raramente é aplicável.

A complexidade do problema, e conseqüentemente a complexidade da função que o representa está diretamente relacionada com a dificuldade de se empreender a busca pelo ponto de máximo.

Baseada no tipo da função que representa o problema pode-se classificar os métodos de otimização em dois grandes grupos: Métodos Lineares e Métodos Não Lineares.

O primeiro grupo é formado por problemas que podem ser modelados como uma função linear de suas variáveis e restrições. São problemas de solução mais simples e, para a sua solução, utilizam-se métodos conhecidos como Programação Linear. Dentre os métodos de maior sucesso para a solução destes problemas está o Método Simplex [SIDDALL, 1982], [VIEIRA, 2004].

No entanto, na maioria dos problemas de engenharia o modelo é uma função não linear, que não é simples de ser avaliada. São os chamados problemas “Não Lineares”, uma categoria que exige uma abordagem mais complexa.

Processos de otimização são largamente utilizados nos mais variados campos da engenharia, desde o projeto de produtos até a tomada de decisões gerenciais de investimento de longo prazo. [SIDDAL, 1982], [KANNAN et al., 2004].

Otimização em engenharia é o processo de escolher dentre as diversas opções de projeto a que melhor se adequa aos objetivos pré-definidos. Esta escolha é determinada pela forma como o processo de engenharia em questão está modelado. Ou seja, a forma pela qual os diversos atores do processo de projeto se inter-relacionam. O mais comum hoje em dia, quando se fala em otimização, é pensar na otimização matemática, onde o objeto de projeto, ou a funcionalidade que se pretende otimizar, é descrita através de uma função matemática com variáveis livres, variáveis dependentes e um valor de mérito ou custo.

A otimização matemática obteve um grande impulso na década de 70 com o aumento do poder de processamento dos computadores e o barateamento dos mesmos.

No entanto, os processos de otimização matemática mais promissores utilizados hoje em dia em projeto de engenharia nasceram numa época em que o processamento automático era muito custoso, ou simplesmente não existia. As estratégias evolutivas, por exemplo, surgiram como um método para definição de seqüência de experimentos para o projeto de formas no túnel de vento do “Institute of Flow Engineering” da “Technical University of Berlin” na década de 60, onde o processamento computacional era extremamente caro e, portanto, era necessário uma metodologia formal de busca de uma solução ótima [SCHEWEFEL, 1995].

Foi Leibniz, em 1710, que introduziu o conceito matemático de *ponto ótimo*, que vem a ser o ponto no domínio de uma função no qual a função atinge seu valor máximo, quando falamos de maximização, ou mínimo, no caso de minimização.

Esta função que representa o processo de projeto é conhecida como função objetivo, função de mérito ou função de custo, e pode ser de qualquer forma e tipo. Um dos maiores problemas no âmbito da otimização é escolher adequadamente a função que representará o problema de projeto.

A otimização consiste em determinar o ponto $\underline{X}$ tal que:

$$F(\underline{X}) = \text{Max } (F(x)),$$

onde x é o vetor de variáveis de definição da função, $x = x_1, x_2, x_3 \dots$

6.2 - Otimização Analítica e Otimização Numérica

Em muitos casos, quando a função matemática que descreve o fenômeno pode ser descrita através de uma equação contínua e diferenciável, pode ser possível resolver o problema de busca do ponto ótimo analiticamente, calculando-se o ponto no qual as condições de derivada iguais a zero são satisfeitas. Neste caso dizemos que a otimização é analítica.

Condição para mínimo ou máximo:

$$\frac{Df}{Dx} = 0 \tag{35}$$

No entanto, na maioria dos casos práticos a função a ser otimizada não tem solução analítica, não é contínua nem diferenciável e muitas vezes nem pode ser descrita em forma de equações, como é o caso de diversos tipos de simulações em engenharia, onde a função a ser otimizada é o resultado de diversos processos.

Nestes casos só é possível determinar um ponto de máximo ou mínimo da função através de algoritmos numéricos que nos darão as informações necessárias para buscar o ponto ótimo. Este tipo de otimização é conhecida como otimização numérica.

6.3 – Ótimo Local e Ótimo Global

O ponto ótimo é o ponto em que a função atinge seu ponto máximo, no entanto muitas funções possuem comportamento oscilatório apresentando picos de valores em determinada região (figura 21). Se um ponto é um ponto de máximo em uma determinada região diz-se que este ponto é um “Máximo Local”. Mas se o ponto é o ponto de maior valor em todo o domínio da função, é chamado de “Máximo Global”.

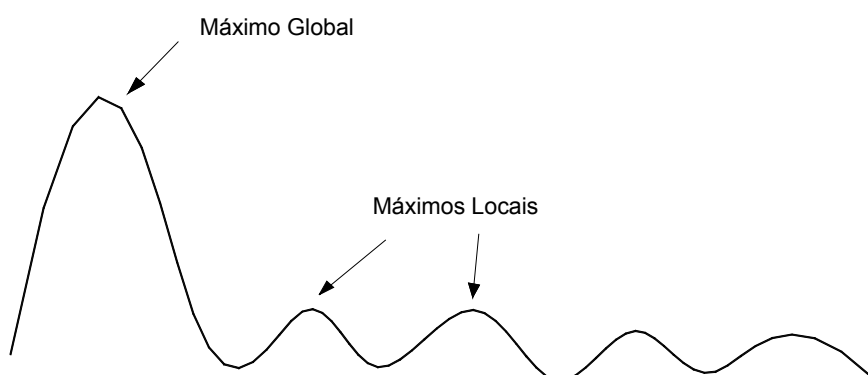


Figura 21 – Máximos locais e Máximo global

O maior desafio dos métodos de otimização consiste em identificar quando o ponto encontrado é um ótimo local ou global. Esta questão ainda está em aberto e diversas metodologias tem sido desenvolvidas para diminuir o risco da otimização convergir para um ótimo local.

6.4 - Restrições e Penalidade

Muitas vezes existem regiões do domínio da função que está sendo otimizada, que não são factíveis, ou seja, pontos que geram soluções que violam uma ou mais restrições ao projeto.

Estas regiões estão restringidas para o cálculo da função, ou seja, a função não tem sentido prático nestas regiões.

Estas restrições podem ser de desigualdade, onde uma ou mais funções de restrição envolvendo as variáveis do problema devem ter seu valor maior (ou menor) do que um valor pré-estabelecido. Ou podem ser de igualdade, onde uma ou mais funções, devem ser iguais a um valor prévio.

A restrição de igualdade é bastante rara nos problemas de otimização em engenharia, sendo a de desigualdade o caso mais comum.

Uma forma de tratar as restrições é a utilização de funções penalidade. Estas funções são construídas com as variáveis livres do problema e são somadas ou subtraídas da função objetivo fazendo com que nas regiões restritas a função seja penalizada (figura 22) . Estas funções funcionam com barreira para o método de otimização, podendo mesmo impedir que pontos da região restrita sejam avaliados. Mas, o mais comum é utilizar funções polinomiais ou exponenciais que alterem sensivelmente o valor da função objetivo.

A escolha adequada das funções penalidade é uma tarefa de grande importância na modelagem do problema de otimização. Uma penalização fraca pode fazer com que o ótimo seja encontrado na região restrita. Por outro lado, uma penalização muito acentuada pode prejudicar o funcionamento do método, fazendo com que haja uma convergência prematura para uma solução factível, porém não ótima.

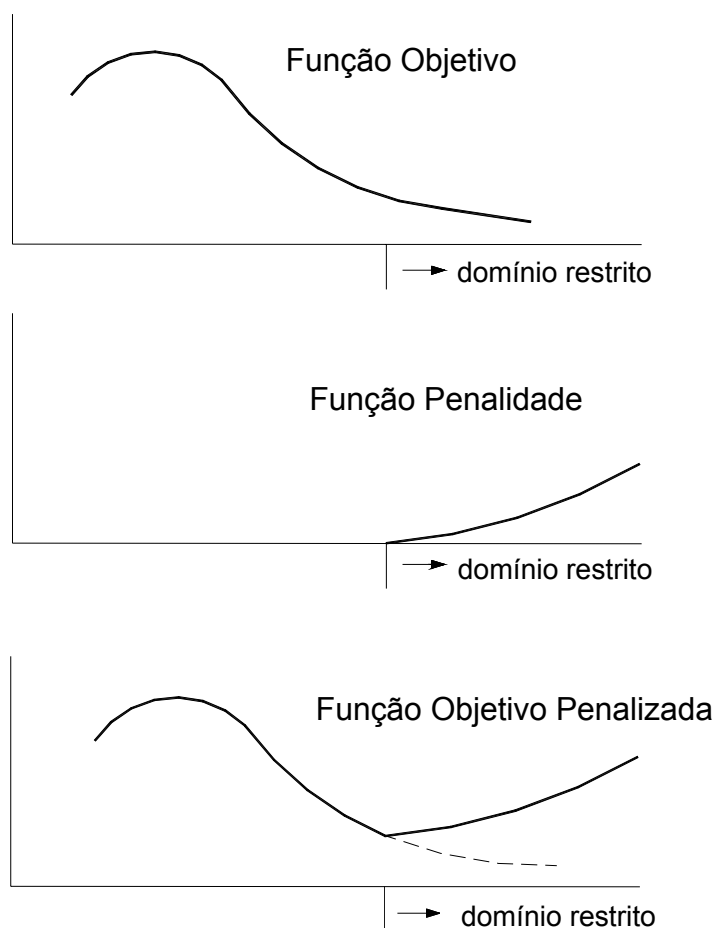


Fig. 22 – Função penalidade

Podemos, então, reescrever a definição da otimização como sendo a determinação do ponto $\underline{X}$ tal que:

$$F(\underline{X}) = \text{Max} (F(x)), \text{ satisfazendo } R(x) > 0.$$

Quando não existem restrições impostas à função diz-se que a otimização é livre ou irrestrita, do contrário, diz-se que é uma otimização com restrição.

Como exemplo de otimização com restrição de desigualdade, pode-se citar o caso da otimização do peso de um estrutura, uma viga por exemplo, onde as tensões envolvidas no projeto devem ficar abaixo de um valor admissível.

6.5 – Métodos de Otimização Numérica

Quando não é possível resolver analiticamente a função objetivo busca-se o ponto ótimo da função através de estratégias numéricas chamadas de Métodos de Otimização Numérica.

A característica geral de todos os métodos é o caráter de aproximações sucessivas. Partindo-se de um ou mais pontos iniciais todos os métodos evoluem pelo espaço de solução em busca do ponto ótimo. O que diferencia os diversos métodos, é a forma de evoluir e o tipo de informação utilizada para definir o próximo ou próximos pontos do espaço.

Podemos classificar os algoritmos de busca em dois grandes grupos: Métodos Diretos e Métodos Aleatórios [SCHWEFEL, 1995]. Esta classificação não é absoluta, havendo divergência entre os autores, como por exemplo [SIDDAL, 1982] que classifica como Método Direto um dos métodos de busca baseado na derivada local da função.

Os métodos diretos são aqueles que investigam o espaço solução buscando informações além do simples valor da função no ponto e tomando a decisão de qual caminho trilhar em busca do máximo através destas informações. Normalmente, as informações utilizadas por esses métodos são derivadas de primeira ordem ou ordem superior que são utilizadas para inferir inclinações e curvaturas. Para resolver o problema da dificuldade de se obter derivadas, alguns métodos trabalham com aproximações numéricas para inferir inclinações.

Estes métodos são bastante eficientes, no entanto, exigem que a função que descreve o espaço de solução seja contínua e diferenciável. Dentre estes métodos podemos citar os de “Subida de Encosta” (“Hill Climbing”) como “Hooke and Jeeves”, Métodos de Gradiente, Newton e outros [SIDDAL, 1982], [SCHWEFEL, 1995], [LACERDA e CARVALHO, 1999].

A obtenção de derivadas analíticas é uma tarefa difícil, e muitas vezes impossível, nas funções objetivo que representam problemas reais. Por este motivo faz-se necessária a utilização de derivadas numéricas. No caso de funções suaves isto não acarretará erros significativos. Mas, no caso de funções com bruscas variações, que é o caso de grande parte das funções que descrevem problemas de engenharia, a

aproximação numérica pode levar a erros grosseiros ou a um mal comportamento do método, causando oscilações ou mesmo até mesmo divergência.

Os Métodos Aleatórios, por outro lado, utilizam somente o valor da função num dado ponto do espaço, e toma a decisão de qual caminho percorrer através de inferências probabilísticas e aleatórias.

[LEMONGE, 1999] denomina os Métodos Aleatórios de métodos Probabilísticos e os classifica como sendo os métodos nos quais se utiliza elementos (pseudo) aleatórios para “testar” direções de busca.

Ainda segundo [LEMONGE, 1999], os métodos probabilísticos podem ser de:

Busca não informada: quando é forte o caráter aleatório da busca (Blind Random Search , Monte Carlo, etc.).

Busca informada: Quando a busca usa informações da própria função para tomar decisões. Por exemplo: algoritmos evolucionistas.

A figura 23 apresenta um esquema classificatório dos métodos de otimização.

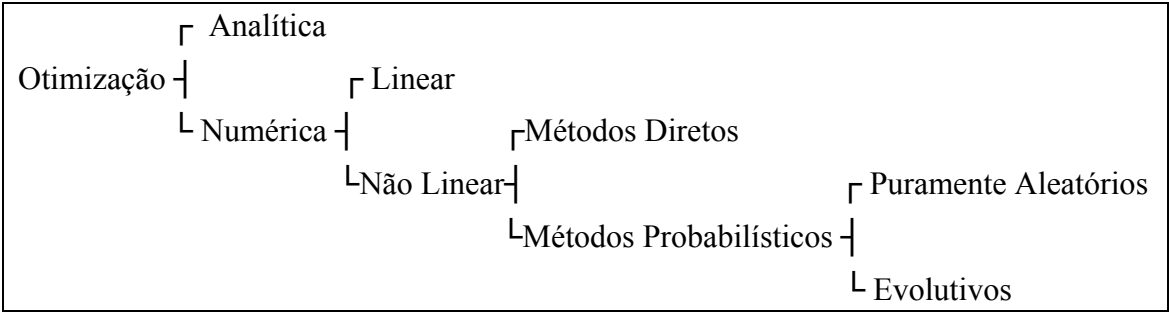


Fig 23 – Classificação dos métodos de otimização

6.6 – Elementos da Otimização

Independente do método utilizado alguns elementos são inerentes ao processo de otimização, sendo eles:

- **Função Objetivo** - é a função, ou sistema, que descreve o problema que está sendo otimizado. Para cada ponto do espaço solução atribui-se um valor da função objetivo. Também é conhecida como função de mérito ou função de custo;
- **Variáveis Livres ou independentes** - são as variáveis do espaço solução que podem variar livremente, ou seja, não dependem de nenhuma outra quantidade ou variável. Definem a dimensão do espaço solução. Cada combinação de variáveis livres definem um ponto no espaço solução;
- **Variáveis Dependentes** - são as outras variáveis envolvidas no problema, que dependem, de alguma forma, das variáveis livres. Seus valores ficam definidos a partir dos valores das variáveis livres;
- **Restrições** - são as limitações impostas ao problema. Definem limites de viabilidade para as soluções encontradas. Funcionam como recortes do espaço solução;
- **Função Penalidade** - a função penalidade quantifica uma restrição aplicada a um ponto. Normalmente é acoplada à função objetivo, formando com ela uma só expressão;
- **Espaço de Busca ou Espaço Solução** - é o conjunto de todas as soluções possíveis, viáveis e não viáveis do problema. É o domínio da função objetivo. Expressa-se através de limites inferior e superior para cada variável livre do problema;
- **Ponto Ótimo** - é o ponto do espaço solução onde a função objetivo é máxima, quando se tratar de maximização, ou mínima no caso contrário.

Capítulo 7: Métodos Aleatórios

7.1 – Introdução

Diferentemente dos métodos diretos, que usam diversas informações obtidas num ponto da função para então tomar a decisão para o próximo ponto, os métodos ditos aleatórios, ou probabilísticos, utilizam uma abordagem baseada na probabilidade e na aleatoriedade para variar os parâmetros de busca.

Os métodos diretos só obtêm bom resultado quando a função a ser otimizada é contínua e diferenciável. Na maioria dos casos de otimização em engenharia a função possui saltos, vincos, descontinuidades, platôs, regiões proibidas, etc., que dificultam ou até mesmo impossibilitam o uso dos métodos diretos. Muitas vezes nem existe uma função matemática que descreva o fenômeno, como por exemplo, nas funções baseadas em simulações de processos ou comportamentos.

Para lidar com esta classe de problema foram desenvolvidos os métodos aleatórios que não necessitam de nada além do valor da função, nos pontos que são avaliados.

Estes métodos podem ser divididos em dois grupos: os métodos puramente aleatórios e os baseados na evolução de uma população. No primeiro grupo podemos citar os métodos conhecidos como “Monte Carlo” , “Pure Random Search” [SCHWEFEL, 1995] , “Simulated Annealing” e o “Exploratory Random Search” [SIDDAL, 1982]. Nenhum destes métodos demonstrou, até hoje, eficiência na solução de problemas muito complexos. O segundo grupo de métodos aleatórios, os Métodos Evolutivos, são baseados na evolução de indivíduos de uma população em busca do ponto ótimo. Estes métodos têm sofrido um grande desenvolvimento nos últimos tempos e mostrado uma eficiência cada vez maior na solução de problemas complexos [SIDDAL, 1982], [SCHWEFEL, 1995]. Um interessante estudo destes métodos pode ser encontrado em [BÄCK et al.,1997].

É atribuído a Brooks, em 1958, o início do uso dos métodos aleatórios em otimização. Em seu trabalho [BROOKS, 1958] ele descreve o método simples, mais tarde conhecido como “pure” ou “blind random search” para encontrar o ponto ótimo de funções experimentais. Num intervalo fechado, $a \leq x \leq b$, vários pontos são escolhidos aleatoriamente. A densidade de probabilidade é constante em toda a região $[a,b]$ e zero fora dela.

O valor da função objetivo deve ser avaliado em todos os pontos. O ponto que tiver o maior (maximização) ou menor (minimização) valor é escolhido como sendo o ponto ótimo.

Este método não obteve o rendimento esperado, mas funcionou como base de estudos para que outros métodos fossem desenvolvidos [GOLDBERG, 1989]. Inclusive os evolutivos.

As primeiras iniciativas na área dos algoritmos evolutivos foram de biólogos e geneticistas interessados em simular os processos vitais em computador [SANTOS, 2000].

Historicamente, o algoritmo genético e a estratégia evolutiva foram desenvolvidos independentemente mais ou menos na mesma época, na década de 1960. O primeiro foi desenvolvido por John Holland, nos Estados Unidos, e popularizado por um de seus alunos, David Goldberg [LACERDA e CARVALHO, 1999]. O segundo foi desenvolvido na Alemanha por Rechenberger e Schwefel [SCHWEFEL, 1995].

Mais recentemente, em 1995, nos Estados Unidos, Kennedy e Eberhardt desenvolveram um método também probabilístico que teve como motivação a observação e a modelagem matemática do vôo dos pássaros, principalmente da sua capacidade de voar em bando organizado. Este método, denominado Método do Enxame de Partículas, tem sofrido um grande desenvolvimento e apresentado ótimos resultados [KENNEDY et al., 2001], [KANNAN et al., 2004], [WETTER e WRIGHT, 2004], [PARSOPOULOS e VRAHATIS, 2004] e [EBERHARDT e SHY, 2004].

Estes métodos são conhecidos como Métodos Evolutivos por serem todos baseados na evolução de um indivíduo ou de uma população de indivíduos. A forma como cada método executa esta evolução é que os difere. Uma completa análise destes métodos pode ser vista em [BÄCK et al., 1997].

7.2 – Estratégia Evolutiva (EE)

O método conhecido como estratégia evolutiva foi desenvolvido por Rechenberger e Schwefel [SCHWEFEL, 1995] e baseia-se na evolução de um ou mais indivíduos na direção que maximize (ou minimize) alguma característica.

O algoritmo básico, desenvolvido inicialmente, é composto das seguintes etapas:

- **Inicialização** - a população é inicializada com um indivíduo, que é identificado como pai;
- **Reprodução** - o pai da geração inicial gera, por mutação, um filho. O material genético deste filho é ligeiramente diferente do pai;
- **Seleção** - o indivíduo mais apto, ou seja, aquele que possui o melhor valor da função objetivo sobrevive e será o pai da próxima geração.

O processo é repetido até que algum critério de parada seja atingido.

Este esquema, baseado em somente dois indivíduos, pai e filho, é conhecido como esquema de dois membros. Uma variante deste esquema foi desenvolvido posteriormente pelos mesmos autores, com o objetivo de melhorar o algoritmo, como uma estratégia de vários membros, descrita a seguir.

- **Inicialização** - uma população E de μ membros é criada.
- **Reprodução** - cada indivíduo gera, por mutação, um número de descendentes de forma a obter um total de λ novos indivíduos que forma uma população intermediária N ;
- **Seleção** - somente os μ melhores dentre os λ descendentes, ou do conjunto $\mu + \lambda$ sobreviverão para ser os pais da próxima geração, E .

A população inicial E de μ indivíduos pode ser gerada aleatoriamente ou escolhida por algum critério previamente definido. Normalmente, quando se usa $\mu > 1$ a

população é gerada por processo aleatório, ou pseudo-aleatório, com distribuição normal para garantir que o espaço de solução seja bem representado na geração inicial.

A representação de um indivíduo é feita através do conjunto das variáveis que definem um ponto no espaço. Define-se mutação como a alteração aleatória do valor de uma variável escolhida aleatoriamente.

Existem algumas variações na composição da população intermediária de onde sairá a próxima geração, a partir dos μ progenitores são gerados λ descendentes, a partir daí pode-se seleccionar os μ melhores considerando-se somente os filhos (μ, λ), ou seleccioná-los do conjunto formado pelos pais e filhos ($\mu + \lambda$). No segundo caso os melhores indivíduos, pais ou filhos, permanecem na população até que algum melhor o suplante.

O ponto central desta estratégia é a escolha da forma de implementar a mutação, ou seja, implementar o aspecto aleatório da busca. Na natureza, a mutação é um evento que raramente ocorre. Na estratégia evolutiva todo o processo depende da ocorrência de uma sequência de mutações. Não podendo ser eventual, deve-se manter então a mutação das variáveis em valores pequenos para que se mantenha a analogia com o mundo natural.

A mutação é implementada como uma variável aleatória, Z , calculada através de uma distribuição normal, com média 0 (zero) e variância δ^2 . Z é utilizado como a variação do valor de uma, ou mais, variáveis livres do problema.

Assim temos:

$$x_{i+1} = x_i + z \quad (36)$$

Onde, x_i é o valor da variável na geração pai e x_{i+1} o valor desta mesma variável na geração filha.

O alcance da mutação é controlado pelo valor da variância δ^2 . Fazendo um paralelo com os métodos determinísticos, pode-se comparar δ^2 com o passo das iterações determinísticas.

Através da escolha de valores adequados de δ^2 podemos balancear a busca global ou local do algoritmo. Valores altos de δ^2 levarão a uma exploração maior do espaço (busca global) enquanto, menores valores de δ^2 levarão a uma exploração maior (busca local).

A determinação da variância para a mutação de cada variável livre torna-se um problema crucial na Estratégia Evolutiva., [SCHWEFEL, 1995] apresenta um extenso estudo sobre o assunto e propõe que o valor seja inversamente proporcional ao número de variáveis do problema, através da relação:

$$\delta = \frac{\Delta x_i}{\sqrt{n}} \quad (37)$$

Onde, n é o número de variáveis e Δx é uma estimativa da distância do ponto i ao ponto ótimo.

Esta estimativa não leva a um valor ótimo mas a um valor superior que deve ser usado no início da busca.

Durante a evolução do algoritmo é necessário regular o valor da variância para garantir uma convergência adequada. Este ajuste deve ser feito de acordo com as características do problema, e tem forte caráter empírico. Como exemplo, [SCHWEFEL, 1995] apresenta a regra do 1/5:

“ Após cada n iterações, verifique quantos casos de sucesso ocorreram nas últimas $10*n$ mutações. Se o número for menor que $2*n$, multiplique a variância por 0,85; divida por 0,85 se mais do que $2*n$ sucessos ocorreram.”

Uma aplicação de Estratégia Evolutivas a sistemas de ancoragem pode ser encontrada em [SANTOS, 2000].

7.3 - Algoritmo Genético (AG)

Algoritmo Genético (AG) é talvez o método evolutivo mais conhecido e, junto com a Estratégia Evolutiva, o mais antigo.

O AG baseia-se na teoria da evolução das espécies proposta por Charles Darwin por volta de 1842 [DARWIN, 1996] . Segundo esta teoria numa dada população de indivíduos, aquele mais adaptado ao meio terá mais chances de sobreviver e consequentemente de gerar mais descendentes, passando as suas características para gerações futuras.

Apesar de desenvolvidas separadamente, a teoria da Evolução das Espécies de Darwin e a teoria genética de Gregor Mendel (1866) se completam. A teoria de Mendel explica como as características, boas ou ruins, são transmitidas de uma geração para outra.

O AG foi desenvolvido por Holland na década de 1960 como método de otimização, tomando elementos das teorias de Darwin e Mendel: Uma população de indivíduos é identificada por seu código genético. Os indivíduos desta população reproduzem-se e suas características são passadas para as gerações seguintes. No entanto, os melhores indivíduos terão uma maior probabilidade de se reproduzir, garantindo uma melhoria das soluções subseqüentes.

Cada indivíduo representa um ponto do espaço de busca da otimização.

Para uma melhor compreensão do método serão apresentadas algumas das terminologias apresentadas por [GOLDBERG, 1989]:

- **Cromossomo** - é uma estrutura de armazenamento de dados que carrega informações sobre as variáveis do problema (geralmente um vetor ou uma cadeia de bits), ou seja, representa apenas uma solução no espaço de busca;
- **Gen ou Gene** - é um parâmetro codificado dentro de um cromossomo, isto é, a parte que representa uma única variável dentro de um vetor de dados;
- **Alelo** - representa uma das alternativas que um gen pode carregar, um valor que pode ser assumido por uma certa variável;

- **Genótipo** - representa toda a informação contida no cromossomo;
- **Fenótipo** - é a estrutura construída a partir do genótipo;
- **Operações Genéticas** - são operações que o algoritmo realiza sobre cada cromossomo (cruzamento e mutação, por exemplo);
- **Seleção** - é a operação genética que tem por objetivo escolher os indivíduos que servirão como pais no processo de reprodução;
- **Cruzamento (*Crossover*)** - é o operador genético responsável pela geração de novos cromossomos a partir da combinação aleatória dos genes de outros cromossomos;
- **Mutação** - é o operador genético, aplicado depois dos processos de seleção e cruzamento, responsável pela diversidade entre os indivíduos, através de modificações na estrutura genética de alguns poucos cromossomos;
- **Função Aptidão** - representa uma medida da capacidade de sobrevivência de um cromossomo no processo de evolução e, conseqüentemente, a probabilidade dele se reproduzir com mais freqüência. Em geral é função da “fitness” do indivíduo.
- **Fitness** - é o valor, para um indivíduo, da função a ser otimizada. É uma composição da função objetivo, com funções de penalidade estabelecidas a partir das restrições do problema;
- **Indivíduo**- é um simples membro da população, formado por um cromossomo e sua aptidão;
- **População** - é um conjunto de indivíduos;
- **Geração** - é o conjunto de indivíduos que faz parte de uma etapa da evolução, ou seja, é a unidade de iteração do algoritmo genético;

Um algoritmo genético, genérico e simplificado foi apresentado por [LEMONGE, 1999]. Conforme mostrado na Figura 24.

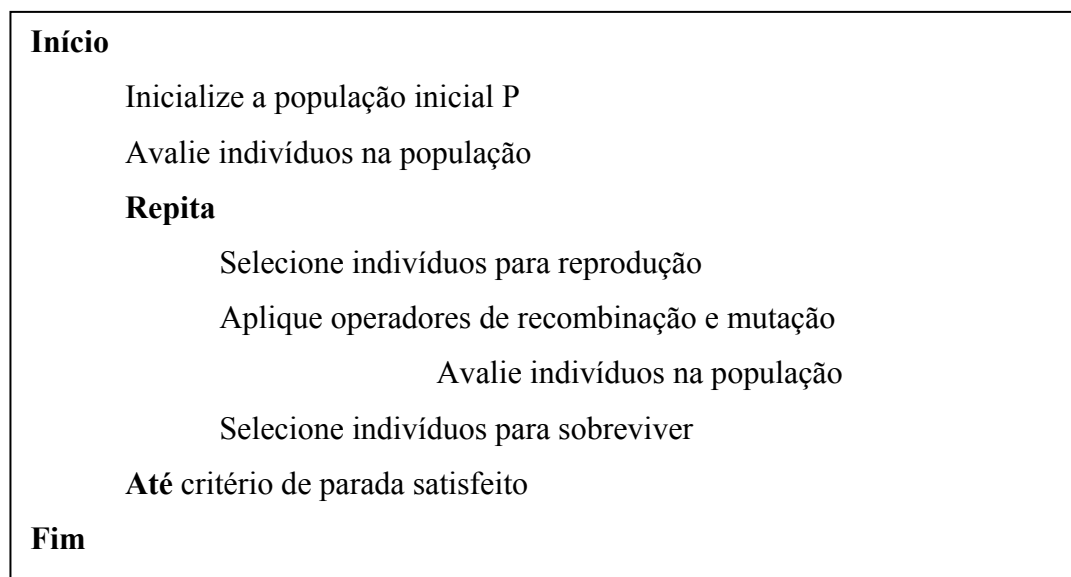


Figura 24 - Algoritmo Genético Básico

A forma mais usual de gerar a população inicial é através de uma distribuição uniforme de pontos por todo o espaço solução. Pode-se também incluir, quando possível, soluções conhecidas previamente.

A avaliação dos indivíduos é o cálculo da função objetivo e das funções penalidade, quando for o caso, para cada indivíduo da população.

O processo evolutivo propriamente dito compreende as etapas de Seleção, Cruzamento e Mutação. A seleção pode ser feita de várias formas, todas levando em conta a aptidão de cada indivíduo. O cruzamento e a mutação são os processos nos quais novos indivíduos são criados. No cruzamento o indivíduo filho é gerado através da mistura do material genético de dois indivíduos pais, e na mutação o indivíduo filho é gerado pela modificação aleatória de um gen de um indivíduo pai.

E o processo se repete até que algum critério de parada seja satisfeito. O melhor indivíduo da população será a solução ótima encontrada.

7.3.1 – População

A população de indivíduos é o conjunto das soluções encontradas. O tamanho da população tem impacto direto na performance do algoritmo. Uma população grande levará a uma melhor exploração do espaço solução, no entanto, gastará mais recursos

computacionais. Uma população pequena será mais eficiente em termos de uso computacional mas levará a uma convergência rápida para um ponto bom que pode ser um ótimo local. Assim, a determinação do tamanho ideal da população vai depender do tipo de problema e da quantidade de recursos computacionais disponíveis.

No algoritmo Genético original [GOLDBERG, 1989] o tamanho da população é constante durante todo o processo evolutivo. Mas alguns autores propõe que a população deve variar de tamanho durante a otimização, imitando o que ocorre na natureza [MICHALEWICZ, 1999], [SHI et al., 2004].

Geralmente a inicialização da população é feita de forma aleatória, podendo ou não conter pontos já conhecidos do espaço solução ('seeding') [VIEIRA, 2004].

7.3.2 - Material Genético e Codificação Binária

Cada ponto do espaço solução é representado por um cromossomo, que nada mais é do que uma seqüência binária com a codificação das variáveis daquele ponto. Deste modo, sendo $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, onde $x_i \in R$ é uma solução possível para um problema qualquer, a representação de x (cromossomo) é feita com a justaposição da codificação binária de cada elemento x_i . Por exemplo, em um problema com três incógnitas, x_1 , x_2 e x_3 , onde uma codificação possível para estas variáveis seja respectivamente 01001, 01010 e 11010, o cromossomo que representa este ponto seria $x = 010010101011010$.

Para uma variável discreta, a decodificação fornece um índice que localiza o valor da variável numa lista de referência, que representa o espaço de busca desta variável.

Desta forma, se uma variável discreta cujo valor fosse 3 seria representada por

$$x_i = 0011, \text{ pois } 3 = 0 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0.$$

Vale lembrar que, para um espaço de busca discreto, o número de valores possíveis para uma variável, ou seja, o número de posições contidas na lista de referência desta variável é dado por $nv = 2^{nb}$, onde nb é o número de bits usado na representação da variável.

Para variáveis contínuas, a decodificação fornece um valor real da forma apresentada no sistema de equações [LACERDA e CARVALHO, 1999]:

$$x = x^i + IND \times \varepsilon$$

$$\varepsilon = \frac{x^s - x^i}{2^{nb} - 1} \quad (38)$$

As variáveis x^i e x^s são, respectivamente, os limites, inferior e superior do espaço de busca, e ε é a precisão da solução.

Conseqüentemente, o número de bits necessários para garantir a precisão ε , é:

$$nb = \log_2 \frac{x^s - x^i}{\varepsilon} \quad (39)$$

Pode-se notar que cadeias mais longas proporcionam maior precisão numérica à solução. No entanto, cadeias muito longas fazem o algoritmo convergir vagarosamente, sendo recomendado usar o mínimo necessário de casas decimais nas soluções.

7.3.3 - Função aptidão

Uma das etapas do algoritmo genético é a seleção de quais indivíduos irão reproduzir e quais irão morrer. A medida desta capacidade de sobrevivência, que no paralelo com a teoria da evolução das espécies seria a quantificação da adaptação do indivíduo ao meio, é dada pela função de aptidão.

A primeira idéia é utilizar a própria função objetivo, a “fitness” do indivíduo, como medida de sua aptidão. Assim a probabilidade de um indivíduo ser selecionado seria a razão entre o seu valor de “fitness” e o somatório de todas as “fitness” da população:

$$P_{Selec_i} = \frac{f_i}{\sum f} \quad (40)$$

Onde P_{Selec_i} é a probabilidade do indivíduo i ser selecionado; f_i , é o valor da “fitness” deste indivíduo e Σf é a soma das “fitness” da população.

No entanto, pode ocorrer o aparecimento de um indivíduo com uma “fitness” muito alta, ou seja, um indivíduo com um valor da função objetivo bem superior ao resto da população, um “super-indivíduo”. Este “super-indivíduo” iria sobreviver durante muitas gerações com alta probabilidade de ser selecionado. Espalharia, rapidamente, seus gens por toda a população dominando-a e levando o método a convergir para si.

Para evitar esta convergência precoce, caso surja um “super-indivíduo”, costuma-se utilizar um mapeamento da “fitness” na função de aptidão.

Existem dois tipos de mapeamento mais usuais: o mapeamento linear e o “ranking”. No mapeamento linear, utiliza-se uma função do tipo:

$$F_i = af_i + b \quad (41)$$

Onde F_i é o valor da aptidão do indivíduo i ; f_i a sua “fitness” e os coeficientes a e b são coeficientes que devem ser ajustados. [GOLDBERG, 1989] sugere que os coeficientes devem ser escolhidos de forma a garantir que a média do valor escalado seja igual a média da “fitness” original na população; o valor mínimo escalado seja 0 (zero) e o valor máximo seja dado por

$$F_{max} = C_m * F_{med} \quad (42)$$

Onde, C_m deve ser escolhido entre 1.2 e 2.

O sistema de “ranking” é mais simples e mais fácil de ser implementado. Neste sistema os indivíduos são ordenados (“rank”) de acordo com o valor da “fitness” de cada um, sendo que, o melhor indivíduo recebe uma nota arbitrária (Máx) e o pior indivíduo recebe nota mínima (Min). Os demais receberão notas interpoladas entre o melhor e o pior baseando-se apenas na sua posição dentro do “rank” (equação 43) . Assim o segundo melhor terá uma nota somente um pouco pior do que o primeiro,

independente da diferença de valor de “fitness”. Com isso, as probabilidades de seleção ficam melhor distribuídas dentro da população, garantindo assim uma maior probabilidade para o melhor indivíduo.

$$F_i = \min + (\max - \min) * \frac{(N - i)}{(N - 1)} \quad (43)$$

Onde

N é o número total de indivíduos;

i a posição do indivíduo dentro do “rank”;

max é o valor do melhor indivíduo;

min é o valor do pior indivíduo.

[LACERDA e CARVALHO, 1999] recomenda o valor 2 (dois) para o melhor indivíduo e 0 (zero) para o pior.

7.3.4 - Seleção

Definida uma medida para a aptidão de cada indivíduo, devemos proceder a escolha daqueles que participarão do processo de reprodução. Esta seleção deve ter um caráter probabilístico, com maiores chances para os indivíduos com maior aptidão.

Existem várias maneiras de proceder à seleção, mas duas se tornaram mais populares pela simplicidade e eficiência: A seleção por Torneio e a seleção na “Roda da Roleta” .

O torneio é o método mais simples e consiste em separar aleatoriamente N indivíduos da população, normalmente $N = 2$ ou 3 , e o selecionado será o de maior aptidão dentre os N.

A roda da roleta baseia-se na idéia de uma roda de roleta tradicional de cassino, modificada de tal maneira que cada número tenha uma área proporcional a sua aptidão. Como a probabilidade da bolinha cair em um número é proporcional ao tamanho da casa, cada indivíduo terá a probabilidade de ser escolhido proporcional a sua aptidão.

Este algoritmo pode ser implementado de diversas formas. [LACERDA e CARVALHO, 1999] sugere um método simples. Depois de ordenada a população de acordo com a sua “fitness” original (“rank”), é atribuída a cada indivíduo uma aptidão

acumulada que é a soma das aptidões de todos os indivíduos melhores do que ele. Utilizando a equação (43) para o cálculo da aptidão de cada indivíduo, a aptidão acumulada variará do valor da aptidão do melhor indivíduo até o valor N, que é o tamanho da população.

Um número aleatório é sorteado no intervalo de 2 a N e o primeiro indivíduo que tiver a aptidão acumulada maior do que o número sorteado é o escolhido.

Tabela 3 – Exemplo de Roleta – “Rank” hipotético de indivíduos.

	Fitness	Aptidão	Apt.Acum.
01	0.479253	2.000	2.000
02	0.470458	1.895	3.895
03	0.462846	1.789	5.684
04	0.451415	1.684	7.368
05	0.448733	1.579	8.947
06	0.447486	1.474	10.421
07	0.435981	1.368	11.789
08	0.432302	1.263	13.053
09	0.430734	1.158	14.211
10	0.430599	1.053	15.263
11	0.429802	0.947	16.211
12	0.429455	0.842	17.053
13	0.426868	0.737	17.789
14	0.425598	0.632	18.421
15	0.425478	0.526	18.947
16	0.424361	0.421	19.368
17	0.000000	0.316	19.684
18	0.000000	0.211	19.895
19	0.000000	0.105	20.000
20	0.000000	0.000	20.000

Se sortearmos o número 12,45, o indivíduo selecionado será o 8.

Como a lista de aptidão acumulada começa no número 2, o primeiro indivíduo da lista tem mais chances de ser sorteado, pois ele será selecionado se for sorteado qualquer número entre 0 e 2. E o último, o pior indivíduo, não será nunca selecionado.

Fazendo uma analogia com a roleta de um cassino, podemos ver que, no exemplo da tabela 3, o melhor indivíduo tem uma área, para receber a bolinha, de tamanho 2 (0 a 2), o último indivíduo tem área igual a 0 (zero) e os demais indivíduos têm suas respectivas áreas de tamanho variando linearmente do maior para o menor. Portanto, o melhor indivíduo tem uma chance 5 % maior de ser selecionado pela bolinha da roleta do que o segundo, e assim sucessivamente.

7.3.5 - Reprodução e Operadores Genéticos

Para efetuar a reprodução, são escolhidos indivíduos da população original que comporão uma população intermediária, conhecida como “Mating Pool”. Nesta população um indivíduo pode participar mais de uma vez, ou seja, o sorteio dos membros da “mating pool” é feito com reposição, um indivíduo pode ser sorteado várias vezes. Cada vez que um indivíduo é sorteado, uma cópia sua é colocada na “Mating pool”, até que o tamanho desta população se iguale ao da original.

Desta população intermediária são retirados os pares para a reprodução. A reprodução de indivíduos pais em indivíduos filhos é feita através da utilização de dois operadores básicos: o cruzamento (“crossover”) e a mutação.

Cada par selecionado sofrerá cruzamento e mutação de acordo com probabilidades previamente escolhidas. Em geral, utilizam-se altas probabilidades de cruzamento, $P_{cross} = 0,6$ a $0,9$, e baixas probabilidades de mutação, $P_{mut} = 0,001$ a $0,1$.

Para cada par selecionado, é sorteado um número aleatório entre 0 e 1. Caso este número seja menor que a probabilidade de cruzamento o par sofrerá o cruzamento. Caso o número seja maior, os filhos serão cópias exatas dos pais. Assim, muitos indivíduos podem permanecer intactos na população, passando de uma geração para a seguinte.

O cruzamento irá mesclar o material genético dos pais para gerar os filhos. Esta mistura genética pode ser feita de diversas formas, e a literatura está repleta de exemplos [GOLDBERG, 1989], [LACERDA e CARVALHO, 1999], [HE et al., 2004].

Dois tipos de cruzamento são considerados básicos e de simples implementação: o cruzamento de um ou mais pontos e o cruzamento uniforme.

No cruzamento de um ponto, o cromossomo dos pais é quebrado em uma posição aleatória e a parte inicial do cromossomo de um pai é conectada à parte final do cromossomo do outro pai para gerar um filho. O segundo filho é obtido com a junção da parte final do cromossomo do segundo pai com a parte inicial do cromossomo do primeiro pai (figura 25).

O cruzamento de mais de um ponto é similar ao de um ponto, sendo que o material genético dos pais é dividido em N partes.

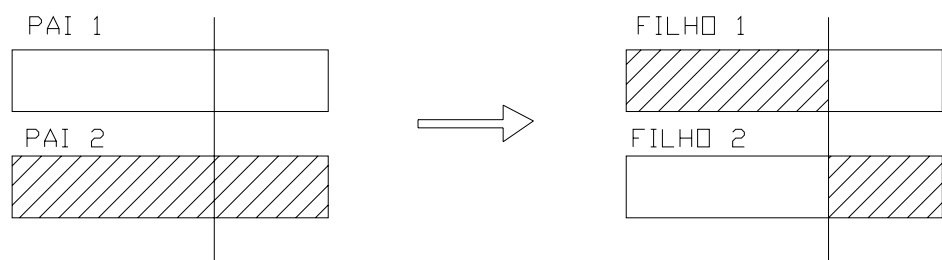


Fig 25 – Cruzamento de um ponto

No cruzamento uniforme cada bit dos pais é trocado aleatoriamente de acordo com a probabilidade de cruzamento, P_{cross} . Ou seja o filho 1 usará um bit do pai1 ou do pai2 de acordo com esta probabilidade.

A mutação é aplicada no filho gerado. Um bit é sorteado e o seu valor é trocado.

São estes operadores, juntamente com o método de seleção, que irão fazer com que a evolução da população ocorra na direção do ponto ótimo.

Analisando com mais cuidado estes operadores veremos que o operador de cruzamento, ao trocar material entre os pais executa uma busca no espaço próximo. O filho tende a ser um ponto na mesma região dos pais. Isto configura uma busca local, ou exploração do espaço em torno de uma mesma região.

Já a mutação, pode gerar um indivíduo em qualquer região do espaço, já que a mudança do material genético é totalmente aleatória. Isso pode levar o método a explorar novas regiões do espaço.

O balanço entre as probabilidades de cruzamento e mutação é um dos principais mecanismos de controle do tipo de evolução que o método terá. Alta probabilidade de cruzamento junto com uma baixa probabilidade de mutação levará a uma tendência maior de explorar o espaço em torno dos melhores membros da população inicial. Já uma alta probabilidade de mutação, independente da probabilidade de cruzamento, levará a uma exploração global. No limite, com $P_{mut} = 1$, teríamos uma busca totalmente aleatória do espaço.

7.3.6 - Sobrevivência

Uma vez gerada a população filha, é necessário decidir quem prossegue na evolução e quem morre. Várias abordagens têm sido feitas, mas três métodos são os mais utilizados para gerar a nova população: Método Geracional, Elitismo e “Steady-State”

O mais simples é o geracional onde toda a população de pais é substituída pela população filha. Este método pode acarretar perda de bons indivíduos que, pelo caráter aleatório do AG, não tenham sido selecionados para reprodução. Ou ainda, tenham tido seu material genético modificado no cruzamento.

Uma solução para os problemas do Geracional é dada pelo Elitismo, onde os M melhores indivíduos da população pai são copiados para a população filha. Este método garante a continuidade dos bons indivíduos, mas pode levar o método a convergir precocemente para estes indivíduos. Para evitar este problema não se deve migrar para a população filha muitos indivíduos da população pai. Normalmente utiliza-se $M=1$.

O método “Steady-State” tem demonstrado bons resultados e consiste em inserir, na população pai, os filhos logo que são gerados, ou seja não há a criação da “Mating Pool”. Cada vez que um par é selecionado, e cruzado, os filhos substituem os piores indivíduos da população pai e já entram no processo de seleção para outros pares.

7.3.7 - Critérios de Parada

Depois de gerada uma nova população pai, o processo se repete até que um critério de parada seja atingido.

Quando se conhece o valor esperado para o ponto ótimo, pode-se estipular uma precisão e parar o processo assim que o melhor indivíduo atingir este valor. Algumas vezes, no caso de processos reais, não se está interessado num ponto ótimo mas sim num ponto de satisfação. Por exemplo, no caso de minimização de uma quantidade pode haver um limite mínimo, abaixo do qual não é mais interessante prosseguir com o processo.

Como na maioria dos casos reais não se conhece o valor ótimo, tem-se que lançar mão de critérios indiretos de avaliação da evolução da população.

O mais comum é estipular um número máximo de gerações e executar o AG até que todas as gerações sejam calculadas.

Pode-se ainda estipular critérios de convergência. Interrompe-se o processo quando uma ou mais das seguintes condições forem satisfeitas:

- Não houver mudança no melhor indivíduo, por um dado número de gerações;
- A média da população se aproximar do valor do melhor indivíduo;
- A variedade genética for menor que um limite mínimo.

Normalmente, usa-se uma combinação destes critérios para garantir que o processo não seja interrompido antes que um valor razoável seja atingido, ou então que o processo se arraste por gerações que não evoluem.

7.3.8 – Codificação Real

A AG foi desenvolvido originalmente com a codificação binária para o cromossomo de cada indivíduo. No entanto, pode-se implementar um Algoritmo Genético sem necessariamente ter o cromossomo codificado, utilizando-se operadores de cruzamento e mutação, adaptados.

Cruzamento

O cruzamento pode ser feito através de operadores aritméticos:

No cruzamento feito por média aritmética, é produzido apenas um filho:

$$filho = \frac{(pai1 + pai2)}{2} \quad (44)$$

Assim como na média geométrica:

$$filho = \sqrt{pai1 * pai2} \quad (45)$$

Um operador mais interessante é o de média aritmética ponderada, que pode gerar dois filhos:

$$\begin{aligned} filho1 &= \beta * pai1 + (1 - \beta) * pai2 \\ filho2 &= (1 - \beta) * pai1 + \beta * pai2 \end{aligned} \quad (46)$$

Onde β é um número aleatório entre $[0,1]$.

Este método só gera filhos no intervalo entre $pai1$ e $pai2$ (interpolação). Para permitir valores fora deste intervalo é utilizado o operador conhecido como cruzamento BLX – α [LACERDA e CARVALHO, 1999] :

$$\begin{aligned} filho1 &= pai2 + \beta * (pai1 - pai2) \\ filho2 &= pai1 + \beta * (pai2 - pai1) \end{aligned} \quad (47)$$

Onde β é um número aleatório gerado no intervalo $[-\alpha, 1+\alpha]$, e α um número pequeno escolhido “a priori”. Por exemplo $\alpha = 0.5$.

Mutação

A mutação pode ser implementada através da simples substituição aleatória do valor de uma variável, que passou no teste de mutação, por outro, escolhido no intervalo de $[x^i, x^s]$, que são os limites de definição das variáveis.

7.4 - Micro Algoritmo Genético (MGA)

Um dos mais graves problemas dos AGs é a convergência precoce. Um bom indivíduo quando é encontrado tende a trazer o processo de busca para o seu entorno, dominando a população e levando o processo a convergir para, o que pode ser um ótimo local.

Para evitar este problema o número de indivíduos deve ser grande o bastante para garantir uma boa amostragem inicial do espaço, além de utilizar taxas de mutação mais altas para uma melhor exploração do espaço.

Só que em alguns problemas de engenharia o custo computacional de avaliar um ponto do espaço é muito alto, e seria muito caro computacionalmente aumentar a população ou explorar exaustivamente o espaço.

[TSUJI et al., 2002] apresenta uma variante do Algoritmo Genético, denominada de Micro Algoritmo Genético (MGA), bastante interessante para estes casos.

No MGA uma população inicial bastante reduzida, $N = 4$, por exemplo, é utilizada no método tradicional. Com uma população tão pequena o método tenderá a convergir rapidamente para um ótimo local. Quando isto ocorre, o melhor indivíduo é mantido na população e todos os outros são novamente gerados, aleatoriamente.

Este processo é repetido até que os critérios de parada sejam atingidos.

Neste trabalho a repetição do algoritmo genético, após a convergência da população, será chamada de “Fase 2 de iteração”.

O MGA tem demonstrado boa performance em termos de número de avaliação da função, quando comparado ao Algoritmo Genético tradicional.

7.5 - Enxame de Partículas (PSO)

7.5.1 – Histórico

A otimização por Enxame de Partículas (“Particle Swarm Optimization”. PSO) foi desenvolvido por Kennedy e Eberhardt [KENNEDY e EBERHARDT, 1995] a partir da modelagem matemática do comportamento social de bandos de pássaros.

Ao levantar vôo um bando de pássaros se comporta de forma aleatória. Mas, em pouco tempo já estão voando organizadamente e, caso seja encontrado um bom lugar para pouso ou um local com alimento, rapidamente todos os animais do bando se dirigem para aquela região.

Baseado nestas observações Kennedy e Eberhardt propuseram um algoritmo de otimização bastante simples e robusto onde cada pássaro é representado por um ponto, ou partícula, e o local de pouso ou alimentação seria um ponto ótimo.

Assim como o Algoritmo Genético, o PSO é um algoritmo evolutivo baseado em uma população de indivíduos, só que, a evolução da população não se faz com cruzamento e mutação, mas sim com o “vôo” de cada partícula pelo espaço de busca. E o conceito de gerações é substituído pelo conceito de intervalos de tempo.

O principal elemento que produz a evolução dos indivíduos é a sua “velocidade de vôo”, que é definida como sendo um vetor dentro do espaço de busca. A cada intervalo de tempo a posição da partícula é calculada em função da posição e velocidade no instante anterior, a velocidade é, então, atualizada.

Assim a posição futura de cada indivíduo é calculada através da soma da posição atual com a sua velocidade atual, e, a velocidade de cada indivíduo é dada pela soma de três fatores:

- a sua velocidade anterior;
- a distância e direção do indivíduo ao melhor ponto já visitado pelo bando e
- a distância e direção do indivíduo ao melhor ponto já visitado por ele mesmo.

7.5.2 – Algoritmo Básico

O grande sucesso que este algoritmo alcançou em tão pouco tempo é, em grande parte devido a sua simplicidade. Todo o método baseia-se em duas fórmulas:

$$\begin{aligned} vel_{i+1} &= Vel_i + rnd() * 2 * (Gbest - x_i) + rnd() * 2 * (xbest - x_i) \\ x_{i+1} &= x_i + vel_{i+1} \end{aligned} \quad (48)$$

Onde :

x = posição da partícula

vel = velocidade

rnd() = número aleatório com distribuição homogênea no intervalo [0,1]

Gbest = melhor ponto já visitado pelo bando

Xbest = melhor ponto já visitado pela partícula

i = intervalo de tempo atual.

O coeficiente de valor 2 na fórmula original foi utilizado para fazer com que o número aleatório gerado tivesse média 1.

Os termos $(Gbest - x_i)$ e $(xbest - x_i)$ são chamados de termos de aceleração por distância [KENNEDY e EBERHARDT, 1995] pois controlam a variação da velocidade.

Inicialmente, a cada partícula é atribuída uma velocidade e uma posição aleatórias. E, a cada intervalo de tempo, a velocidade e a posição são atualizadas de acordo com a equação (48).

Analisando a equação (48) pode-se ver que a velocidade da partícula possui três componentes. O primeiro é um componente inercial, função da velocidade prévia da partícula e que tende a manter a velocidade inalterada. O segundo, um componente histórico do bando, que tende a levar a partícula para o ponto mais promissor já

visitado pelo bando. E o terceiro componente é um componente histórico pessoal da partícula que faz com que ela tenda a retornar ao melhor ponto já visitado por ela.

O algoritmo pode ser dividido nas etapas mostradas na figura 26.

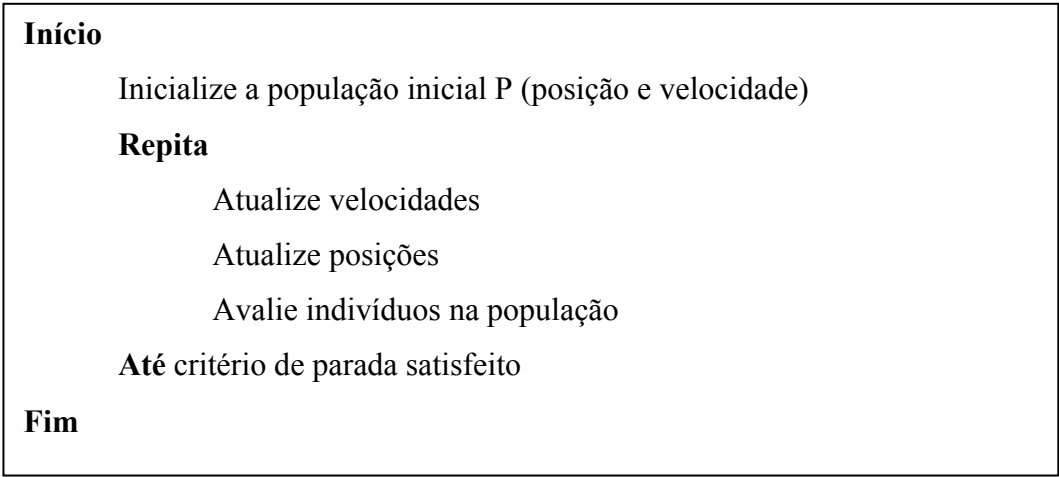


Figura 26– Algoritmo básico de enxame de partículas

Para evitar que a velocidade cresça indefinidamente [KENNEDY e EBERHARDT, 1995a] sugere que se limite a velocidade máxima de cada partícula ao valor do limite de cada variável.

Assim,

$$V_{\max} = x_{\max} - x_{\min}$$

(49)

Onde:

$x_{\max}$ – é o limite superior da variável livre

$x_{\min}$ é o limite inferior.

A cada iteração a velocidade de cada partícula é limitada a este valor.

A capacidade de explorar o espaço é dada pelos componentes inercial e histórico pessoal. Sem estes componentes todas as partículas iriam rapidamente para o melhor ponto visitado, acarretando uma convergência precoce.

No entanto, esta capacidade de explorar bem o espaço leva o método a ter um comportamento ruim quando as partículas se aproximam do ótimo. Elas tendem a “voar” em torno do ponto ótimo, com uma lenta convergência.

Para melhorar a performance do método, diversas variantes foram desenvolvidas. A seguir serão apresentadas algumas destas variantes.

7.5.3 – Inércia

[EBERHARDT e SHI, 1998] propôs a modificação dos coeficientes, fixado no algoritmo básico, no valor 2, para um coeficiente de ponderação que controle a influência do melhor do bando e do melhor pessoal. E também a introdução de um coeficiente para ponderar a influência da inércia no comportamento da partícula. Nesta variante, a fórmula do cálculo da velocidade é dada por:

$$\begin{aligned} vel_{i+1} &= w * Vel_i + C1 * rnd() * (Gbest - x_i) + C2 * rnd() * (xbest - x_i) \\ x_{i+1} &= x_i + vel_{i+1} \end{aligned} \quad (50)$$

Onde

w = Coeficiente de ponderação da inércia

$C1$ = Coeficiente de ponderação do melhor global

$C2$ = Coeficiente de ponderação do melhor pessoal.

7.5.4 – Melhor Global e Melhor Local

O algoritmo básico usa o melhor ponto já visitado por todo o grupo, e é conhecido como GPSO (“Global Particle Swarm Optimization”). Uma variante proposta por [EBERHARDT e SHI, 2002] introduz o conceito de vizinhança. Somente as L partículas mais próximas influenciam a partícula i . Esta variante é conhecida como LPSO (“Local Particle Swarm Optimization”). A proposta era aumentar a capacidade de

exploração do espaço, dividindo o bando em vizinhanças e cada uma agindo independente das outras.

Os resultados obtidos com o LPSO não foram ainda suficientes para suplantarmos o método tradicional (GPSO), que ainda é o mais utilizado.

7.5.5 – Variação Linear da Inércia

O maior problema com o PSO, em geral, é a dificuldade que o método tem de convergir para o ótimo nas iterações finais. Ele se mostra muito eficiente em explorar o espaço nas iterações iniciais mas tende a “gastar” muitas iterações quando se aproxima do ótimo.

O principal agente deste comportamento é a componente inercial da velocidade. Que tende a manter a partícula na velocidade anterior. Para tentar minimizar este problema, [EBERHARDT e SHI, 2000] propôs que o coeficiente w fosse variado durante as iterações. Assim um alto valor para o coeficiente no início do processo levaria a uma melhor exploração do espaço, através da preponderância da componente inercial sobre as outras, conforme o método evolui o valor de w diminui, aumentando a influência relativa dos dois outros termos.

[EBERHARDT e SHI, 2000] propôs, empiricamente, uma variação linear do coeficiente de 0,9 a 0,4.

Assim,

$$w_i = (w_{ini} - w_{fin}) \frac{(N - i)}{N} + w_{fin} \quad (51)$$

Onde:

w_{ini} – Valor inicial para o coeficiente de inércia

w_{fin} - Valor final para o coeficiente de inércia

N – Número total de iterações

[RATNAWEERA e HALGAMUGE, 2004] apresentou uma extensão da proposta de Ebehardt, segundo a qual, os outros coeficientes (C_1 e C_2) da formula básica também variam em função da iteração atual (i):

$$C1_i = (C1_{fin} - C1_{ini}) \frac{i}{N} + C1_{ini} \quad (52)$$

$$C2_i = (C2_{fin} - C2_{ini}) \frac{i}{N} + C2_{ini} \quad (53)$$

Estas modificações no cálculo dos coeficientes trouxe ganhos expressivos na performance do algoritmo conforme apresenta [EBEHARDT e SHI, 1999] e [RATNAWEERA e HALGAMUGE, 2004].

7.5.6 – Coeficiente de Constrição

[CLERC e KENNEDY, 2002], analisando a estabilidade do método, propôs um limitador de velocidade diferente do de Kennedy, chamado de Fator de Constrição. Este fator multiplica a equação de velocidade limitando-a, e é função dos coeficientes $C1$ e $C2$

Assim,

$$vel_{i+1} = K * [Vel_i + C1 * rnd() * (Gbest - x_i) + C2 * rnd() * (xbest - x_i)] \quad (54)$$

$$x_{i+1} = x_i + vel_{i+1}$$

$$K = \frac{2}{\left| 2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4 * \varphi} \right|}$$

$$\varphi = C1 + C2 \quad (55)$$

$$\varphi > 4$$

Um estudo comparativo entre a performance do PSO utilizando o fator de constrição e utilizando o coeficiente de inércia pode ser visto em [EBERHARDT e SHI, 2000].

Observando as duas formulações pode-se notar que o fator de constrição é um caso particular do método, e as equações (54) e (55) são equivalentes à equação (50) quando se faz

$$w = K$$

e $C1$ e $C2$ atendem a condição: $C1 + C2 > 4$.

7.5.7 – Variação Não Linear da Inércia

[CHATTERJEE e SIARRY, 2004] apresenta uma outra proposta para o cálculo da variação da inércia, aumentando ainda mais a convergência ao final do processo de otimização.

Ao invés de utilizar uma variação linear, como proposto por [EBERHARDT e SHI, 2000], Chatterjee e Siarry propõe uma variação segundo a seguinte fórmula:

$$w_i = \left\{ \frac{(N - i)^n}{N^n} \right\} * (w_{ini} - w_{fin}) + w_{fin} \quad (56)$$

Onde

w_i – Coeficiente de inércia para a iteração i

N – Número máximo de iterações

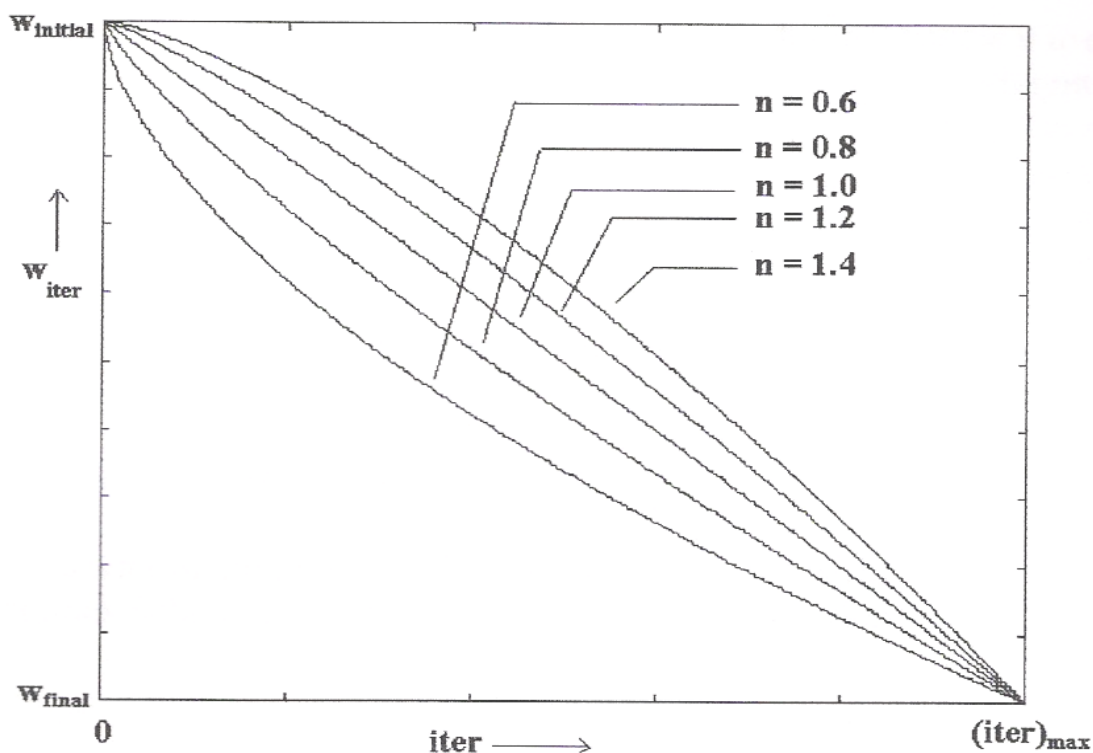
i – Iteração atual

w_{ini} – Coeficiente inicial

w_{fin} – Coeficiente final

n – Expoente de não linearidade

Com esta formulação a influência da inércia pode ser melhor controlada. Os valores inicial e final do coeficiente são pré-estabelecidos, mas o comportamento do mesmo durante as iterações depende do valor de n . A figura 27 ilustra o comportamento da variação de w em função de n .



Fonte: [CHATERJEE e SIARRY, 2004]

Figura 27 - Variação do coeficiente w em função da iteração i e do expoente n .

[VENTER e SOBIESZCZANSKI-SOBIELSKI, 2002] apresenta uma outra forma de variação para a inércia, utilizando um coeficiente de variação (COV) da função objetivo.

A inércia seria ajustada pela seguinte expressão:

$$w_{new} = w_{old} * f_w \quad (57)$$

Onde f_w é um valor entre 0 e 1.

A inércia não é atualizada a cada iteração, ao invés disso, um coeficiente de variação é calculado para um pequeno grupo de partículas e a inércia é ajustada pela equação (57) somente se esse coeficiente ficar abaixo de um valor pré determinado.

O coeficiente de variação é dado por:

$$COV = \frac{DesvPad}{Média} \quad (58)$$

Onde, DesvPad é o desvio padrão e Média é a média dos valores da função objetivo para um grupo de partículas.

Em seu trabalho, [VENTER e SOBIESZCZANSKI-SOBIELSKI, 2002] utilizou um grupo de 20% do total de partículas, um valor limite para $COV = 1$ e $f_w = 0,975$.

7.5.8 – Congregação Passiva

PSO é inspirado no comportamento social de grupos de animais como cardumes de peixes e bando de aves. Cada um destes grupos apresentam uma estabilidade espaço-temporal, ou seja, o grupo se move persistentemente sem perder a forma e a densidade [HE et al., 2004].

Diferentes forças biológicas são essenciais para preservar a integridade destes grupos. São as forças de agregação social e as forças de congregação. Podemos distinguir dois tipos de agregação e congregação: a Passiva e a ativa.

A agregação é motivada por forças físicas, internas ou externas ao grupo.

A agregação passiva é a que ocorre sem a participação do indivíduo, como a concentração de plâncton em uma determinada área. É ocasionada por forças externas ao grupo.

A agregação ativa ocorre devido a um agente de atração para o grupo, como comida ou espaço, com cada membro do grupo contribuindo ativamente para a agregação.

Diferentemente da agregação, a congregação, é uma força essencialmente social. A fonte de atração para cada indivíduo é o grupo em si mesmo. Podendo ser ativa, quando há uma atração pessoal entre os membros do grupo, como um parentesco, ou pode ser passiva, quando o grupo se mantém coeso mesmo sem relação direta entre os componentes.

Pode-se correlacionar os termos

$$C1 * rnd() * (Gbest - x_i) \tag{59}$$

e

$$C2 * rnd() * (xbest - x_i)$$

da equação (50) com agregação ativa, se considerarmos que os pontos Gbest e xbest são pontos de atração para os indivíduos do grupo.

[HE et al., 2004] propõe a adição de um termo ao PSO, que remeteria à forças de congregação, ou seja, um termo que representasse a atração do indivíduo pelo grupo:

$$C3 * rnd() * (R - x_i) \tag{60}$$

Onde, R, representa uma partícula, diferente de i, escolhida aleatoriamente do enxame e C3 um coeficiente de congregação passiva.

7.5.9 – Atração Social

Independentemente de [HE et al., 2004], desenvolveu-se para este trabalho uma abordagem similar para a influência do grupo sobre a partícula, que foi designada de Atração Social.

Verificou-se, por experimentos, que havia uma tendência do grupo a migrar rapidamente para a região do melhor ponto obtido até aquele momento. Com a adição do termo de atração social, a exploração do espaço tornou-se mais abrangente.

O termo desenvolvido é bastante similar ao de [HE et al., 2004], só que, ao invés de usar uma partícula escolhida aleatoriamente do enxame, usou-se o centróide do enxame. Com isso acredita-se que o grupo como um todo fica melhor representado.

O termo (60) é substituído por:

$$C3 * rnd() * (C - x_i) \quad (61)$$

Onde

$$C = \frac{\sum_{j=1}^N x_j}{N} \quad (62)$$

Para melhorar ainda mais o rendimento do método, foi feita uma modificação no termo de atração social. Ao invés de usar o centróide do enxame, passou-se a usar um “centro de massa”, onde a massa da partícula é representada pelo valor da função no ponto.

Assim o termo C fica expresso por:

$$C = \frac{\sum_{j=1}^N f_j x_j}{\sum_{j=1}^N f_j} \quad (63)$$

Capítulo 8: Implementação Computacional

8.1 – Introdução

Os métodos e variantes citados anteriormente foram implementados em um módulo do programa SITUA.

Neste módulo é possível selecionar e controlar os parâmetros do método escolhido, bem como definir os limites superior e inferior para cada dimensão do problema e definir a sua precisão.

A figura 28 apresenta um recorte da tela do módulo onde aparecem as opções para seleção do método e os controles dos diversos parâmetros.

The screenshot displays a software interface for configuring optimization parameters. It is organized into several sections:

- Modelo de Otimização:** Contains radio buttons for 'GA Clássico' (selected), 'Micro GA' (with a value of 10), 'PSO', 'Evolutivo', and a checkbox for 'Usar semente fixa'.
- Parâmetros de Evolução:** Includes input fields for 'Tamanho da População' (10), 'Probabilidade de Crossover' (0.8), and 'Probabilidade de Mutação' (0.05). It also has radio buttons for 'Cross. Uniforme' and 'Cross. 1 Ponto' (selected).
- Geração:** Features radio buttons for 'Geracional', 'Steady State', and 'Elitismo' (selected, with a value of 1), along with a checkbox for 'Sel. por Torneio'.
- Critério de Parada:** Includes radio buttons for 'Numero Maximo de Gerações' (with a value of 300) and 'Valor Limite para a função objetivo' (with a value of 1000). It also has radio buttons for 'Média x Melhor' (selected, with N = 0.032 and 10), 'Média', and 'Duplo (Média)' (with K = 0.98).
- Opções de Código:** Contains checkboxes for 'Save' and 'Restart', and radio buttons for 'Binário' (selected) and 'Real'.
- Footer:** Includes a checkbox for 'Relatório detalhado', and three buttons: 'Roda', 'Ok', and 'CANCELA'.

Figura 28 – Opções para seleção do Método de Otimização e parâmetros

Neste módulo é possível optar pelos seguintes modelos de otimização:

- Algoritmo genético (GA clássico)
- Micro Algoritmo Genético (Micro GA)
- Enxame de Partículas (PSO)
- Estratégia Evolutiva (Evolutivo)

Na figura 28 pode-se ver as opções disponíveis neste módulo, são elas:

- **Tamanho da população** – Número de indivíduos para todos os métodos;
- **Probabilidade de Cruzamento** – Valor utilizado para decidir se um par de cromossomo irá sofrer cruzamento. Se um valor sorteado for menor do que este valor, o par sofrerá a operação de cruzamento;
- **Probabilidade de Mutação** – Valor utilizado para decidir se um cromossomo irá sofrer mutação. Se um valor sorteado for menor do que este valor, o cromossomo sofrerá mutação;
- **Cruzamento Uniforme/ Cruzamento de 1 ponto** – Define o tipo de operador de cruzamento que será utilizado: uniforme ou de um ponto;
- **Geracional/Steady State/Elitismo** – Seleciona o tipo de sobrevivência que será utilizado. No caso do Elitismo é possível definir quantos indivíduos passarão para a próxima geração (Elite);
- **Seleção por Torneio** – Se marcado, define o torneio como forma de seleção para os indivíduos que irão participar do cruzamento e mutação. Nesta implementação o torneio é sempre entre dois indivíduos escolhidos aleatoriamente da população. Se não estiver marcado a forma de seleção escolhida será a roda da roleta com “ranking” e utilização da equação (43);
- **Save/Restart** – Permite salvar o estado de uma otimização e recomeçar o processo mais tarde (ainda não operacional);
- **Binário/Real** – Define a forma de codificação do indivíduo. No caso de estar selecionada a codificação real o cruzamento será do tipo média aritmética ponderada;
- **Usar Semente Fixa** – Opção para utilizar sempre a mesma semente no algoritmo de geração de números aleatórios. Com isso garante-se a repetição dos valores entre duas otimizações, para efeito de verificação;

- **Relatório Detalhado** – Opção para imprimir, a cada geração, informação detalhada de cada indivíduo como valor da função, coordenadas e velocidade, cromossomo e outras observações.
- **CrITÉrios de parada:**
 - **Número Máximo de Gerações** – É o critério mais simples. O processo é interrompido quando um número N de gerações é atingido;
 - **Valor Limite para a função objetivo** – Também conhecido como valor de satisfação. Pode ser utilizado quando conhece-se um valor da função objetivo que satisfaça algum critério subjetivo. Além deste valor a melhoria do sistema não terá significado prático;
 - **Média x Melhor** – O processo de otimização será interrompido quando o valor da média for maior que K , $K=[0,1]$, vezes o valor do melhor indivíduo, durante n gerações. O número de gerações n é expresso em função de N , o número máximo de gerações;
 - **Média** - O processo de otimização será interrompido quando a variação do valor da média não for maior do que K , $K=[0,1]$, durante n gerações. Ou seja, a média está estacionária;
 - **Duplo (Média)** – Nesta opção os dois critérios anteriores são aplicados simultaneamente, ou seja, o valor da média deve se manter próximo do valor do melhor indivíduo durante n gerações e a média não deve variar além do limite K durante estas n gerações.

8.2 – Métodos Implementados

8.2.1 - Algoritmo genético (GA clássico)

Foi implementada uma versão básica de algoritmo genético. As opções apresentadas acima podem ser combinadas para obter-se variações do algoritmo básico, ou seja, codificação binária ou real, cruzamento de um ponto ou uniforme, etc.

8.2.2 - Micro Algoritmo Genético (Micro GA)

O Micro Algoritmo Genético implementado utiliza as mesmas rotinas e as mesmas opções do algoritmo genético básico. O único dado a mais é o número de iterações da fase 2, ou seja, o número de vezes que processos com algoritmos genéticos básicos sequenciais serão utilizados.

O critério de parada para a fase 1, ou seja, uma realização do algoritmo genético, também é diferenciado. O algoritmo pára quando a diferença entre o material genético do melhor indivíduo e dos outros indivíduos for menor do que 5%. Com esse nível de diversidade genética admite-se que o algoritmo convergiu e não haverá mais melhora .

8.2.3 - Enxame de Partículas (PSO)

O algoritmo de otimização por Enxame de Partículas foi implementado com a estratégia global (GPSO) e com atualização da velocidade e posição dadas pelas equações (64). Não foram implementados nem o fator de constrição, nem a estratégia local (LPSO).

$$\begin{aligned} vel_{i+1} &= w_i * Vel_i + C1 * rnd() * (Gbest - x_i) + C2 * rnd() * (x_{best} - x_i) + C3 * rnd() * (C_m - x_i) \\ x_{i+1} &= x_i + vel_{i+1} \end{aligned} \quad (64)$$

Onde

W_i – Inércia com variação não linear, conforme equação (56)

$C1, C2 \text{ e } C3 = 1.$

C_m – Centro de massa, conforme equação (63).

8.2.4 - Estratégia Evolutiva (Evolutivo)

A Estratégia Evolutiva foi implementada de forma simples, e somente na forma de multi membros (μ, λ) , com $\lambda = \mu$.

8.3 – Parâmetros de Acompanhamento da Evolução

Durante a execução do processo de otimização, algumas quantidades relativas ao desenvolvimento da população podem ser acompanhadas num gráfico como o apresentado na figura 29. Onde, os valores da “fitness” do melhor indivíduo são mostrados em azul e do pior indivíduo em cinza. Os valores da média e do desvio padrão da “fitness” da população, são mostrados, respectivamente em vermelho e rosa. E a margem k , do critério de parada, em amarelo.

Além do gráfico, um relatório de acompanhamento da evolução é impresso (figura 30), podendo mostrar detalhes da população, ou não. Ao fim da otimização é impresso um resumo com o tempo total, número de indivíduos com problemas de convergência e número de indivíduos penalizados. Além dos dados do melhor indivíduo.

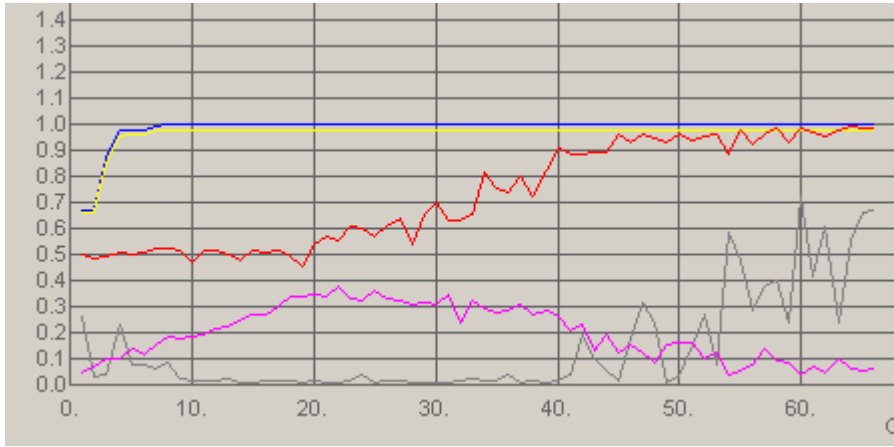


figura 29 – Gráfico de acompanhamento da evolução

Dados da Evolução da População:

Tempo total de simulação :
Número total de avaliações da função: 2728
Número total de indivíduos penalizados: 0
Número total de indivíduos não penalizados: 2728
Número total de indivíduos com falha de convergência: 0

Ger	Melhor	Pior	Média	DesvPad	NumAval	NaoConv	N.Ind.Pen.	D.Euc.Norm	Tempo
1	0.669993	0.256696	0.496605	0.047119	100	0	0	29.209307	

Figura 30 – Relatório de acompanhamento

Para melhor acompanhar a evolução da população, nos diversos métodos, foram criados alguns parâmetros de acompanhamento que são apresentados no relatório.

Para os métodos baseados em cromossomos, avalia-se a diversidade genética da população em termos de percentual de bits diferentes entre o melhor indivíduo e o resto da população.

Para o PSO foi criado o conceito de energia do sistema, cuja expressão é:

$$energ = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{nparam} Vel_{i,j}^2}}{N} \quad (65)$$

Onde:

N – Número de indivíduos da população

Nparam – Número de parâmetros

$vel_{i,j}$ - Velocidade no parâmetro j da partícula i.

A energia do sistema indica o nível de movimento, ou “agitação” , das partículas. Quando a energia decresce significa que o método está convergindo, quando a energia aumenta há divergência e ocorre o que denomina-se de “explosão do sistema” [CLERC e KENNEDY, 2002].

Outro parâmetro de acompanhamento que foi desenvolvido, e utilizado para todos os métodos foi o denominado Distância Euclideana Normalizada (DEN), cuja expressão é dada por:

$$DEN = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{nparam} \left(\frac{Valor_{i,j} - Gbest_j}{ParMax_j - ParMin_j} \right)^2}}{N} \quad (66)$$

Onde:

N – Número de indivíduos da população

Nparam – Número de parâmetros

$valor_{i,j}$ - Valor do parâmetro j da partícula i.

Gbest_j – Valor do parâmetro j do melhor ponto.

ParMax_j – Valor Máximo do parâmetro j.

ParMin_j – Valor Minimo do parâmetro j.

A distância euclideana normalizada dá uma idéia da dispersão dos pontos pelo espaço de busca.

Analizando em conjunto a variação da energia e a variação da distância euclideana normalizada tem-se uma boa informação da convergência da análise.

Considerando-se que os métodos aqui desenvolvidos serão aplicados a um processo extremamente caro em termos de gasto computacional, como é a análise de sistemas de ancoragem, são computados também, a cada geração, o número de:

- indivíduos efetivamente calculados, considerando-se que indivíduos repetidos não são calculados duas vezes;
- indivíduos penalizados;
- indivíduos com falha de convergência.

8.4 - Exemplos comparativos

Conforme dito anteriormente, a otimização de sistemas de ancoragem é um processo com alto consumo de tempo de processamento. Sendo assim, seria inviável comparar todos os métodos e variantes em diversos exemplos de ancoragem.

Optou-se, então, por selecionar os métodos que fossem mais promissores em termos de robustez e precisão para uma população extremamente reduzida.

Enquanto na literatura existente a maioria das comparações entre métodos é feita com populações variando entre 20 e 1000 indivíduos, [EBERHARDT e SHI, 1999] , [EBERHARDT e SHI, 2000], [TRELEA, 2003] e [CHATERJEE e SIARRY, 2004], optou-se, neste trabalho, por testar os métodos apresentados para uma população de somente 10 (dez) indivíduos. Com isso busca-se reduzir o número de avaliações de ancoragem e espera-se não reduzir a qualidade do resultado.

8.4.1 – Funções de Comparação

Com todos os métodos implantados, e todos os parâmetros de acompanhamento definidos, foram escolhidas 3 funções teste para poder comparar cada método em relação à robustez e eficiência. As funções selecionadas foram as funções de Rosenbrock e a Schaffer f6, bastante utilizadas como funções de teste e comparação conforme pode ser visto em [EBERHARDT e SHI, 1999], [EBERHARDT e SHI, 2000], [TRELEA, 2003] e [CHATERJEE e SIARRY, 2004]. Foi também utilizada uma função mais simples, denominada função teste, para fins de comparação e ajuste de algumas variantes do PSO.

Estas funções foram implementadas no programa para a geração de resultados comparativos.

Duas das funções selecionadas, teste e Schaffer f6, foram utilizadas como funções bidimensionais, o que facilita a visualização da evolução das populações de indivíduos. A função de Rosenbrock foi escolhida por ser uma função multidimensional tal como são os problemas de engenharia.

A função teste é apresentada na figura 31 e sua fórmula é dada por:

$$f = 1 + \frac{\cos\left(\frac{x^2 + y^2}{2}\right)}{1 + (x^2 + y^2)} \quad (67)$$

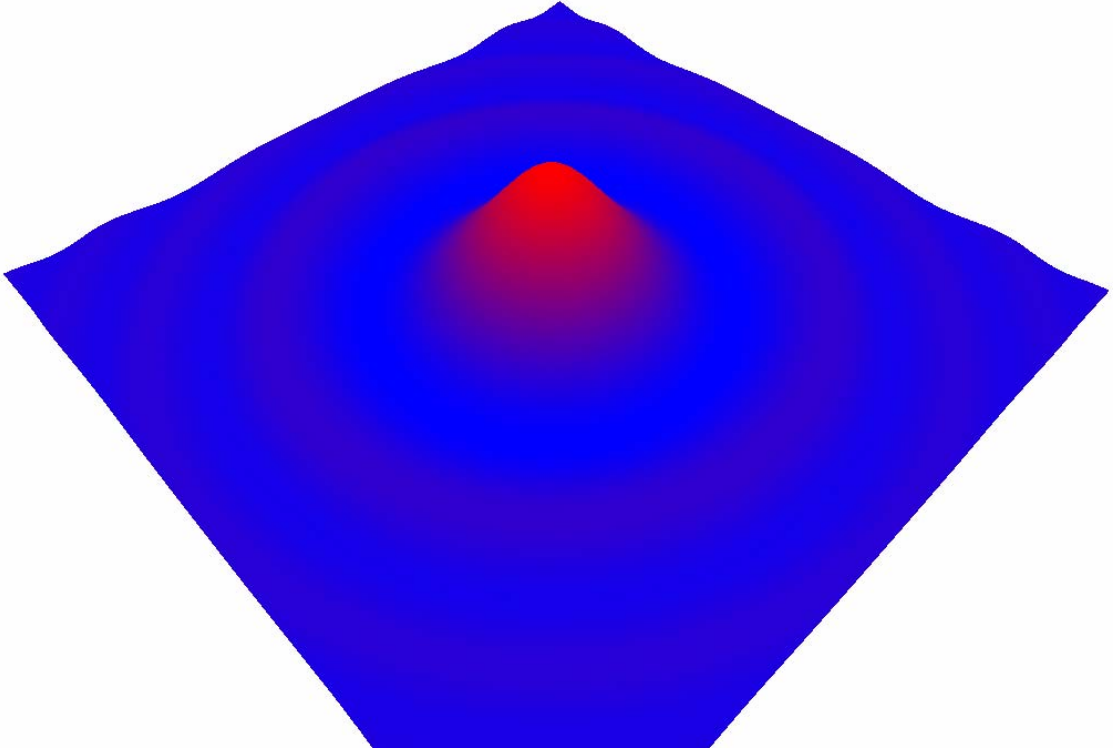


Figura 31 – Função Teste Unimodal

A função Schaffer f6 utilizada é representada pela equação (68) . Foram utilizadas 2 dimensões e os valores -100 e 100 como limites para cada dimensão. O trecho central da função é apresentado na figura 32.

$$f = 0.5 - \left(\frac{\sin^2(\sqrt{x^2 + y^2}) - 0.5}{(1 + 0.001(x^2 + y^2))^2} \right) \quad (68)$$

Esta função tem uma característica interessante como função de comparação. Não há UM ponto máximo, mas, uma região anelar em torno do zero onde a função exibe o valor máximo (multimodal).

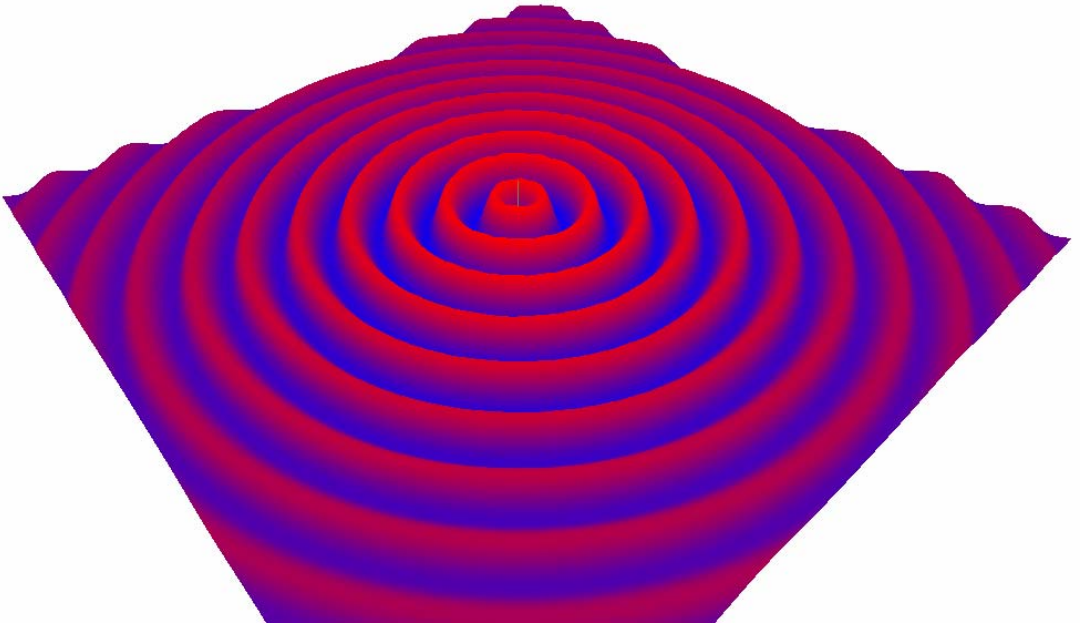


Figura 32 – Função Schaffer f6

A função de Rosenbrock utilizada representada pela equação (72). Foram utilizadas 30 dimensões e os valores -30 e 30 como valores limites.

$$f = \sum_{i=1}^{n-1} (1000 * (x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2) \quad (69)$$

Onde ,

n – Número de dimensões (30)
 x_i – Valor do parâmetro i.

8.4.2 – Análises Comparativas

As principais características desejadas para um algoritmo de otimização em engenharia são precisão e robustez. Precisão em encontrar o ponto ótimo, e robustez para lidar com as funções que descrevem os problemas de engenharia.

No entanto, no caso de otimização de ancoragem, o custo computacional de uma avaliação da função objetivo é muito alto e, uma característica adicional deve ser observada no algoritmo de otimização: a eficiência computacional. Ou seja, obter um bom resultado com o menor número de avaliações da função objetivo.

Para efeito de comparação dos algoritmos e variantes foram feitos dois tipos de análise. O primeiro tipo foi a execução dos diversos métodos com a mesma semente aleatória, ou seja, a população inicial, gerada aleatoriamente, foi sempre a mesma.

No segundo tipo de análise, foram feitas diversas simulações (100) de cada método com cada uma das funções e o valor médio das análises foi usado como comparação.

Para cada função teste foram analisados todos os métodos, incluindo algumas variantes, com as mesmas características de população.

Os dados invariantes nos testes foram:

- Tamanho da população: 10 indivíduos
- Número Máximo de avaliações da função: 300
- Critério de parada: 10 gerações consecutivas com o valor da média maior ou igual a 98% do valor do melhor indivíduo.

Para os algoritmos genéticos, foram utilizados:

- Taxa de cruzamento de 0,8
- Taxa de mutação de 0,05
- Sobrevivência por elitismo de 1 (um) indivíduo.
- Seleção por “Roda da Roleta” (Rank).

Foram comparados os seguintes métodos:

- Algoritmo Genético Básico com Cruzamento de Um ponto
- Algoritmo Genético Básico com Cruzamento Uniforme
- Algoritmo Genético Básico com Codificação Real
- Micro Algoritmo Genético com Cruzamento de Um ponto
- Estratégia Evolutiva
- Otimização por Enxame de Partículas Sem variação de Inércia ($w=1$)
- Otimização por Enxame de Partículas Com variação Linear de Inércia
- Otimização por Enxame de Partículas Com Variação Não Linear da Inércia
- Otimização por Enxame de Partículas Com Variação Não Linear da Inércia e Atração Social ao Centróide
- Otimização por Enxame de Partículas Com Variação Não Linear da Inércia e Atração Social ao Centro de Massa

No caso do Micro Algoritmo Genético foram permitidas 30 gerações do algoritmo genético básico e 10 gerações da fase 2.

Como parâmetros de comparação foram escolhidos:

- **valor máximo** - Valor máximo da função objetivo atingido pelo método;
- **Número de Avaliações** - O número total acumulado de avaliações da função objetivo;
- **Ganho** – Relação percentual entre o melhor valor da função objetivo na primeira geração (gerada aleatoriamente) e o melhor valor na última

geração. O ganho indica o quanto o método foi capaz de melhorar a população inicial;

- **Eficiência** – Relação entre o ganho e o número de avaliações.

8.4.3 – Resultados do teste com Semente Aleatória idêntica

Teste Unimodal

Valor Máximo da função: 2

Método	Valor Máximo	Geração	N. Aval
AG – Cruz. Um Ponto	1,073393	13	39
AG – Cruz. Uniforme	1,972162	34	109
AG – Codif. Real	1,073393	12	40
MGA	1,999808	82	533
EEVOL	1,504361	300	3000
PSO – Sem var. Inercia	1,998288	300	3000
PSO – Var. Lin. Inercia	2,000000	67	670
PSO – Var. Não Linear	1,999999	102	1020
PSO – Atr. Soc. Centroide	1,999993	151	1510
PSO – Atr.Soc. Cent. Massa	1,999999	155	1550

Schaffer f6

Valor Máximo: 0,997544

Método	Valor Máximo	Geração	N. Aval
AG – Cruz. Um Ponto	0,599581	24	77
AG – Cruz. Uniforme	0,891073	24	75
AG – Codif. Real	0,896919	26	91
MGA	0,776393	50	303
AEVOL	0,577407	300	3000
PSO – Sem var. Inércia	0,968636	300	3000
PSO – Var. Lin. Inércia	0,997544	128	825
PSO – Var. Não Linear	0,997544	153	903
PSO – Atr. Soc. Centroide	0,997544	166	1437
PSO – Atr. Soc. Cent.Massa	0,997544	208	1613

Rosenbrock

Valor Máximo: infinito

Método	Valor Máximo	Geração	N. Aval
AG – Cruz. Um Ponto	0,000566	42	113
AG – Cruz. Uniforme	0,001047	21	145
AG – Codif. Real	0,001888	16	84
MGA	0,077233	116	926
AEVOL	0,000575	300	3000
PSO – Sem var. Inercia	0,480801	300	3000
PSO – Var. Lin. Inercia	0,151133	66	660
PSO – Var. Não Linear	9,213572	113	1038
PSO – Atr. Soc. Centroide	5,324865	125	1078
PSO – Atr. Soc. Cent.Massa	15,968178	128	1147

8.4.4 – Resultados do teste com várias realizações

Teste Unimodal

Valor Máximo: 2

Método	Valor Máximo	Geração	N. Aval
AG – Cruz. Um Ponto	1,56340392	19	62
AG – Cruz. Uniforme	1,60204724	20	69
AG – Codif. Real	1,82614695	22	91
MGA	1,99951852	–	529
AEVOL	1,64238097	293	2930
PSO – Sem var. Inercia	1,99997932	283	2834
PSO – Var. Lin. Inercia	1,99999308	43	432
PSO – Var. Não Linear	1,99990664	50	499
PSO – Atr. Soc. Centroide	1,99989563	62	621
PSO – Atr. Soc. Cent.Massa	1,99991470	64	642

Obs: não foi computada a média do número de gerações total para o Micro Algoritmo Genético

Schaffer f6

Valor Máximo: 0,997544

Método	Valor Máximo	Geração	N. Aval
AG – Cruz. Um Ponto	0,68224	21	63
AG – Cruz. Uniforme	0,70650	21	69
AG – Codif. Real	0,79687	26	95
MGA	0,90014	–	349
AEVOL	0,67010	294	2942
PSO – Sem var. Inércia	0,99753	300	2930
PSO – Var. Lin. Inércia	0,99658	123	737
PSO – Var. Não Linear	0,99678	171	1214
PSO – Atr. Soc. Centroide	0,99185	206	1628
PSO – Atr. Soc. Cent.Massa	0,99566	198	1607

Obs: não foi computada a média do número de gerações total para o Micro Algoritmo Genético

Rosenbrock

Valor Máximo: infinito

Método	Valor Máximo	Geração	N. Aval
AG – Cruz. Um Ponto	0,00000431	20	76
AG – Cruz. Uniforme	0,00000552	22	114
AG – Codif. Real	0,00003473	26	168
MGA	0,00168788	–	1019
AEVOL	0,00000429	300	3000
PSO – Sem var. Inércia	0,36643609	300	3000
PSO – Var. Lin. Inércia	0,02329714	78	765
PSO – Var. Não Linear	0,15030140	112	1078
PSO – Atr. Soc. Centróide	0,86301769	124	1172
PSO – Atr. Soc. Cent.Massa	0,85681069	123	1165

Obs: não foi computada a média do número de gerações total para o Micro Algoritmo Genético

8.4.5 – Análise de Resultados e Seleção de Métodos

Pela análise dos resultados apresentados na seção precedente podemos notar que a Otimização por Exame de Partículas foi a que teve melhor resultado, em relação ao valor máximo obtido, em todos os testes. Quanto ao número de avaliações, o PSO não ficou muito distante do Micro Algoritmo Genético na análise dos resultados da função de Rosenbrock, que é a que mais se aproxima, em termos de complexidade, dos problemas a serem tratados na tese.

Sendo assim, foram escolhidos os métodos Micro Algoritmo Genético e Otimização por Enxame de Partículas para serem avaliados quanto a aplicabilidade ao projeto de ancoragem.

8.4.6 – Ajuste da Inércia do PSO

Durante os testes, verificou-se que o ajuste dos parâmetros de controle da variação não linear do coeficiente de inércia é um fator crítico para a performance do PSO.

Aproveitou-se a oportunidade para analisar, através de um estudo de sensibilidade, a influência dos elementos de controle n e K , para um dado problema.

A equação (56), que define a variação não linear do coeficiente de inércia, W , foi modificada para a forma:

$$W_i = K - \frac{(i - 1)^n}{N^n} \quad (70)$$

Utilizando esta equação, a inércia W terá o valor K no início do processo de otimização, e $K-1$, ao fim do processo.

Com o objetivo de quantificar a relação entre a busca global, alto valor de W , e a busca local, baixo valor de W , através da utilização dos parâmetros n e k foram feitas diversas simulações mantendo-se o valor de N constante (300).

Como resultado da análise obteve-se o gráfico apresentado na figura 33, onde está relacionada a curva de equilíbrio entre busca global e local.

Ou seja, para um dado valor de K , a escolha de um valor de n acima da curva irá fazer com que o processo tenha um tendência maior para busca global, utilizando mais iterações para explorar o espaço de busca. Um valor de n abaixo da curva priorizará a busca local, podendo levar a uma convergência precoce.

A escolha do valor de K influenciará o comportamento da inércia ao final do processo. Como o valor da inércia varia de K até $K-1$, um valor de $K=1$ fará com que a inércia seja zerada na última iteração. Valores maiores de K fazem com que o termo inercial permaneça com uma alta influência ao final do processo.

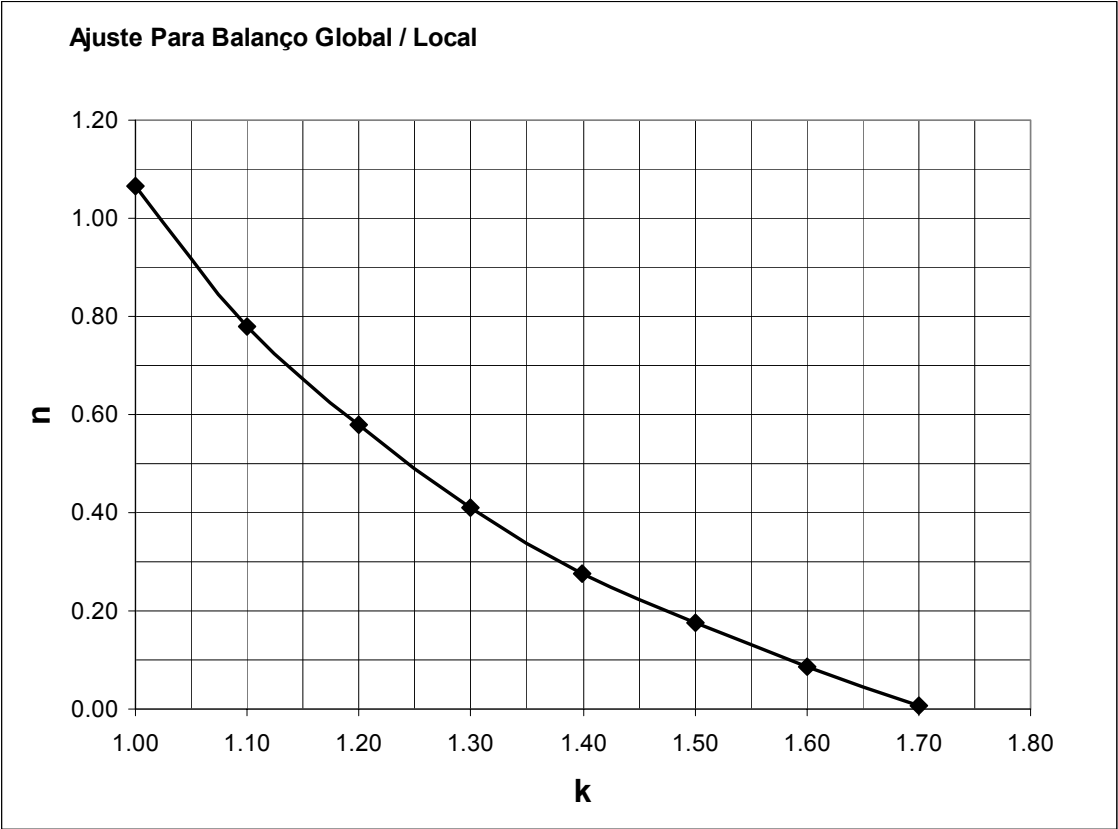


figura 33 – Curva de Balanço de busca Local e Global.

A utilização da curva 33 serve somente como indicação de tendência, pois o processo de Otimização por Enxame de Partículas é um processo aleatório.

Capítulo 9: Síntese e Otimização de Sistemas de Ancoragem

9.1 – Modelo Acoplado Ancoragem-Riser (SITUA/PROSIM)

Neste trabalho, foi utilizado o programa SITUA/PROSIM para a criação e análise dos modelos acoplados de ancoragem, “risers” e casco.

Este programa é composto de vários módulos que permitem ao usuário criar modelos de sistemas offshore, e executar análises dinâmicas ou estáticas, utilizando a formulação apresentada no capítulo 3.

Dentre os vários módulos do programa, apresentaremos a seguir os mais importantes para a montagem e análise do modelo de ancoragem, são eles:

- Dados Ambientais
- Modelagem da Unidade Flutuante
- Modelagem das Linhas
- Diagrama de Offset

9.1.1 - Dados ambientais

Podem ser modelados: a correnteza, o estado de mar, com ondas uni ou bi direcionais, o vento e o fundo.

A correnteza é modelada como um perfil de velocidade em função da profundidade, podendo variar de direção e intensidade.

A onda pode ser modelada como onda regular, informando-se a amplitude, o período e a direção, para cada componente de onda. Pode-se ainda modelar um mar

irregular, com a utilização dos espectros de Jonswap ou Pierson Moskowitz. O mar irregular pode ser definido como uni ou bidirecional, bastando definir um conjunto de dados para as duas direções de propagação da onda.

O vento pode ser definido com velocidade constante ou variável de acordo com o espectro API.

Os dados de correnteza, onda e vento podem ser importados da ET-3000.00-1000-941-PPC-001 [PETROBRAS, 1999], que contém os dados meteo - oceanográficos da bacia de Campos.

9.1.2 - Plataforma

A modelagem do casco da plataforma é feita através da definição de quatro conjuntos de dados:

- **Geometria** – descreve a forma do casco;
- **Dados de Massa** - deslocamento, raio de giração, centro de gravidade e demais dados relativos a massa da embarcação;
- **Coeficientes** - a representação do comportamento hidrodinâmico pode ser feito através de coeficientes gerados por outros programas, como o WAMIT [LEE, 1998]. Os coeficientes de forma, para cálculo das forças de vento e correnteza, também podem ser definidos;
- **Posição** - Dados relativos a posição da embarcação no sistema global.

O casco da embarcação pode ser modelado de diversas formas, dependendo do tipo de análise que se pretenda realizar:

- **Conjunto de cilindros (reticulado)**- a forma reticulada de definição do casco é feita através da descrição de cada elemento do casco como um cilindro. É a forma ideal para modelar plataformas semi-submersíveis;
- **Navio** - A embarcação é descrita através do conjunto de coeficientes hidrodinâmicos que descrevem o comportamento da embarcação no mar;

- **Movimento Prescrito** - Forma especial de definição da embarcação onde não há cálculo do movimento da mesma, mas o movimento é prescrito “à priori”, através de “RAOS” ou séries temporais, e aplicado às linhas.

Neste trabalho foi utilizada a modelagem de casco por cilindros.

9.1.3 - Linhas

Utiliza-se o modelo de elementos finitos para a descrição das linhas, sendo elas “riser” ou ancoragem. O SITUA oferece diversas facilidades para a criação do modelo da linha, como: definição da gradação da malha, definição das condições de contorno, especificação das condições de extremidade (fixa, conectada à plataforma, ancorada, etc.), criação de apêndices como molas, tensionadores ou bóias e diversas outras funções para definição da linha. Foge do escopo do trabalho descrever todas as informações disponíveis para as linhas. Serão apresentadas apenas as principais:

- **Composição** - A composição da linha é dada pelo material que compõe cada segmento : aço (“riser” rígido), “riser” flexível, cabo de aço, poliéster, etc., e pelos comprimentos de cada trecho;
- **Geometria** - A forma da catenária é dada pelas condições definidas para a geração da mesma: projeção horizontal, tração total no topo, força horizontal ou ângulo de topo;
- **Orientação Espacial** - Ângulo que a linha faz com a direção Norte;
- **Malha de Elementos**- Especificação da gradação da malha de elementos finitos para segmento que compõe a linha;
- **Condições de Contorno** - As condições de contorno da linha podem ser definidas nó a nó para casos especiais. Nos casos mais gerais, o próprio sistema aplica as condições padrão, de acordo com o tipo de conexão definida nos extremos da linha: conectado à plataforma, ancorado, fixo no espaço ou livre. Além disso podem ser definidas molas lineares ou não lineares;

- **Tipo de Elemento Finito** - Treliça ou Pórtico;
- **Saída de Resultados:** Pode-se definir de forma independente quais quantidades serão impressas e para quais nós e elementos. (velocidades, ângulos, posição, forças, etc.)

A figura 34 apresenta um exemplo da tela de definição de linha do SITUA.

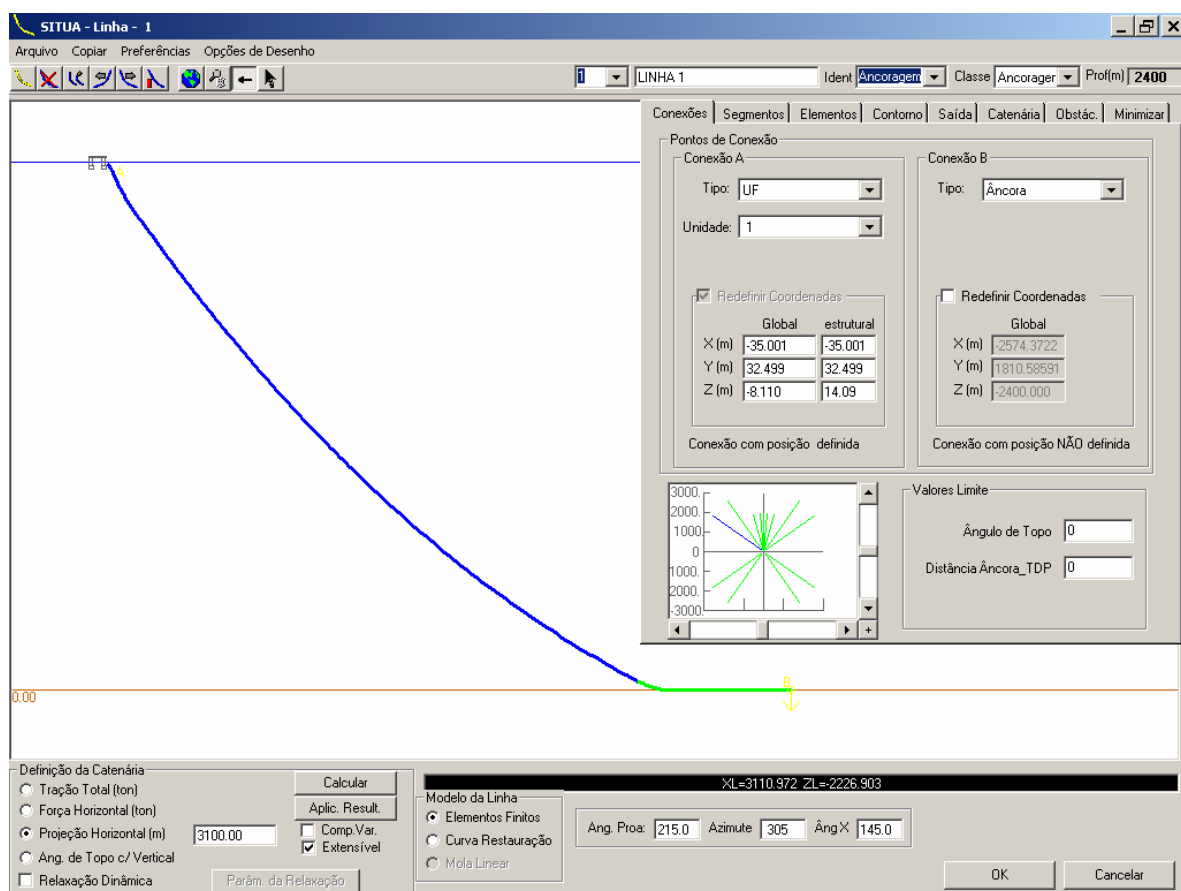


Figura 34 – Exemplo de tela de definição de linha.

9.1.4 - Diagrama de Offset

Com o modelo do sistema pronto, pode-se fazer uma verificação do passeio da embarcação, analisando-se a posição de equilíbrio que a embarcação assumirá quando submetida a diversos carregamentos.

Esta verificação é feita considerando-se todas as 8 (oito) possíveis ocorrências de correnteza em uma dada região e para um determinado período de recorrência. Por exemplo, para a “Deep North Region” e para um período de recorrência de 100 anos, os perfis das direções Norte, Nordeste, Este, Sudeste, Sul, Sudoeste, Oeste e Noroeste são utilizados para gerar as oito análises, nas respectivas direções.

Para cada direção é efetuada uma análise estática acoplada, utilizando o módulo de Análise Estática do PROSIM com todas as linhas de ancoragens e “risers” modelados por elementos finitos.

O módulo do SITUA denominado Análise de Offset gerencia todos os dados ambientais, carregando-os automaticamente do banco de dados, e, a um simples clicar de um botão, dispara as oito análises, chamando o programa PROSIM em forma de biblioteca (DLL), para cada uma das análises.

O resultado das análises é plotado em forma de gráfico, o “Diagrama de Offset”, conforme mostrado na figura 35.

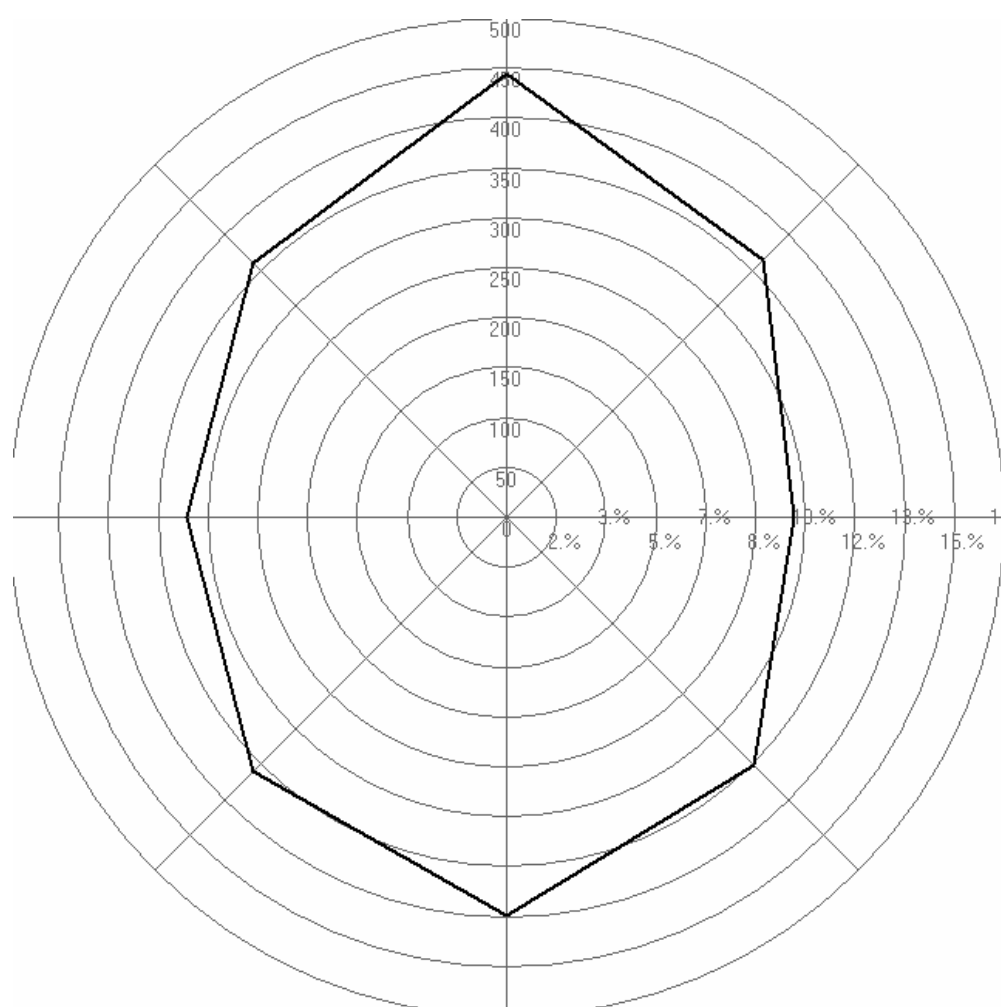


Figura 35 – Diagrama de offset

9.2 - Exemplos propostos

Com os dois métodos de otimização selecionados, foram criados dois modelos para representar o sistema de ancoragem de duas plataformas hipotéticas. Um com poucas linhas (13) e outro com um número maior de linhas (50). O primeiro modelo será chamado de P1 e o segundo de P2. Utilizou-se o programa SITUA/PROSIM para a geração dos modelos e análise dos offsets.

Para cada um destes modelos foram aplicados os dois métodos de otimização selecionados: PSO e MGA.

Como se trata de analisar a viabilidade da aplicação dos métodos evolutivos selecionados a uma etapa inicial do projeto de ancoragem, foi utilizada somente a análise estática para a descrição do movimento da embarcação. Com o uso da análise estática as avaliações são mais rápidas, e um maior número de testes pode ser feito. Mas, o sistema pode ser facilmente adaptado para utilizar análise dinâmica na avaliação da ancoragem.

A seguir são apresentados os modelos utilizados.

9.2.1 – Modelo 1 – P1

Este modelo, denominado P1, é composto por 8 linhas de ancoragem, com arranjo inicial simétrico e 5 “risers” com arranjo assimétrico, todos voltados para Norte.

O modelo P1 foi criado com o intuito de verificar a aplicação dos métodos em um modelo simples porém assimétrico.

A profundidade da locação foi arbitrada em 2400 m e a composição das linhas é dada na tabela 4:

Tabela 4 – Composição das linhas do exemplo P1

Segmento	Comprimento(m)	Material	Diam (m)	MBL (ton)
Topo	250	Amarra	0.076	612
Intermediário	2400	Cabo de aço	0.087	528
Fundo	700	Amarra	0.076	612

Para os “risers”, foi escolhido um material de “riser” flexível, com 0.277 m de diâmetro do banco de dados

O arranjo das linhas é mostrado na figura 36.

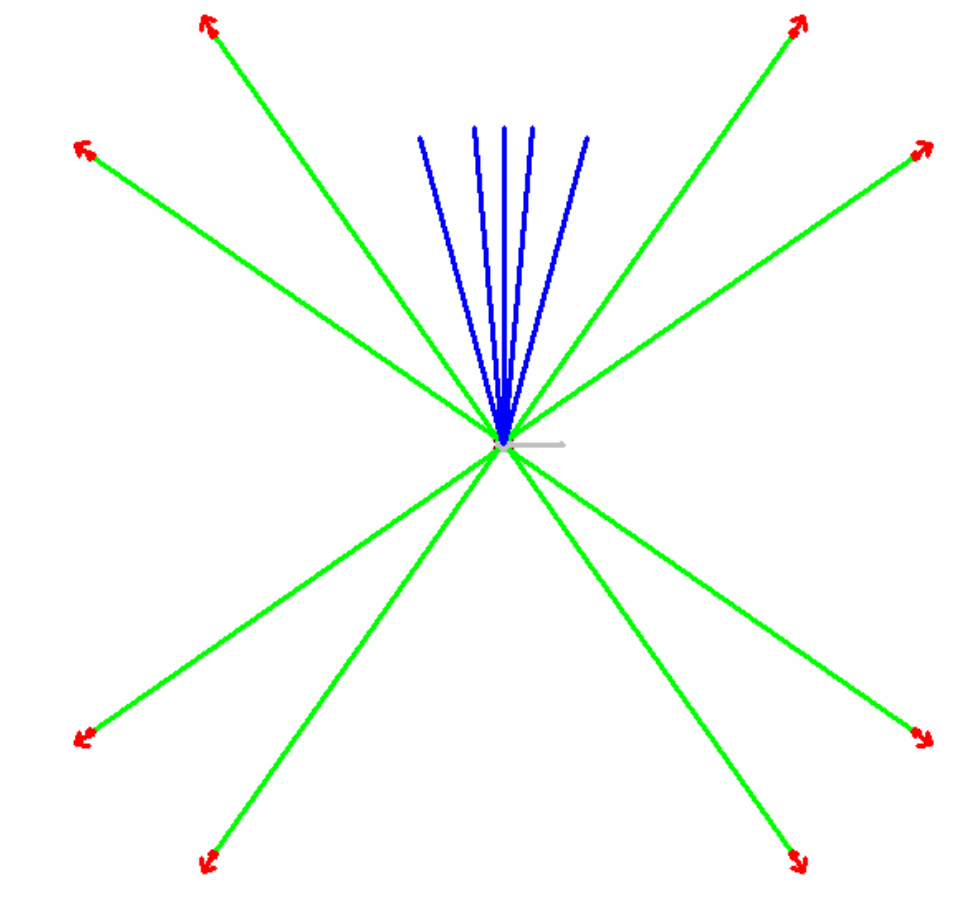


Figura 36 – Disposição das linhas do modelo P1

Os dados do casco utilizado neste modelo (figura 37) são:

Deslocamento: 23800 toneladas
Calado de projeto: 22,2 m
Comprimento: 106 m
Boca: 65 m
Número de cilindros: 36

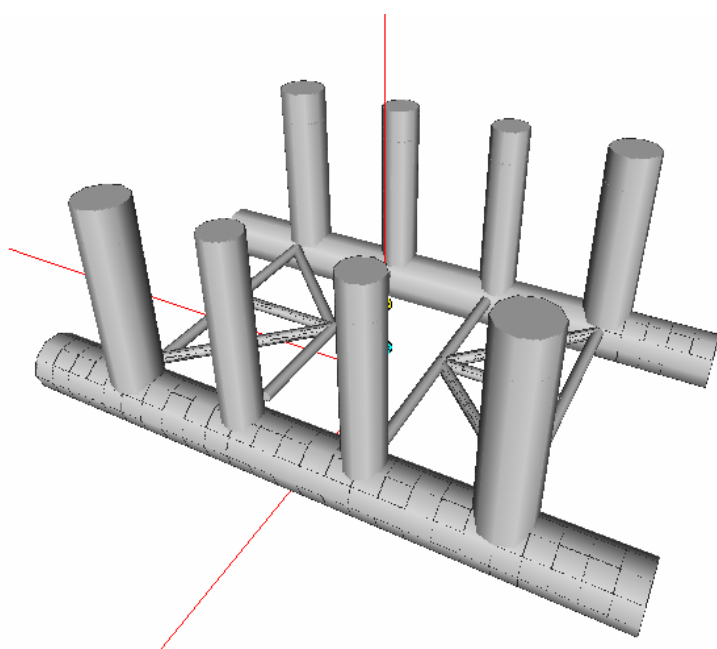


Figura 37 – Modelo de casco da plataforma P1.

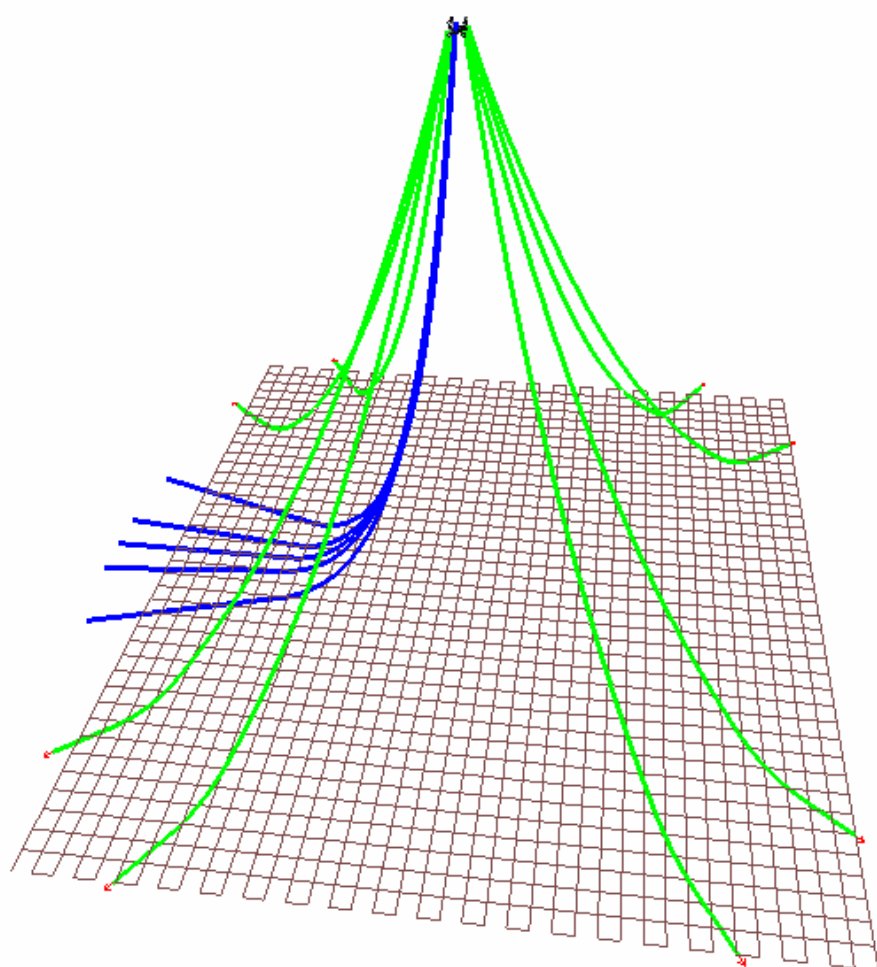


Figura 38 – Vista tridimensional do modelo P1

Percebe-se claramente, na figura 38, a assimetria do sistema.

9.2.2 – Modelo 2 – P2

Este modelo é composto por 16 linhas de ancoragem, com arranjo inicial simétrico e 34 “risers”, e foi criado para verificar a aplicação dos métodos em um modelo mais complexo, mais realístico.

Foi arbitrada um profundidade de 1800 m.

A composição das linhas é dada na tabela a seguir.

Tabela 5 – Composição das linhas do exemplo 2

Segmento	Comprimento(m)	Material	Diam (m)	MBL (ton)
Topo	150	Amarra	0.21	1126
Intermediário	2530	Poliéster	0.222	1400
Fundo	1000	Amarra	0.21	1126

Os “risers” possuem configuração variada, tentando simular um caso real, com alguns “risers” de 8”, e outros de 7”. Todos com dados de materiais de “risers” flexíveis.

As figuras 39, 40 e 41 apresentam, respectivamente, o arranjo inicial de linhas, a plataforma utilizada e uma vista tridimensional do modelo.

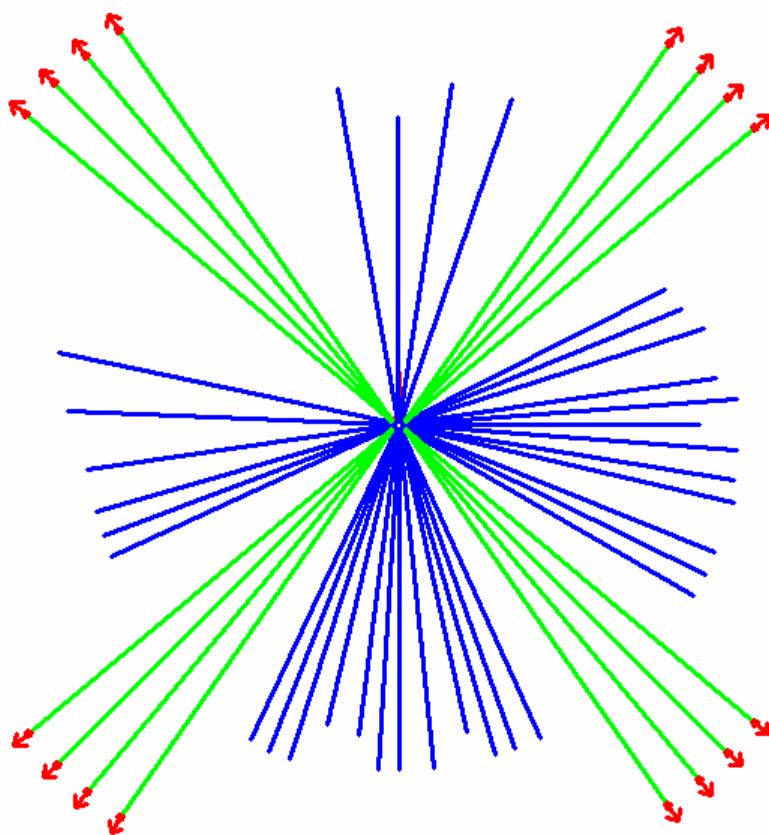


Figura 39 – Disposição das linhas no modelo P2

Os dados do casco utilizado neste modelo (figura 40) são:

Deslocamento: 67900 toneladas
Calado de projeto: 27,5 m
Comprimento: 88 m
Boca: 88 m
Número de cilindros: 80

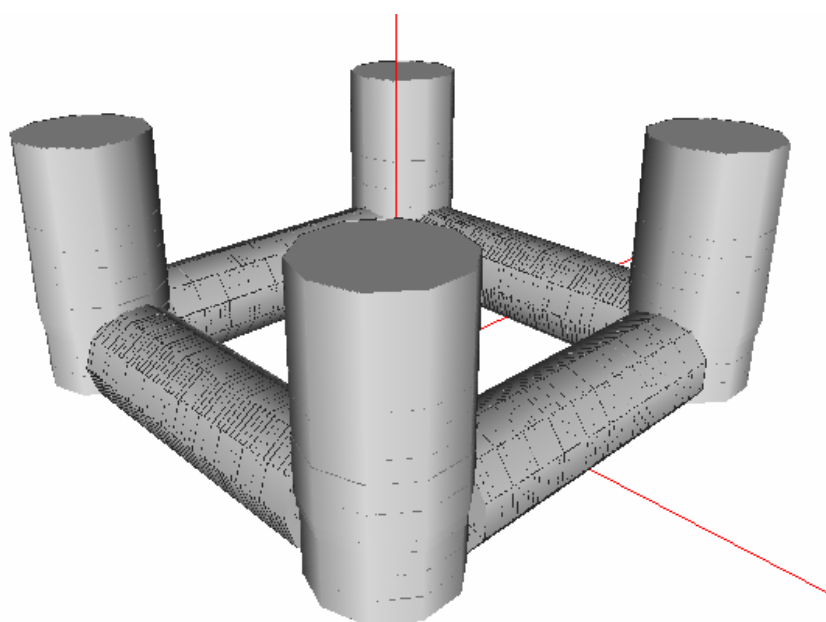


Figura 40 – Modelo de casco da plataforma P2.

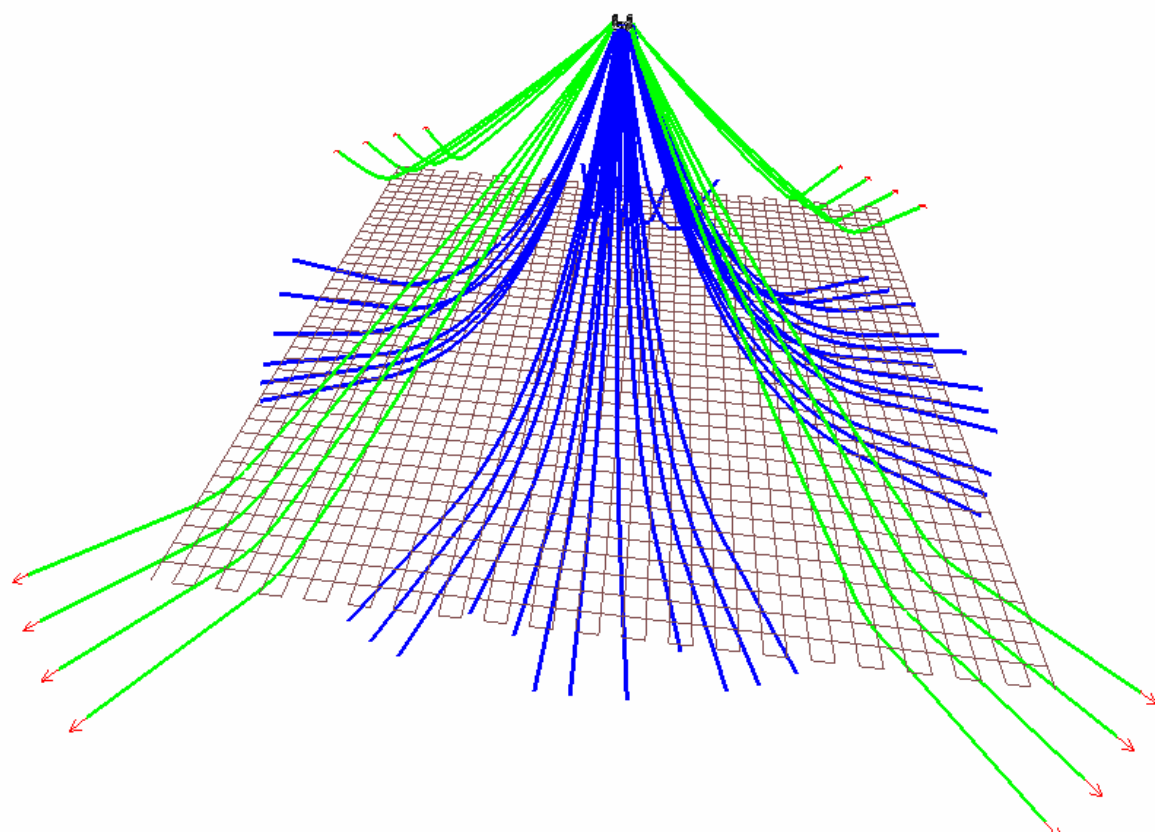


Figura 41 – Vista tridimensional do modelo P2.

9.2.3 - Dados ambientais comuns aos dois modelos

Como será efetuada somente análise estática, serão considerados apenas os carregamentos de correnteza e parcela estática do vento.

Foram utilizados os 8 (oito) perfis de correnteza correspondentes às direções Norte, Nordeste, Este, Sudeste, Sul, Sudoeste, Oeste e Noroeste, com período de recorrência de 100 anos.

Para a montagem destes perfis foi utilizada a facilidade do SITUA de importar os dados Meteo-Oceanográficos da ET-3000.00-1000-941-PPC-001 [PETROBRAS,1999].

Da mesma forma, foi utilizada a mesma fonte para o carregamento de vento, sendo 10 anos o período de recorrência utilizado.

A tabela 6 apresenta os períodos de recorrência dos carregamentos ambientais utilizados nos dois modelos.

Tabela 6 – Período de recorrência dos carregamentos ambientais

Carregamento	Período de Recorrência
Correnteza	100 anos
Vento	10 anos

O fundo será considerado plano nos dois modelos, com as características apresentadas na tabela 7.

Tabela 7 – Características do fundo

Modelo	Tipo	Profundidade	Inclinação Do fundo
P1	Plano	2400 m	0°
P2	Plano	1800 m	2° - Norte

9.3 - Modelo de otimização

Nos dois modelos apresentados anteriormente foram utilizados os métodos de otimização Micro Algoritmo Genético (MGA) e Enxame de Partículas (PSO). A seguir será apresentada a metodologia utilizada para a otimização dos sistemas de ancoragem.

9.3.1 - Variáveis livres

Um modelo de ancoragem possui diversas variáveis que podem funcionar como variáveis livres num problema de otimização. Para simplificar o problema foram escolhidas algumas delas:

- Raio de ancoragem
- Tração média
- Azimute das linhas

Neste trabalho, a composição da linha, em termos de tipo de material utilizado e número de segmentos, foi mantida invariável.

Com esta seleção de variáveis livres, o modelo P1 ficou com 10 dimensões: o azimute das 8 linhas de ancoragem, o raio de ancoragem para todas as linhas e a tração de trabalho média. E, o modelo P2, com 19 dimensões: o azimute das 16 linhas de ancoragem, o raio de ancoragem para todas as linhas e a tração de trabalho média.

9.3.2 - Função Objetivo e Restrição

A principal finalidade do sistema de ancoragem é manter a posição da plataforma. Assim, a função objetivo mais natural a ser utilizada é o próprio passeio da embarcação.

O aumento da tração de trabalho ou a diminuição do raio de ancoragem levará a uma diminuição do passeio, no entanto existem limites para a tração em cada linha. A [API, 2001] recomenda que a tração a que a linha está submetida não deve ultrapassar a 50 % da tração de ruptura da linha (MBL) para análises estáticas. Além disso, a tração da linha não deve ser inferior 30% da tração de ruptura da linha (MBL).

Assim a função objetivo penalizada deve levar em consideração o passeio e a relação entre a tração atuante na linha e a tração máxima admitida.

Utilizou-se a seguinte expressão para a função objetivo:

$$f = e^{\frac{offset}{profund} - 0.1} \tag{71}$$

Onde :

Offset – Maior offset, em metros, da embarcação dentre as oito direções analisadas.

Profund – profundidade, em metros, da locação analisada.

O valor 0,1 é utilizado para fins de normalização.

Como funções de penalidade foram utilizadas as expressões:

$$Pen03 = \begin{cases} e^{0.3 - \frac{TracMax}{MBL}}, & se \frac{TracMax}{MBL} \leq 0.3 \\ 0, & se \frac{TracMax}{MBL} > 0.3 \end{cases} \tag{72}$$

E

$$Pen06 = \begin{cases} e^{\frac{TracMax}{MBL} - 0.5}, & se \frac{TracMax}{MBL} \geq 0.5 \\ 0, & se \frac{TracMax}{MBL} < 0.5 \end{cases} \tag{73}$$

Onde

Tracmax – Tração da linha mais solicitada dentre todas as linhas e todas as direções analisadas.

MBL – Tração máxima de ruptura da linha (“Maximum Breaking Load”)

A função objetivo penalizada foi utilizada como sendo o inverso da soma destas três parcelas:

$$f_{obj} = \frac{1}{f + pen03 + pen06} \tag{74}$$

Assim quanto menor for o passeio (“offset”) da embarcação maior será o valor da função objetivo, e como não é possível obter-se offset zero sem que uma das penalizações seja ativada, não haverá singularidade na função.

Caso a tração da linha mais solicitada fique entre 30% e 50% da MBL os termos de penalização PEN03 e PEN06 serão zerados.

A figura 42 apresenta a função penalizada na faixa de tração de 0.0 a 0.9*MBL e de offset de 0.0 a 1.0*Profundidade. Pode-se ver claramente na figura que a penalização altera a função objetivo nas faixas de tração acima de 0.6 e abaixo de 0.3. Na faixa de tração entre estes valores a função é regida pelo termo do offset

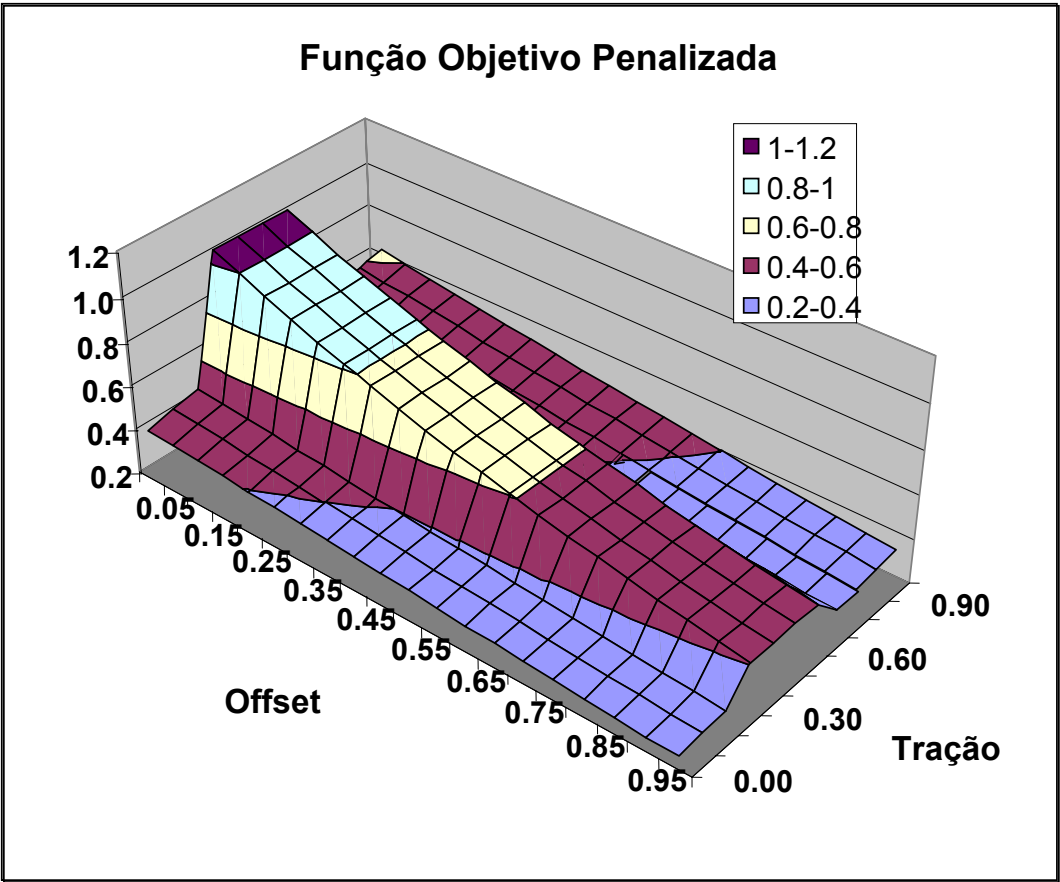


Figura 42– Função objetivo penalizada

Apesar da função objetivo parecer uma função suave e “bem comportada”, deve-se lembrar que a superfície apresentada na figura 42, é função das variáveis dependentes: tração da linha mais solicitada e “Offset” do sistema. Estas variáveis dependem dos valores das variáveis livres, que são 10 no exemplo P1 e 19 no exemplo P2. Com isso, o problema P1 possui um espaço solução de 10 dimensões e o P2 de 19 dimensões.

9.3.3 - Algoritmo de Otimização

A estratégia utilizada na aplicação dos métodos de otimização selecionados, aos modelos de ancoragem gerados no SITUA, foi utilizar um modelo base do qual serão aproveitados os materiais utilizados nas linhas e os dados da plataforma.

A partir deste modelo básico serão gerados os indivíduos, sendo utilizados como variáveis livres: a variação do azimuth de cada linha, em relação ao modelo básico, o raio de ancoragem e a tração de trabalho.

Os limites superior e inferior de cada variável livre é fornecida pelo usuário conforme visto na figura 43.

	Min	Máx	Precisão
Alfa:	-10	10	0.1
Raio:	1500	3000	20
Tração(t):	80	300	5

Figura 43 – Variáveis livres

Alguns parâmetros foram mantidos constantes para os dois métodos e para os dois exemplos:

- **Tamanho da população:** 10 indivíduos
- **Número Máximo de Gerações:** 30
- **Critério de parada:** 3 gerações consecutivas com o valor da média maior ou igual a 95% do valor do melhor indivíduo.

Estes parâmetros foram escolhidos depois de alguns testes e avaliações.

No Micro Algoritmo Genético, foi mantido o número de 20 gerações da fase 2.

Foram utilizados no método do Enxame de Partículas:

- **variação não linear da inércia** com os coeficiente $K = 1,1$ e $n = 0,8$, retirados da figura 33.
- **Limitador de velocidade máxima**, para cada dimensão:

$$V_{\max} = 10 * \textit{precisao} \quad (75)$$

A precisão é definida pelo usuário conforme mostrado na figura 43.

- **Atração Social** ao “centro de massa”

Azimuth

O ângulo alfa relaciona-se com o azimuth da linha, este ângulo é o limite de variação permitido para o azimuth. Assim, o azimuth de cada linha poderá variar, de acordo com o método de otimização, entre:

$$\textit{Azim} + \textit{alfa} \quad \text{e} \quad \textit{Azim} - \textit{Alfa}$$

Onde **Azim** é o azimuth da linha no modelo base.

Devido ao caráter aleatório da geração, pode ocorrer o cruzamento de linhas de ancoragem, ou de linhas de ancoragem com “risers” na geração de um indivíduo. Este indivíduo não poderá ser analisado e deve ser descartado antes da análise.

O sistema analisa cada indivíduo gerado, quanto ao cruzamento de linhas, e o substitui na população inicial, ou atribui a ele uma “fitness” extremamente baixa, caso seja gerado durante o processo de otimização.

No modelo P1 alfa variou de -10° a 10° para todas as linhas, e no exemplo P2 os valores foram de -5° e 5° .

Raio de ancoragem

Como simplificação, o raio de ancoragem utilizado nos modelos foi mantido igual para todas as linhas.

Nos dois exemplos utilizou-se os limites de 1500 m e 3000 m para a variação do raio de ancoragem.

Tração Média de Trabalho

A variável livre Tração Média é, na realidade, uma tração que é utilizada como base para o equilíbrio do sistema.

Esta tração é aplicada a todas as linhas de ancoragem. Devido a assimetria do conjunto de “risers”, o sistema estará desequilibrado. Para obter uma distribuição de trações de topo que equilibre o sistema na posição de projeto, é utilizado o método ALFA desenvolvido pelo engenheiro Abraham Moche Kaizer [KAIZER, 2003], da Petrobras, para o equilíbrio das forças de topo das linhas de ancoragem.

Após a aplicação da força base a todas as linhas, a força resultante de desequilíbrio é calculada.

A força horizontal de cada linha de ancoragem é projetada na direção da força resultante. As forças cuja projeção possui o mesmo sentido da resultante são chamadas de positivas e somadas numa componente **Fpos**. As forças cuja projeção possui o sentido contrário da resultante são chamadas de negativas e somadas numa componente **Fneg**.

Desta forma, um fator de correção é definido como:

$$fator = \frac{\text{Resultante}}{|F_{pos}| + |F_{neg}|} \quad (76)$$

Onde, **Resultante** é o valor da resultante de desequilíbrio do sistema, **F_{pos}** e **F_{neg}** são respectivamente, a soma das componentes projetadas das forças horizontais de cada linha, conforme definido acima.

As forças horizontais positivas são, então, corrigidas pela seguinte expressão:

$$F_H = (1 - \text{fator}) * F_H \quad (77)$$

E as negativas:

$$F_H = (1 + \text{fator}) * F_H \quad (78)$$

Com as novas forças horizontais definidas, o SITUA ajusta o comprimento do segmento central de cada linha a fim de obter uma catenária que atenda aos critérios estabelecidos de projeção (raio de ancoragem) e força horizontal.

Novas malhas são geradas para as linhas definidas, a força resultante do sistema é novamente calculada e o processo todo é repetido até que a resultante seja menor do que uma tolerância pré-estabelecida.

Utilizando este método, consegue-se obter uma configuração sempre em equilíbrio na posição de projeto, sem carregamentos ambientais, independente do arranjo de linhas utilizado.

Nos exemplos de ancoragem foram utilizados os limites de 80 t e 300 t para a variação da tração base.

Análise

Tanto para o Algoritmo Micro Genético quanto para o Enxame de Partículas, um conjunto de variáveis livres define um indivíduo.

Com o indivíduo definido, ou seja com as variáveis livres definidas, são executadas as oito análises acopladas, e, a maior tração e o maior passeio obtidos dentre todas as análises são utilizados para calcular a “fitness”.

Este processo é repetido para cada indivíduo da população.

Capítulo 10: Resultados Obtidos

10.1 – Modelo P1

Conforme apresentado na figura 44, o modelo básico utilizado no exemplo P1, possui um passeio máximo de 210 m, que equivale a 8,75 % da profundidade, o que é bastante aceitável. No entanto, nesta situação a linha mais tracionada está com 60,4 % da MBL, ou seja, acima do limite de 50% ditado pela norma.

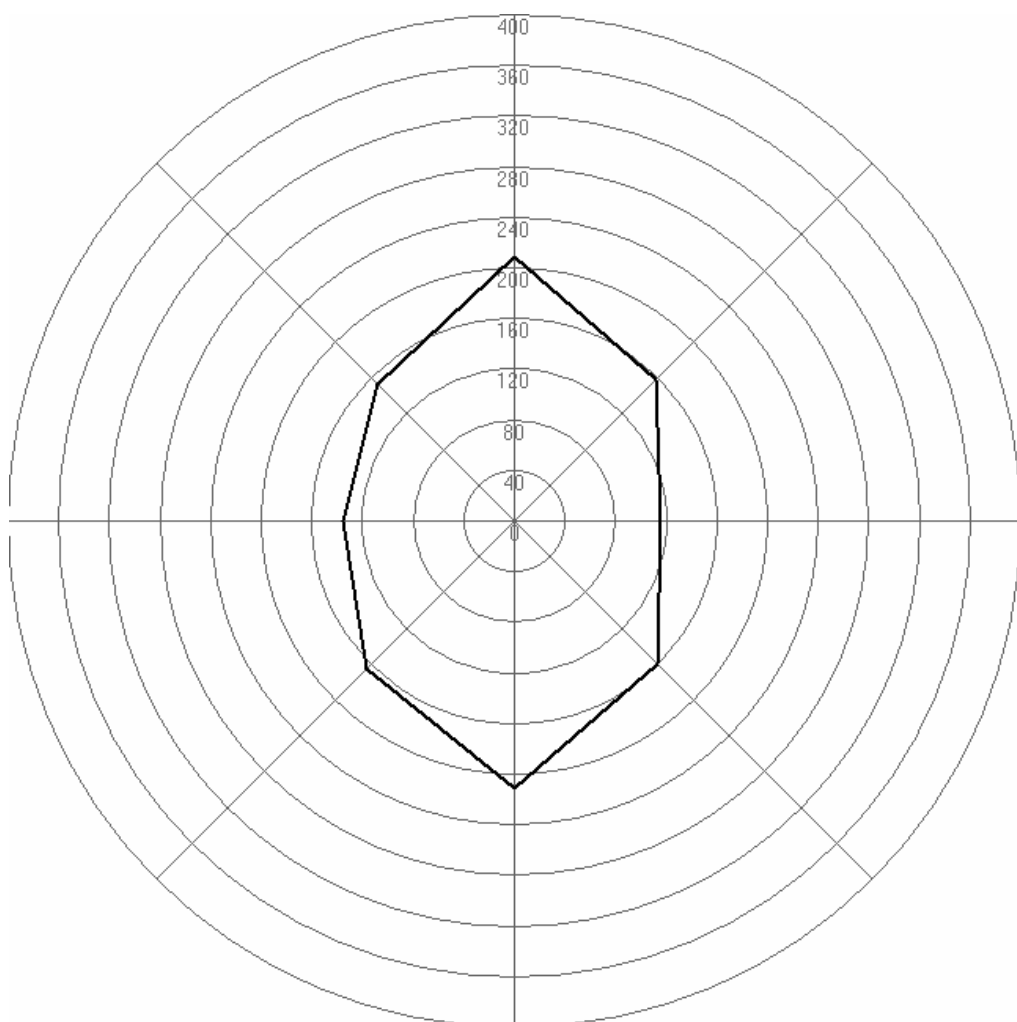


Figura 44 – Diagrama de Offset original do modelo 1

10.1.1 – Aplicação dos Métodos

Foram efetuadas 3 execuções do modelo com o método MGA e 5 execuções com o método PSO.

A tabela 8 apresenta um resumo dos resultados obtidos. Nesta tabela são apresentados, na primeira linha os dados para o modelo base, não otimizado. Os dados da tabela são:

- **Offset-** Maior passeio, em percentual da profundidade, do melhor indivíduo da população inicial e da população final;
- **Tração** – Maior tração, em percentual da MBL do melhor indivíduo da população inicial e da população final;
- **“Fitness”** – Valor da “fitness” do melhor indivíduo da população inicial e da população final;
- **Ganho** – Relação entre a “fitness” do melhor indivíduo da população inicial e a do melhor indivíduo da população final. Indica o quanto o método foi capaz de melhorar a população inicial.
- **Número de avaliações** – Quantas avaliações do Diagrama de Offset foram efetuadas.
-

Tabela 8 – Resultados para a plataforma P1

	População Inicial			População Final			
Método	Fitness	Off.(%)	Trac(%)	Fitness	Off.(%)	Trac(%)	N.Aval
MGA	0,477	8,8	60,2	1,047	5,3	48,7	628
MGA	0,939	16,3	47,6	1,019	8,2	49,9	747
MGA	0,486	10,4	55,2	0,980	11,9	49,9	1085
PSO	0,476	3,7	64,8	0,975	12,7	49,8	297
PSO	0,469	11,3	61,0	1,019	8,2	46,7	300
PSO	0,493	5,2	57,0	1,064	3,8	47,2	230
PSO	0,501	7,3	52,3	0,959	14,2	49,9	300
PSO	0,479	10,5	57,8	0,972	12,8	49,7	229

Observando a tabela 8, nota-se que os dois métodos de otimização obtiveram bons resultados, com ganho médio de 102 % e 103 % para o MGA e o PSO, respectivamente. No entanto, o MGA atingiu este ganho com um número de avaliações mais alto, 820 avaliações, em média, contra 270 avaliações, em média, para o PSO.

10.1.2 – Modelo P1 Otimizado

Dentre as diversas execuções dos métodos de otimização, foi selecionado um resultado do método PSO para ser usado como exemplo.

A figura 45 mostra o arranjo final do sistema otimizado. Comparando esta figura com a 36, pode-se notar pequenas modificações nos azimutes das linhas.

As tabelas 9 e 10 apresentam os valores modelo P1 original e o otimizado. A figura 46 mostra o diagrama de offset do sistema otimizado.

Neste exemplo

Tabela 9– Comparação Modelo P1: Original x Otimizado

	Original	Otimizado
Offset	8,75 % (210 m)	3,75% (90 m)
Trac. Max. (%)	60,4	47,2
Raio Anc. (m)	3000	3261

Tabela 10 – Comparação entre modelo P1 original e otimizado

	Original			Otimizado		
	Azim(º)	Comp(m)	Tração(ton)	Azim(º)	Comp(m)	Tração(ton)
Linha 1	305	3000	182,8	299	3328	63,3
Linha 2	325	3000	182,8	319	3328	63,3
Linha 3	35	3000	182,8	28	3312	65,5
Linha 4	55	3000	182,8	47	3312	65,5
Linha 5	125	3000	182,8	127	3166	127,9
Linha 6	145	3000	182,8	140	3166	127,9
Linha 7	215	3000	182,8	222	3177	120,5
Linha 8	235	3000	182,8	235	3177	120,5

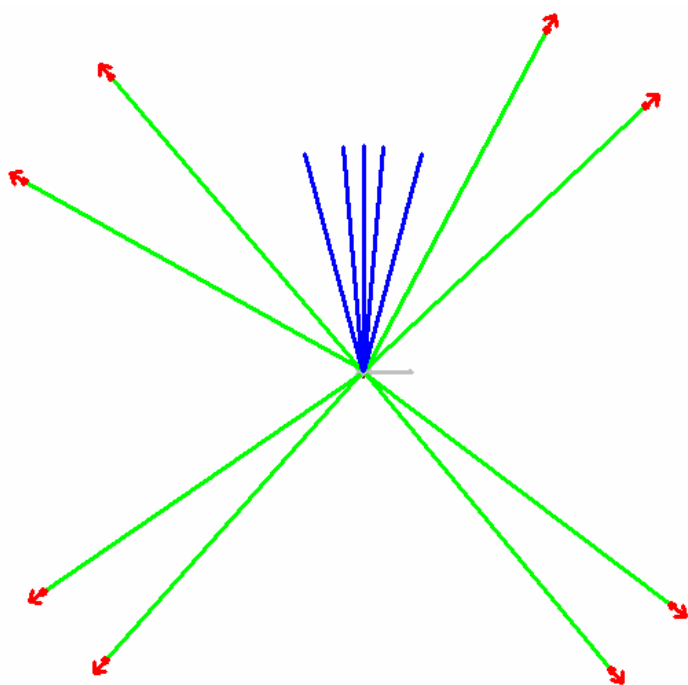


Figura 45 – Arranjo final do sistema P1 otimizado

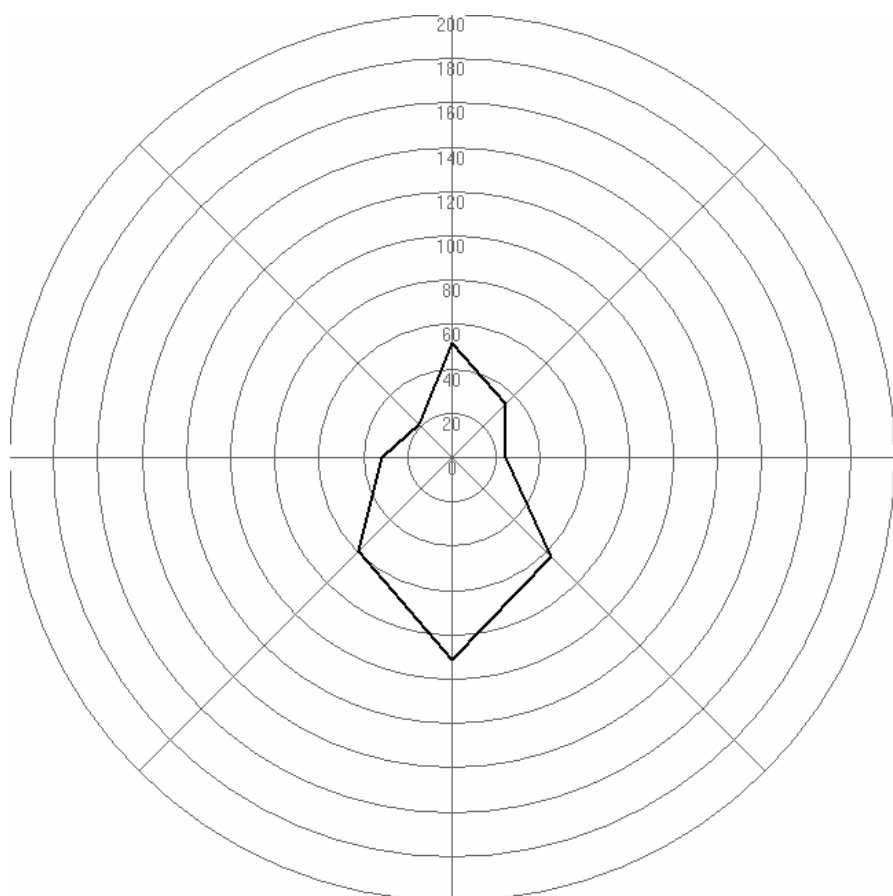


Figura 46 – Diagrama de Offset do sistema P1 otimizado

10.2 – Modelo P2

Conforme apresentado na figura 47, o modelo básico utilizado no exemplo P2, possui um passeio máximo de 110 m, o que equivale a 6.1 % da profundidade, o que é bastante aceitável. No entanto, nesta situação a linha mais tracionada está com 52.1 % da MBL, ou seja, acima do limite ditado pela norma.

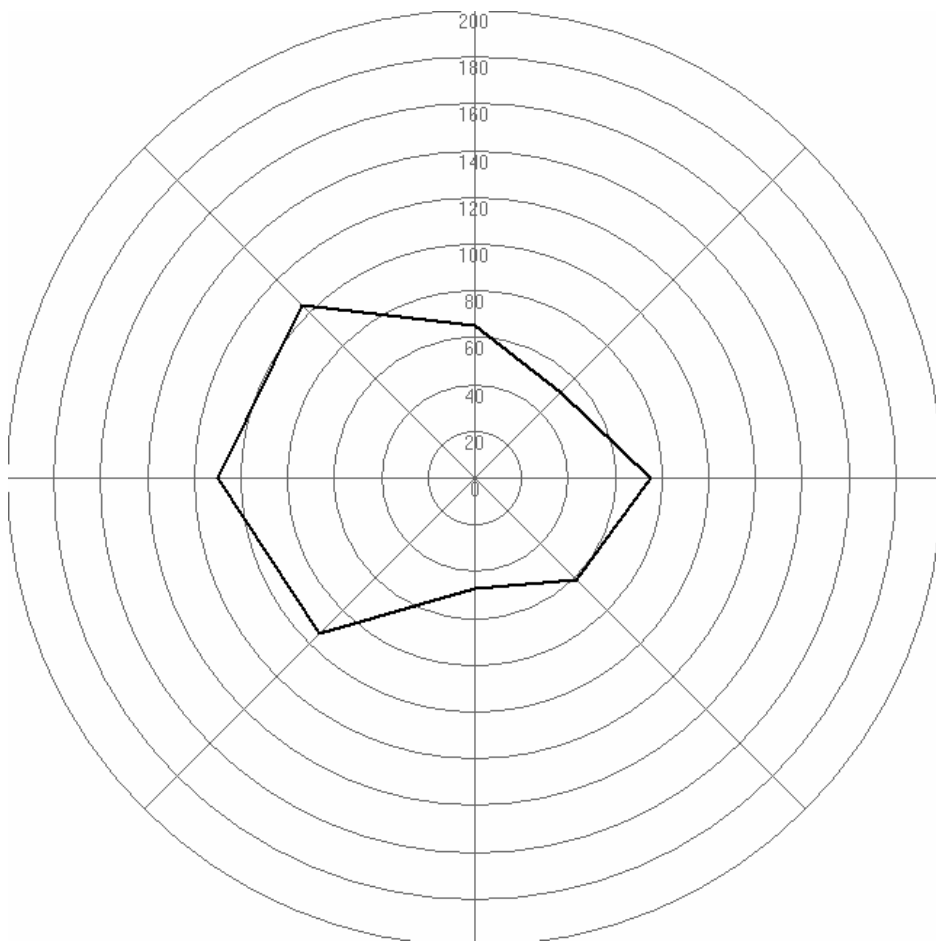


Figura 47 – Diagrama de Offset original do modelo 2

10.2.1 – Aplicação dos Métodos

Foram efetuadas 3 execuções do modelo com o método MGA e 4 execuções com o método PSO.

- A tabela 11 apresenta um resumo dos resultados obtidos com o modelo P2.

Tabela 11 – Resultados para a plataforma P2

	Inicial			Final			
Método	Fitness	Off.(%)	Trac(%)	Fitness	Off.(%)	Trac(%)	N.Aval
MGA	0,504	7,1	51,6	1,025	7,5	50,0	828
MGA	0,488	8,6	59,1	1,051	5,0	46,7	681
MGA	0,495	8,5	53,4	1,036	6,5	49,5	725
PSO	0,500	8,9	51,1	1,047	5,4	50,0	196
PSO	0,501	6,3	53,0	1,041	6,0	50,0	274
PSO	0,495	7,2	54,6	1,032	6,8	50,0	235
PSO	0,498	8,2	52,4	1,043	5,8	49,5	270

Pode-se verificar na tabela 11 que os dois métodos de otimização obtiveram bons resultados, com ganho médio de 109 % e 108 % para o MGA e o PSO, respectivamente. No entanto, o MGA atingiu este ganho com um número de avaliações mais alto, 744 avaliações em média contra 244 avaliações em média para o PSO.

10.2.2 – Modelo P2 Otimizado

As tabelas 12 e 13 apresentam os valores modelo P2 original e o otimizado. A figura 46 mostra o diagrama de offset do sistema otimizado.

Tabela 12– Comparação Modelo P2: Original x Otimizado

	Original	Otimizado
Offset	6,1% (110 m)	5,4 (97 m)
Trac. Max. (%)	52,1	50,0
Raio Anc. (m)	3070	3125

Tabela 13 – Comparação entre modelo P2 original e otimizado

	Original			Otimizado		
	Azim(°)	Comp(m)	Tração(ton)	Azim(°)	Comp(m)	Tração(ton)
Linha 1	35	3680	219	38,3	3775	173
Linha 2	50	3680	194	56,6	3780	173
Linha 3	215	3680	164	213,9	3704	164
Linha 4	230	3680	178	231,7	3698	164
Linha 5	40	3680	211	42,2	3776	173
Linha 6	45	3680	191	42,9	3777	173
Linha 7	130	3680	131	130,9	3795	97
Linha 8	135	3680	129	131,6	3794	97
Linha 9	140	3680	129	138,0	3789	97
Linha 10	145	3680	128	143,6	3784	97
Linha 11	220	3680	171	221,0	3701	134
Linha 12	225	3680	173	224,3	3700	134
Linha 13	310	3680	300	312,7	3670	264
Linha 14	315	3680	303	315,0	3672	264
Linha 15	320	3680	305	316,8	3674	264
Linha 16	325	3680	305	322,7	3679	264

O modelo P2 possui suas linhas de ancoragem distribuídas em grupos de 4 por “corner” da plataforma. O sistema de otimização não está preparado para tratar as linhas de ancoragem em grupos, por isso o resultado dos ângulos de azimute não condizem com a realidade de espaçamento mínimo entre as linhas de um mesmo grupo. No entanto, a disposição geral das linhas pode ser uma indicação para um ajuste final nos azimutes.

Capítulo 11: Conclusão

11.1 – Comentários

Com os resultados obtidos, chega-se a conclusão que os métodos de otimização baseados em algoritmos evolutivos, principalmente o Método do Enxame de Partículas, são altamente recomendados para a utilização em otimização de sistemas de ancoragem, conseguindo uma melhora sensível no nível de tração a que o sistema trabalha.

Recomenda-se o Método do Enxame de Partículas não só pela melhora obtida na função de mérito, mas também pela sua simplicidade.

Por ser um método relativamente novo, o PSO ainda deve receber muitos acréscimos e ter sua performance melhorar ainda mais. O termo de Atração Social, desenvolvido neste trabalho, demonstrou ser um avanço no sentido do aperfeiçoamento do método. Nos testes com as funções comparativas, o PSO com o termo de Atração Social obteve uma melhor performance, quando comparado com os outros. Esta performance pode ser medida pelo número de gerações necessárias para obter um resultado satisfatório, que foi menor com o termos de Atração Social.

Quanto ao sistema otimizado, observou-se a tendência de uma pequena, porém significativa, mudança dos ângulos de azimuth da linhas.

O maior problema da otimização de sistemas de ancoragem é o alto custo computacional para efetuar as análises, o que limita o uso de métodos mais precisos, como a análise dinâmica.

No entanto, com o rápido desenvolvimento do poder de processamento dos computadores, em muito breve será viável a utilização deste tipo de análise, bem como a utilização de populações maiores, melhorando sensivelmente a qualidade dos resultados.

Nos exemplos deste trabalho foi utilizado um computador com processador AMD Athlon XP 2000, com 512 Mb RAM, e, o tempo total de processamento, de cada execução, ficou em torno de 5:00 horas para o MGA e 3:00 horas para o PSO, com

extremos de 1:00 hora para os casos com convergência precoce e 10:00 horas para os casos com convergência mais lenta. Estes tempos podem ser considerados altos para a aplicação do método ao projeto preliminar, onde uma resposta rápida é altamente desejável.

Por isso deve-se buscar meios de reduzir o tempo de processamento total. Várias soluções podem ser adotadas, dentre elas, explorar o processamento paralelo. O programa PROSIM já possui uma versão capaz de rodar distribuído por diversos processadores. Existem ainda técnicas de implementação de algoritmos evolutivos que exploram o processamento paralelo, com a população sendo distribuída entre os processadores ou cada processador executando a análise de um indivíduo.

Novos métodos, como redes neurais [MENDONÇA, 2004] e “Surrogate Surfaces” [DENNIS, 2000], têm sido desenvolvidos no sentido de aumentar a eficiência da otimização através da manipulação, ou mesmo da substituição, da função objetivo. Isto traria grandes benefícios para a otimização de sistemas complexos, baseados em simulações, tais como os sistemas de ancoragem, tornando viável a análise de um número maior de indivíduos em um tempo menor.

11.2 – Trabalhos Futuros

Como aprimoramento da metodologia aqui apresentada poder-se-ia propor a criação de um modelo simplificado de ancoragem, onde os movimentos da embarcação seriam calculados de forma simplificada, utilizando as recomendações da norma [API, 2001] com as linhas representadas pela equação da catenária. Este modelo seria uma verificação inicial da viabilidade do indivíduo. Caso um indivíduo fosse penalizado, não seria necessário efetuar outro tipo de análise. No entanto, se ele não fosse penalizado, poderia ser aplicada a análise estática, e se ele ainda não fosse penalizado aplicar-se-ia a análise dinâmica.

É necessário também incluir nos procedimentos de análise do sistema de ancoragem as análises com linha rompida e transiente. O programa SITUA/PROSIM já está apto a fazer estas análises, restando só incluí-las na função objetivo da otimização.

Além disso, o modelo de otimização utilizado poderia levar em conta outros elementos do projeto de ancoragem, tais como, tipo de âncora utilizada, escolha automática do tipo de material utilizado, interferência com obstáculos de fundo, linhas tratadas em grupo por “córner”, etc.

Como temas a serem desenvolvidos em trabalhos futuros pode-se sugerir:

- Avaliação de outros métodos de otimização (redes neurais, “Surrogate”)
- Sistema simplificado de análise
- Análise estática e dinâmica nos melhores indivíduos
- Consideração do tipo de âncora
- Variação do tipo de material
- Interferência com obstáculos de fundo
- Processamento paralelo

Capítulo 12: Referências Bibliográficas

- AUGUSTO, O. B., DIAS, C.A.N., ROSSI, R.R., 1998, “Practical Method for Mooring System Optimum Design” , PRADS 1998.
- AUGUSTO, O. B.; ANDRADE, B. L. R.; ROSSI, R. R.; 2002, “*Otimização de Recursos para a Operação de Instalação de âncoras de Equipamentos Offshore*”, Pesquisa Operacional, v. 22, n3, pp 305-322, Jul.
- API, 1996, “*Recommended Practice for Design and Analysis of Stationkeeping System for Floating Structures*”, API-RP-2SK.
- BÄCK, T.; HAMMEL, U.; SCHWEFEL, H.P; 1997, “*Evolutionary Computation: Comments on the History and Current State*” , IEEE Transaction on Evolutionary Computation, Vol 1, Nr 1, April 1997, pp 3-17.
- BATHE, K-J., 1996, *Finite Element Procedures*, New Jersey, Prentice-Hall.
- BRITO, A.M.M.; 2001 ,“*Otimização do Sistema de Ancoragem de um FPSO usando Estratégias Evolutivas*”, Tese Msc, COPPE-UFRJ.
- BROOKS, S. H.; 1958, “A Discussion of Random Methods for Seeking Maxima”, Oper. Res. 6 , 244-251.
- BULGARELLI, U.; CARCATERRA, A.; LANDRINI, M.; LUGNI, C.; 1997, “*Mooring System Optimization for Vessel in Waves*”, OMAE 1997, Vol. I-A Offshore Technology ASME.
- CHAKRABARTI, S. K, 1987 , *Hydrodynamics of Offshore Structures*, Computational Mechanics Publications Southampton Boston.
- CHATTERJEE, A. ; SIARRY, P.; 2004,“*Nonlinear Inertia Weight Variation for Dynamic adaptation in Particle Swarm Optimization*”, Computers & Operations Research, Elsevier, Article in Press.

- CLERC, M. ; KENNEDY, J.; 2002, “*The Particle Swarm – Explosion, Stability, and Convergence in a Multidimensional Complex Space*”, IEEE Transaction on Evolutionary Computation, Vol. 6, No 1, Feb.
- CRISFIELD, M. A., 1990 ,“A Consistent Co-Rotational Formulation for Non-Linear, Three-Dimensional, Beam-Elements”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 81, pp. 131-150.
- DARWIN, C., 1996, *A origem da Espécies, Esboço de 1842*, Newton Compton Brasil, Rio de Janeiro.
- DENNIS Jr., J.E.; 2000, “*Surrogate Modeling and Space Mapping for Engineering Optimization*”, A Summary of Danish Technical University Workshop.
- DNV, 2001, “*Offshore Standard Dnv-Os-E301 Position Mooring*”, Det Norsk Veritas, JUNE.
- D’SOUZA, R.; DOVE, P. G. S.; HERVEY, D. G.; HARDIN, D. J.; 1992, “*The Design and Installation of Efficient Deepwater Permanent Moorings*”, Marine Technology , Vol. 29, No. 1, pp. 25-35.
- EBERHARDT, R.C.; SHI, Y.; 1998, “*A Modified Particle Swarm Optimizer*”, IEEE International Conference on Evolutionary Computation, Anchorage, Alaska,. pág. 1945 – 1950.
- EBERHARDT, R. C.; SHI, Y.; 1999, “*Empirical Study of Particle Swarm Optimization*”, IEEE proc. Conference on Evolutionary Computation, Washington DC,. pág. 1945 – 1949.
- EBERHARDT, R.C.; SHI, Y. ; 2000, “*Comparing Inertia Weights and Constriction Factors in Particle Swarm Optimization*”, IEEE International Conference on Evolutionary Computation, San Diego, California, pág. 84 – 88.
- EBERHARDT, R.C.; SHI, Y. ; 2002, “*Multiobjective Optimization Using Dynamic Neighborhood Particle Swarm Optimization*”, IEEE, pág. 1677 – 1681

- EBERHARDT, R. C.; SHI, Y.; 2004, “*Guest Editorial: Special Number on Particle Swarm Optimization*”, Transaction on Evolutionary Computation, IEEE, Vol. 8, No 3.
- ELTAHER, A.; RAJAPAKSA, Y; CHANG, K.; 2003 ,“*Industry Trends for Design of Anchoring Systems for Deepwater Offshore Structures*”, OTC 15265, Offshore Technology Conference.
- FERRARI Jr., A.F., 1993 , *Otimização e Automatização do Projeto de Sistemas de Ancoragem de Plataformas Semi-submersíveis*, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP.
- FYLLING, I. .J.; 1997, “*Automated Optimization of Deepwater Mooring System Design*” , OMAE 1997, Vol. I-A Offshore Technology ASME.
- GARZA-RIOS, L.O.; BERNITSAS, M.M.; NISHIMOTO, K.; MASETTI, I.Q.; 1997, “*Preliminary Design of a DICAS Mooring Systemm for the Brazilian Campos Basin*”. OMAE, Vol. I-A, Offshore Technology, ASME.
- GOLDBERG, D. E., 1989 ,*Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning*, Addison Wesley .
- HE, S.; WU, Q.H.; WEN, J.Y; SAUNDERS, J.R. ; PATON, R.C.; 2004, ”A particle swarm optimizer with passive congregation”, Elsevier BioSystems 78, pp. 135 –147.
- HINZ, E. R.; 1986, *The complete Book of Anchoring and Mooring*, Cornell Maritime Press.
- HOOFT, J. P., 1982 ,*Advanced Dynamics of Marine Structures*, John Wiley & Sons, USA,
- HUGHES, T. J. R. , 1987 ,*The Finite Element Method - Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA.
- JACOB, B. P., 1998, “*Notas de Aula da Disciplina Dinâmica de Sistemas Discretos*”, Programa de Engenharia Civil - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

- JACOB, B.P, 2005, "*Programa PROSIM: Simulação Numérica do Comportamento de Unidades Flutuantes Acoradas, Versão 2.7b– Manual de Entrada de Dados*", COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro.
- KAIZER, A. M; 2003 ,“*Método Alfa para Equilíbrio de Ancoragens de Plataformas*”, Comunicação Pessoal, Rio de Janeiro.
- KANNAN, S.; SLOCHANAL S. M. R., SUBBARAJ P., NARAYANA P. P., 2004, “*Application of particle swarm optimization technique and its variants to generation expansion planning problem*”, Electric Power Systems Research 70 (2004) 203–210 , Elsevier.
- KAYSER Jr, R, D. L., 2003, *Análise Dinâmica de Linhas Flexíveis com Elemento de Pórtico Não Linear Geométrico Híbrido*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ – Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro.
- KENNEDY, J.; EBERHARDT, R.; 1995 ,“*Particle Swarm Optimizarion*”, proc. IEEE Conference on Neural Networks , pág. 1942 – 1948
- KENNEDY, J.; EBERHARDT, R.; 1995a ,“*A New Optimizer Using Particle Swarm Theory*”, Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, IEEE,. pág. 39 – 43
- KENNEDY, J.; EBERHARDT, R.C.; SHI, Y. ; 2001, “*Swarm Intelligence*”, The Morgan Kaufmann Series in Evolutionary Computation, Academic Press, San Francisco.
- KWAN, C.T.; 1992 , “*Design Practice for Mooring of Floating Production Systems*”, Marine Technology, Vol. 28, No. 1, pp. 30-38,.
- LACERDA, E.G.M.; DE CARVALHO, A.C.P.L.F.; 1999 , “*Introdução aos Algoritmos Genéticos*”, Anais do XIX Congresso Nacional da Sociedade Brasileira de Computação, Vol II, pp 52-125.
- LEE, C.H.; 1998, “*WAMIT – Wave Analysis MIT Program*”, Department of Ocean Engineering Massachusetts Institute of Technology.

- LEMONGE, A.C.C.; 1999 *Aplicação de Algoritmos Genéticos em Otimização Estrutural*, Tese DSc., COPPE/UFRJ.
- MAFFRA, S.A.R.S.; PACHECO, M.A.C.; MENEZES, I.F.M.; 2001, “*Genetic Algorithm Optimization for Mooring System*”, 5th IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems, Helsinki, Stockholm.
- MEIROVICH, L., 1970, *Methods of Analytical Dynamics*, McGraw-Hill, New York.
- MASETTI, I.Q.; 1994 , *Análise de um Quadro de Ancoragem para Escoamento de Produção por Navio*. Exame de Qualificação ao Doutorado, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ.
- MASETTI, I.Q.; 1997, *Análise Dinâmica de Navios Ancorados com Complacência Diferenciada*. Tese DSc., COPPE/UFRJ.
- MASETTI, I.Q., JACOB, B. P., SPARANO J. V., ALBRECHT, C. H., BARROS, C.R.M.; 2003 ,“*Computational System for Offshore Pipeline Launching Simulation*”, Proceedings of 22nd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Cancun.
- MATHISEN, K.M., 1990 , *Large Displacement Analysis of Flexible and Rigid Systems Considering Displacement-Dependent Loads and Nonlinear Constraints*. Division of Structural Engineering/The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway.
- MENDONÇA, C.E.L.R.; 2004, *Um sistema Computacional para Otimização Através de Algoritmos Genéticos e Redes Neurais*, Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ.
- MICHALEWICZ, Z. ; 1999, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, 3rd Edition, Springer Verlag, Berlin Heidelberg.
- MOURELLE, M. M., 1993 , *Análise Dinâmica de Sistemas Estruturais Constituídos por Linhas Marítimas*, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil.

- NOBLE DENTON; 1996 ,“*Integrated Mooring and Riser Design – Phase I: Interim report*”. MCS and Noble Denton Europe.
- NOBLE DENTON; 1998, “*Integrated Mooring and Riser Design – Phase II: Interim report*”. MCS and Noble Denton Europe.
- PARSOPOULOS, K. E.; VRAHATIS, M. N.; 2004, “*On the Computation of All Global Minimizers Through Particle Swarm Optimization*” , Transaction on Evolutionary Computation, IEEE, Vol. 8, No. 3, June.
- PAULING, J.R., 1970, *Wave-Induced Forces and Motions of Tubular Structures*. Proceedings 8th Symposium of Naval Hydrodynamic, ONR, Arc 179, Pasadena,
- PETROBRAS, 1999 ,“*Metoccean Data – Technical Specification*”, ET-3000.00-1000-941-PPC-001.
- PETROBRAS , 2004, “Minisite Águas Profundas”,
http://www2.petrobras.com.br/minisite/aguas_profundas/index.stm
- PORTELLA, R. B., 2001 , *Simulações Numéricas e Testes em Modelos Reduzidos para o Cálculo de Ancoragem de Um Sistema Flutuante*, Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- RATNAWEERA A., HALGAMUGE S.K.; 2004, *Self-Organizing Hierarchical Particle Swarm Optimizer With Time-Varying Acceleration Coefficients*, IEEE Transactions On Evolutionary Computation, vol. 8, no. 3, june .
- RODRIGUES, G. J. de O., 2004, *Ferramentas Computacionais Para Otimização E Síntese De Sistemas Híbridos De Risers Baseados No Conceito De Bóia De Subsuperfície* , Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- RODRIGUES, M. V., 1998, *Uma Estratégia Semi-Implicita para a Solução de problemas de Dinâmica Estrutural*, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil.

- RODRIGUES, M. V., 2004a, *Algoritmos Otimizados Para A Análise Acoplada De Sistemas Flutuantes Na Exploração De Petróleo Offshore*, Tese Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- ROSSI, R. R.; MESSINA, L. C. P.; AMARANTE, L. M. N.; KAIZER, A. M.; AUGUSTO, O. B.; SILVA, J. R., 2001, “*MODUS's Mooring Systems for Campos Basin Deep Water Fields*”. OMAE.
- ROSSI, R. R.; 2002, *Cabos de Poliéster para Ancoragem de Plataformas Oceânicas em Águas Ultraprofundas*, Tese de Mestrado, Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ.
- SANTOS, C. M. P. M.; 2000, *Otimização de Um Sistema de Ancoragem de um FPSO*, Exame de Qualificação ao Doutorado, Programa de Engenharia Civil, COPPE; UFRJ.
- SCHACHTER, R. D.; 1990 *Optimization Techniques with Knowledge Based Control in Ship Concept Design*, PhD Thesis, Department of Mechanical engineering, Brunel University, UK.
- SCHWEFEL, H.P.; 1995, *Evolution and Optimun Seeking*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- SENRA, S. F. , 2000, *Metodologia de Projeto Integrado de Linhas de Ancoragem e Risers*, Proposta de Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- SENRA, S. F. , 2004, *Metodologias de Análise e Projeto Integrado De Sistemas Flutuantes para Exploração de Petróleo Offshore*, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- SHI , X. H. ; LIANG, Y. C.; LEE, H.P.; LU, C.; WANG. L.M.; 2004, “*An improved GA and a novel PSO-GA-based hybrid algorithm*”, Information Processing Letters, Elsevier, Article in press,.
- SIDDAL, J. N.; 1982, *Optimal Engineering Design: Principles and Applications*, Marcel Drekker, inc., New York.

- SOUZA, J. M. C.; CALIGIANA, J.; CHIMISSO, E. G.; 2001, “*Otimização de Cabos para Ancoragem Através da Associação de Algoritmos Genéticos e de Lógica Nebulosa (Fuzzy Logic)*”, 22nd Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Campinas.
- TRELEA, I. C. ; 2003, “*The Particle Swarm Optimization Algorithm: Convergence Analysis and Parameter Selection*”, Information Processing Letters, Nr. 85, pp 317-325.
- TSUJI, K ; HONGESOMBUT, K.; MITANI, Y.; 2002, “*Power System Stabilizer Tuning in Multimachine Power System Based On a Minimum Phase Control Loop Method and Genetic Algorithm*” , 14th PSCC, Sevilha.
- VARDARO, E.; 2003, “*Curso de Ancoragem de Sistemas Flutuantes*”, Laboratório de Métodos Computacionais em Sistemas Offshore, LAMCSO/COPPE/UFRJ.
- VENTER, G.; SOBIESZCZANSKI-SOBIELSKI, J.; 2002 , “Particle Swarm Optimization” , 43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC - Structures, Structural Dynamics and Material Conference, Denver, Colorado.
- VIEIRA, L. T. ; 2004, *Projeto Ótimo de Risers via Algoritmos Genéticos* ,Exame de Qualificação ao Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- WETTER, M.; WRIGHT, J.; 2004, “*A comparison of Deterministic and probabilistic optimization algorithms for nonsmooth simulation-based optimization*”, Building and Environment , Elsevier, p. 989-999.
- ZIENKIEWICZ, O. C., TAYLOR, R. L., 2000 ,*The Finite Element Method*, 5 ed. Oxford, Butterworth-Heinemann,.

ANEXO A

A.1 - Resultado de Execução de Enxame de Partículas - Exemplo P1

SITUA - Otimização 2/27/2005 11:33:06 AM

Parâmetros do Algoritmo
Número de Parâmetros = 10
Tamanho do cromossomo = 77

Param	Minimo	Máximo	Precisão	Tam. Alelo
01	-10.000	10.000	0.100	8
02	-10.000	10.000	0.100	8
03	-10.000	10.000	0.100	8
04	-10.000	10.000	0.100	8
05	-10.000	10.000	0.100	8
06	-10.000	10.000	0.100	8
07	-10.000	10.000	0.100	8
08	-10.000	10.000	0.100	8
09	1500.000	3000.000	20.000	7
10	80.000	300.000	5.000	6

Tam. População = 10 Máx. Geração = 30
Critério de parada: Média x Melhor. K= 0.95 N= 3

Utilizando Enxame de Partícula

Ger	Melhor	Pior	Média	Desv.Pad	Energ.	Aval	Conv	Penal.	Dist.	Tempo		
1	0.49364	0.42588	0.45062	0.02052	5.7	10	0	10	3.39831	0:04:35	5.19%	57.02%
2	0.49364	0.44468	0.45585	0.01039	9.1	10	0	10	3.08294	0:04:19	5.19%	57.02%
3	0.49364	0.45374	0.46225	0.00427	9.1	10	0	10	2.75624	0:04:46	5.19%	57.02%
4	0.49364	0.45888	0.46875	0.00578	8.8	10	0	10	2.44684	0:07:00	5.19%	57.02%
5	0.49364	0.00000	0.14145	0.21607	8.6	10	7	3	2.28206	0:04:34	5.19%	57.02%

	6	0.49364	0.00000	0.04858	0.14573	31.8	10	9	1	1.71096	0:04:14	5.19%	57.02%
	7	0.49364	0.00000	0.43346	0.14466	23.3	10	1	9	1.65855	0:04:57	5.19%	57.02%
	8	0.49364	0.46233	*0.47330	0.00664	16.3	10	0	10	1.62236	0:04:34	5.19%	57.02%
	9	0.49364	0.45950	*0.47388	0.00897	8.2	10	0	10	1.35385	0:04:24	5.19%	57.02%
	10	0.88856	0.36930	0.50387	0.13195	8.3	10	0	9	1.28845	0:08:16	21.82%	47.42%
	11	0.88856	0.00000	0.09546	0.19093	8.7	10	8	2	0.96742	0:02:23	21.82%	47.42%
	12	0.94975	0.00000	0.37086	0.40013	13.5	10	5	2	0.76691	0:05:27	15.16%	48.27%
	13	0.99168	0.48330	0.72578	0.23566	12.8	10	0	5	0.70911	0:06:59	10.84%	49.01%
	14	1.00484	0.48148	0.59596	0.20009	7.8	10	0	8	0.66922	0:05:10	9.52%	47.88%
	15	1.00484	0.49414	0.74378	0.24686	6.8	10	0	5	0.50810	0:06:04	9.52%	47.88%
	16	1.00484	0.49702	0.90973	0.14314	5.6	10	0	1	0.36284	0:08:47	9.52%	47.88%
	17	1.00484	0.00000	0.75749	0.38023	5.6	10	2	0	0.42049	0:07:03	9.52%	47.88%
	18	1.00484	0.00000	0.77173	0.31636	4.8	10	1	2	0.36786	0:07:33	9.52%	47.88%
	19	1.00484	0.49520	0.69405	0.23946	4.8	10	0	6	0.38167	0:05:48	9.52%	47.88%
	20	1.00484	0.49870	0.74318	0.24334	4.0	10	0	5	0.31113	0:06:41	9.52%	47.88%
	21	1.00484	0.94906	*0.97419	0.01596	4.0	10	0	0	0.24288	0:06:56	9.52%	47.88%
	22	1.00484	0.93834	*0.96450	0.01319	3.4	10	0	0	0.20127	0:06:34	9.52%	47.88%
	23	1.00484	0.96819	*0.97817	0.00965	2.7	10	0	0	0.14805	0:07:41	9.52%	47.88%

Dados da Evolução da População:

Tempo total de simulação : 02:14:45

Número total de avaliações da função: 230

Número total de indivíduos penalizados: 118

Número total de indivíduos não penalizados: 112

Número total de indivíduos com falha de convergência: 33

Ger	Melhor	Pior	Média	DesvPad	NumAval	NaoConv	N.Ind.Pen.	D.Euc.Norm	Tempo
1	0.493639	0.425876	0.450624	0.020524	10	0	10	3.398315	00:04:35
2	0.493639	0.444678	0.455854	0.010386	10	0	10	3.082944	00:04:19
3	0.493639	0.453737	0.462250	0.004270	10	0	10	2.756241	00:04:46
4	0.493639	0.458878	0.468751	0.005778	10	0	10	2.446844	00:07:00
5	0.493639	0.000000	0.141446	0.216073	10	7	3	2.282057	00:04:34
6	0.493639	0.000000	0.048577	0.145731	10	9	1	1.710964	00:04:14

	7	0.493639	0.000000	0.433460	0.144658	10	1	9	1.658555	00:04:57
	8	0.493639	0.462327	*0.473304	0.006644	10	0	10	1.622365	00:04:34
	9	0.493639	0.459497	*0.473879	0.008969	10	0	10	1.353855	00:04:24
	10	0.888563	0.369303	0.503871	0.131950	10	0	9	1.288449	00:08:16
	11	0.888563	0.000000	0.095462	0.190930	10	8	2	0.967417	00:02:23
	12	0.949747	0.000000	0.370860	0.400131	10	5	2	0.766906	00:05:27
	13	0.991676	0.483299	0.725780	0.235664	10	0	5	0.709112	00:06:59
	14	1.004842	0.481478	0.595965	0.200086	10	0	8	0.669222	00:05:10
	15	1.004842	0.494145	0.743777	0.246861	10	0	5	0.508097	00:06:04
	16	1.004842	0.497018	0.909729	0.143142	10	0	1	0.362845	00:08:47
	17	1.004842	0.000000	0.757493	0.380225	10	2	0	0.420488	00:07:03
	18	1.004842	0.000000	0.771728	0.316358	10	1	2	0.367861	00:07:33
	19	1.004842	0.495195	0.694048	0.239455	10	0	6	0.381665	00:05:48
	20	1.004842	0.498701	0.743180	0.243339	10	0	5	0.311130	00:06:41
	21	1.004842	0.949057	*0.974187	0.015963	10	0	0	0.242878	00:06:56
	22	1.004842	0.938336	*0.964503	0.013190	10	0	0	0.201267	00:06:34
	23	1.004842	0.968186	*0.978171	0.009647	10	0	0	0.148052	00:07:41

+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+

Eficiência:

+-----+-----+-----+
Ganho % NumAval Efic.
+-----+-----+-----+
103.56 230 0.45025
+-----+-----+-----+

A.2 - Resultado de Execução de Micro Algoritmo Genético - Exemplo P1

SITUA - Otimização 2/26/2005 4:54:28 PM

Parâmetros do Algoritmo Genético

Número de Parâmetros = 10

Tamanho do cromossomo = 77

Param	Minimo	Máximo	Precisão	Tam. Alelo
01	-10.000	10.000	0.100	8
02	-10.000	10.000	0.100	8
03	-10.000	10.000	0.100	8
04	-10.000	10.000	0.100	8
05	-10.000	10.000	0.100	8
06	-10.000	10.000	0.100	8
07	-10.000	10.000	0.100	8
08	-10.000	10.000	0.100	8
09	1500.000	3000.000	20.000	7
10	80.000	300.000	5.000	6

Tam. População = 10

Máx. Geração = 30

Critério de parada: Média x Melhor. K= 0.95 N= 3

Utilizando Micro Algoritmo Genético (10 gerações na fase 2)

Ger	Melhor	Pior	Média	Desv.Pad	Var.Gen.	Aval	Conv	Penal.	Dist.	Tempo
1/1	0.48584	0.42626	0.45340	0.01863	51.08	10	0	10	3.51607	0:05:03
1/2	0.48661	0.45103	*0.47100	0.01287	47.76	9	0	9	3.45929	0:05:03
1/3	0.48661	0.48366	*0.48536	0.00111	36.65	5	0	5	3.38103	0:03:01
1/4	0.49301	0.48592	*0.48753	0.00272	17.32	5	0	5	2.11938	0:03:05
1/5	0.49302	0.48659	*0.49054	0.00296	13.85	5	0	5	1.67912	0:03:02
1/6	0.49318	0.49220	*0.49295	0.00025	02.74	4	0	4	0.16245	0:02:26

Ger	Melhor	Pior	Média	Desv.Pad	Var.Gen.	Aval	Conv	Penal.	Dist.	Tempo			
2/1	0.49318	0.00000	0.41421	0.13964	51.52	10	2	8	4.00837	0:04:29	10.13%	52.60%	(0.49318)
2/2	0.49318	0.44056	0.46372	0.01387	51.66	8	1	7	4.14377	0:03:56	10.13%	52.60%	(0.49318)
2/3	0.95458	0.00000	0.47181	0.21364	36.36	9	2	6	2.96972	0:04:20	14.65%	49.85%	(0.95458)
2/4	0.95458	0.35349	0.50928	0.15297	35.79	10	1	9	3.36400	0:05:24	14.65%	49.85%	(0.95458)
2/5	0.95458	0.47421	0.57201	0.19131	29.29	7	0	6	3.33134	0:05:41	14.65%	49.85%	(0.95458)
2/6	0.98160	0.47941	0.77975	0.24185	14.29	5	0	4	1.31803	0:02:47	11.86%	49.85%	(0.98160)
2/7	0.98160	0.95455	*0.95725	0.00812	00.00	1	0	0	0.00000	0:00:51	11.86%	49.85%	(0.98160)
Ger	Melhor	Pior	Média	Desv.Pad	Var.Gen.	Aval	Conv	Penal.	Dist.	Tempo			
3/1	0.98160	0.42674	0.50768	0.15931	50.94	10	0	10	3.57553	0:03:38	11.86%	49.85%	(0.98160)
3/2	0.98160	0.44728	0.51768	0.15522	43.15	10	0	10	3.01196	0:05:03	11.86%	49.85%	(0.98160)
3/3	0.98160	0.47371	0.53103	0.15023	30.45	6	1	5	1.87414	0:03:31	11.86%	49.85%	(0.98160)
3/4	0.98160	0.48397	0.53463	0.14900	47.19	4	0	4	2.71322	0:02:09	11.86%	49.85%	(0.98160)
3/5	0.98160	0.48275	0.53436	0.14908	42.42	7	0	7	2.53653	0:04:51	11.86%	49.85%	(0.98160)
3/6	0.98160	0.48251	0.53505	0.14886	35.50	8	0	8	2.38307	0:05:30	11.86%	49.85%	(0.98160)
3/7	0.98160	0.47915	0.53460	0.14911	19.34	6	0	6	1.34892	0:03:07	11.86%	49.85%	(0.98160)
3/8	0.98160	0.47073	0.53036	0.15056	21.50	8	0	8	1.59460	0:06:13	11.86%	49.85%	(0.98160)
3/9	0.98160	0.48241	0.53478	0.14895	31.89	7	0	7	2.32064	0:05:05	11.86%	49.85%	(0.98160)
3/10	0.98160	0.48383	0.53513	0.14883	32.18	5	0	5	2.40853	0:03:21	11.86%	49.85%	(0.98160)
3/11	0.98160	0.47077	0.53377	0.14934	28.72	5	0	5	2.14178	0:03:41	11.86%	49.85%	(0.98160)
3/12	0.98160	0.47078	0.53214	0.14993	24.68	4	0	4	1.87445	0:03:14	11.86%	49.85%	(0.98160)
3/13	0.98160	0.46890	0.53099	0.15037	20.49	6	0	6	1.71876	0:04:59	11.86%	49.85%	(0.98160)
3/14	0.98160	0.48565	0.53575	0.14862	25.83	4	0	4	2.07683	0:02:45	11.86%	49.85%	(0.98160)
3/15	0.98160	0.47077	0.53308	0.14964	15.01	4	0	4	1.32830	0:02:49	11.86%	49.85%	(0.98160)
3/16	0.98160	0.47159	0.53492	0.14897	12.99	3	0	3	1.27601	0:02:21	11.86%	49.85%	(0.98160)
3/17	0.98160	0.48691	0.53664	0.14832	13.42	3	0	3	1.41718	0:02:27	11.86%	49.85%	(0.98160)
3/18	0.98160	0.48559	0.90923	0.14147	11.40	3	0	2	1.38980	0:02:14	11.86%	49.85%	(0.98160)
3/19	0.98160	0.48791	0.53728	0.14811	11.69	2	0	2	1.39052	0:01:23	11.86%	49.85%	(0.98160)
3/20	0.98160	0.95317	*0.95601	0.00853	11.69	1	0	0	1.39052	0:00:49	11.86%	49.85%	(0.98160)
3/21	0.98160	0.48746	0.53688	0.14824	11.69	2	0	2	1.39052	0:01:26	11.86%	49.85%	(0.98160)
3/22	0.98160	0.47151	0.57882	0.19454	07.79	4	0	3	0.94195	0:03:27	11.86%	49.85%	(0.98160)
3/23	0.98160	0.47151	0.53411	0.14927	08.66	5	0	5	1.11858	0:03:58	11.86%	49.85%	(0.98160)
3/24	0.98160	0.48543	0.90933	0.14155	09.38	4	0	2	1.38976	0:02:32	11.86%	49.85%	(0.98160)

	3/25	0.98160	0.48755	0.86390	0.18834	09.67	3	0	2	1.39049	0:02:16	11.86%	49.85%	(0.98160)
	3/26	0.98160	0.47078	0.53529	0.14886	07.79	3	0	3	1.23526	0:02:27	11.86%	49.85%	(0.98160)
	3/27	0.98160	0.47071	0.53559	0.14876	08.08	2	0	2	1.23598	0:01:24	11.86%	49.85%	(0.98160)
	3/28	0.98160	0.47069	0.53335	0.14956	06.78	4	0	4	1.08076	0:03:43	11.86%	49.85%	(0.98160)
	3/29	0.98160	0.48796	0.53732	0.14809	09.09	2	0	2	1.39048	0:01:30	11.86%	49.85%	(0.98160)
	3/30	0.98160	0.95328	*0.95612	0.00850	09.09	2	0	1	1.39048	0:01:28	11.86%	49.85%	(0.98160)
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----														
	Ger	Melhor	Pior	Média	Desv.Pad	Var.Gen.	Aval	Conv	Penal.	Dist.	Tempo			
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----														
	4/1	0.98160	0.36317	0.49073	0.16643	53.68	10	1	9	3.66708	0:04:58	11.86%	49.85%	(0.98160)
	4/2	0.98160	0.44782	0.51368	0.15619	35.50	8	0	8	2.18874	0:04:19	11.86%	49.85%	(0.98160)
	4/3	0.98160	0.45961	0.52273	0.15307	46.03	8	0	8	2.65497	0:04:39	11.86%	49.85%	(0.98160)
	4/4	0.98160	0.46519	0.52241	0.15313	34.05	9	0	9	1.91001	0:06:25	11.86%	49.85%	(0.98160)
	4/5	0.98160	0.45562	0.52157	0.15345	38.67	7	0	7	1.94508	0:04:40	11.86%	49.85%	(0.98160)
	4/6	0.98160	0.45523	0.52304	0.15298	36.80	7	0	7	2.27882	0:04:06	11.86%	49.85%	(0.98160)
	4/7	0.98160	0.47113	0.52535	0.15209	44.88	6	0	6	2.92168	0:05:14	11.86%	49.85%	(0.98160)
	4/8	0.98160	0.46810	0.52583	0.15203	41.70	7	0	7	2.56979	0:03:16	11.86%	49.85%	(0.98160)
	4/9	0.98160	0.45566	0.52293	0.15303	35.79	8	0	8	2.46384	0:05:09	11.86%	49.85%	(0.98160)
	4/10	0.98160	0.47340	0.52761	0.15134	43.43	9	0	9	3.24242	0:05:59	11.86%	49.85%	(0.98160)
	4/11	0.98160	0.47208	0.52738	0.15143	42.57	9	0	9	3.07451	0:05:01	11.86%	49.85%	(0.98160)
	4/12	0.98160	0.46060	0.52609	0.15195	39.54	8	0	8	2.98308	0:04:17	11.86%	49.85%	(0.98160)
	4/13	0.98160	0.45566	0.52321	0.15301	34.49	6	0	6	2.49387	0:04:15	11.86%	49.85%	(0.98160)
	4/14	0.98160	0.45561	0.52298	0.15314	31.17	6	0	6	2.25567	0:03:49	11.86%	49.85%	(0.98160)
	4/15	0.98160	0.47842	0.52890	0.15090	43.29	3	0	3	3.16481	0:01:33	11.86%	49.85%	(0.98160)
	4/16	0.98160	0.46466	0.52357	0.15279	25.40	5	0	5	1.92074	0:02:32	11.86%	49.85%	(0.98160)
	4/17	0.98160	0.46141	0.52733	0.15151	38.10	3	0	3	3.08936	0:01:40	11.86%	49.85%	(0.98160)
	4/18	0.98160	0.47251	0.52840	0.15108	41.27	3	0	3	3.13283	0:02:17	11.86%	49.85%	(0.98160)
	4/19	0.98160	0.46781	0.52799	0.15124	38.67	3	0	3	3.10527	0:01:33	11.86%	49.85%	(0.98160)
	4/20	0.98160	0.46765	0.52791	0.15127	38.67	3	0	3	3.10527	0:01:32	11.86%	49.85%	(0.98160)
	4/21	0.98160	0.46696	0.52709	0.15158	37.81	5	0	5	2.75136	0:02:28	11.86%	49.85%	(0.98160)
	4/22	0.98160	0.47233	0.52663	0.15169	38.10	3	0	3	3.10090	0:01:58	11.86%	49.85%	(0.98160)
	4/23	0.98160	0.47655	0.52886	0.15092	40.40	3	0	3	3.11817	0:01:44	11.86%	49.85%	(0.98160)
	4/24	0.98160	0.46577	0.52667	0.15172	35.93	3	0	3	2.61445	0:01:37	11.86%	49.85%	(0.98160)
	4/25	0.98160	0.46835	0.52804	0.15122	40.84	3	0	3	2.96298	0:02:03	11.86%	49.85%	(0.98160)
	4/26	0.98160	0.46286	0.52459	0.15245	30.88	6	0	6	2.79968	0:04:07	11.86%	49.85%	(0.98160)
	4/27	0.98160	0.46574	0.52432	0.15254	27.13	4	0	4	2.08784	0:02:04	11.86%	49.85%	(0.98160)
	4/28	0.98160	0.47881	0.52909	0.15084	41.56	2	0	2	3.13647	0:01:06	11.86%	49.85%	(0.98160)

	4/29	0.98160	0.46696	0.52716	0.15153	37.66	4	0	4	2.90960	0:02:00	11.86%	49.85%	(0.98160)					
	4/30	0.98160	0.46646	0.52709	0.15156	37.66	4	0	4	2.91103	0:02:13	11.86%	49.85%	(0.98160)					
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+																			
	Ger		Melhor		Pior		Média		Desv.Pad	Var.Gen.	Aval		Conv		Penal.	Dist.		Tempo	
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+																			
	5/1	0.98160	0.42413	0.50006	0.16104	51.52	10	0	10	3.70544	0:05:04	11.86%	49.85%	(0.98160)					
	5/2	0.98160	0.43011	0.50912	0.15791	46.03	10	0	10	2.97091	0:05:55	11.86%	49.85%	(0.98160)					
	5/3	0.98160	0.45697	0.51443	0.15583	40.12	10	0	10	2.59765	0:07:46	11.86%	49.85%	(0.98160)					
	5/4	0.98160	0.46139	0.51743	0.15478	38.24	10	0	10	2.71984	0:07:43	11.86%	49.85%	(0.98160)					
	5/5	0.98160	0.44465	0.51629	0.15534	22.94	8	0	8	1.91723	0:05:37	11.86%	49.85%	(0.98160)					
	5/6	0.98160	0.45746	0.51883	0.15434	21.07	9	0	9	1.37779	0:06:29	11.86%	49.85%	(0.98160)					
	5/7	0.98160	0.45759	0.51899	0.15427	21.65	9	0	9	1.38025	0:06:56	11.86%	49.85%	(0.98160)					
	5/8	0.98160	0.45898	0.51986	0.15397	26.98	8	0	8	1.62209	0:05:45	11.86%	49.85%	(0.98160)					
	5/9	0.98160	0.46880	0.52336	0.15276	28.28	6	0	6	1.67974	0:04:10	11.86%	49.85%	(0.98160)					
	5/10	0.98160	0.46780	0.52371	0.15266	25.25	6	0	6	1.56583	0:03:30	11.86%	49.85%	(0.98160)					
	5/11	0.98160	0.46177	0.52426	0.15252	31.17	5	0	5	1.71552	0:02:44	11.86%	49.85%	(0.98160)					
	5/12	0.98160	0.45745	0.51751	0.15488	20.63	6	0	6	1.10621	0:03:50	11.86%	49.85%	(0.98160)					
	5/13	0.98160	0.46413	0.52239	0.15316	32.47	4	0	4	1.69816	0:02:32	11.86%	49.85%	(0.98160)					
	5/14	0.98160	0.46440	0.52379	0.15267	29.87	4	0	4	1.63705	0:02:08	11.86%	49.85%	(0.98160)					
	5/15	0.98160	0.47633	0.52686	0.15158	33.77	2	0	2	1.78859	0:01:10	11.86%	49.85%	(0.98160)					
	5/16	0.98160	0.46562	0.52579	0.15197	33.62	3	0	3	1.76768	0:01:22	11.86%	49.85%	(0.98160)					
	5/17	0.98160	0.47633	0.52686	0.15158	33.77	2	0	2	1.78859	0:01:11	11.86%	49.85%	(0.98160)					
	5/18	0.98160	0.44495	0.51807	0.15489	22.51	5	0	5	1.32233	0:03:44	11.86%	49.85%	(0.98160)					
	5/19	0.98160	0.46182	0.52215	0.15326	27.56	6	0	6	1.55557	0:03:15	11.86%	49.85%	(0.98160)					
	5/20	0.98160	0.46230	0.52426	0.15253	31.89	4	0	4	1.72393	0:02:25	11.86%	49.85%	(0.98160)					
	5/21	0.98160	0.44469	0.51476	0.15594	20.78	8	0	8	1.34959	0:05:17	11.86%	49.85%	(0.98160)					
	5/22	0.98160	0.46440	0.52625	0.15184	30.59	3	0	3	1.67882	0:01:32	11.86%	49.85%	(0.98160)					
	5/23	0.98160	0.44898	0.51910	0.15444	22.66	7	0	7	1.39409	0:04:49	11.86%	49.85%	(0.98160)					
	5/24	0.98160	0.45234	0.52185	0.15348	24.24	5	0	5	1.44418	0:03:21	11.86%	49.85%	(0.98160)					
	5/25	0.98160	0.44580	0.52090	0.15388	29.29	5	0	5	1.61383	0:03:31	11.86%	49.85%	(0.98160)					
	5/26	0.98160	0.46172	0.52312	0.15294	28.14	5	0	5	1.55105	0:03:07	11.86%	49.85%	(0.98160)					
	5/27	0.98160	0.46809	0.52603	0.15188	30.16	3	0	3	1.66923	0:01:51	11.86%	49.85%	(0.98160)					
	5/28	0.98160	0.45702	0.51989	0.15408	24.68	6	0	6	1.39586	0:03:50	11.86%	49.85%	(0.98160)					
	5/29	0.98160	0.46865	0.52537	0.15211	26.84	3	0	3	1.56970	0:02:03	11.86%	49.85%	(0.98160)					
	5/30	0.98160	0.46269	0.52315	0.15289	21.50	5	0	5	1.37572	0:02:40	11.86%	49.85%	(0.98160)					
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+																			
	Ger		Melhor		Pior		Média		Desv.Pad	Var.Gen.	Aval		Conv		Penal.	Dist.		Tempo	

	6/1	0.98160	0.38819	0.48213	0.16765	52.96	10	0	10	4.10213	0:05:20	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	6/2	0.98160	0.41150	0.49738	0.16195	52.96	8	0	8	3.94468	0:03:08	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	6/3	0.98160	0.43703	0.50334	0.15980	40.84	8	0	8	3.00667	0:04:47	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	6/4	0.98160	0.42158	0.51258	0.15746	35.50	8	0	8	3.02483	0:03:58	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	6/5	0.98160	0.46405	0.52893	0.15112	20.63	6	0	6	1.73445	0:03:01	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	6/6	0.98160	0.45995	0.51678	0.15498	07.79	7	0	7	0.93631	0:05:43	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	6/7	0.98160	0.46523	0.52071	0.15364	09.96	4	0	4	1.50741	0:03:24	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	6/8	0.98160	0.42259	0.51050	0.15809	05.48	5	0	5	0.97644	0:04:19	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	6/9	0.98160	0.47032	0.52153	0.15336	08.95	3	0	3	1.60377	0:02:30	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	6/10	0.98160	0.46986	0.52159	0.15334	11.11	4	0	4	1.56502	0:03:15	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	6/11	0.98160	0.36797	0.49095	0.16988	08.66	2	0	2	1.02406	0:01:50	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	6/12	0.98160	0.36816	0.50136	0.16512	10.10	2	0	2	1.19474	0:01:33	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	6/13	0.98160	0.47060	0.52170	0.15330	12.99	1	0	1	1.53609	0:00:50	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	6/14	0.98160	0.36662	0.50093	0.16539	10.10	2	0	2	1.19474	0:01:48	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	6/15	0.98160	0.46041	0.52076	0.15365	11.69	3	0	3	1.37039	0:02:13	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	6/16	0.98160	0.46005	0.51966	0.15404	10.10	2	0	2	1.19474	0:01:28	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	6/17	0.98160	0.46003	0.52068	0.15367	11.40	3	0	3	1.36534	0:02:24	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	6/18	0.98160	0.45982	0.51879	0.15432	08.51	6	0	6	1.16348	0:05:29	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	6/19	0.98160	0.46004	0.51958	0.15407	08.95	3	0	3	1.21407	0:02:23	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	6/20	0.98160	0.46041	0.51960	0.15405	09.96	4	0	4	1.19466	0:03:29	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	6/21	0.98160	0.47080	0.52188	0.15324	12.99	2	0	2	1.53609	0:01:32	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	6/22	0.98160	0.45998	0.51760	0.15475	07.50	3	0	3	0.85852	0:02:16	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	6/23	0.98160	0.34917	0.45735	0.18261	07.94	3	0	3	1.00104	0:02:43	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	6/24	0.98160	0.44753	0.50506	0.15906	02.02	3	0	3	0.31825	0:02:30	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	Ger		Melhor		Pior		Média		Desv.Pad		Var.Gen.		Aval		Conv		Penal.		Dist.		Tempo	
	7/1	0.98160	0.38983	0.47799	0.17120	46.75	10	0	10	3.66550	0:04:36	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	7/2	0.98160	0.41530	0.50197	0.16086	33.48	9	0	9	3.39950	0:05:44	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	7/3	0.98160	0.46558	0.51996	0.15390	16.16	5	0	5	2.25296	0:03:51	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	7/4	0.98160	0.46845	0.52256	0.15302	10.25	4	0	4	1.86886	0:03:13	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	7/5	0.98160	0.47218	0.52316	0.15281	11.11	3	0	3	2.01140	0:02:02	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	7/6	0.98160	0.46967	0.52252	0.15303	12.27	4	0	4	2.02613	0:02:53	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	7/7	0.98160	0.46810	0.52245	0.15306	10.10	3	0	3	1.98431	0:02:20	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	7/8	0.98160	0.46532	0.52216	0.15316	09.24	2	0	2	1.77525	0:01:24	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	7/9	0.98160	0.46554	0.52186	0.15327	08.51	3	0	3	1.72865	0:02:22	11.86%	49.85%	(0.98160)								

	7/10	0.98160	0.47217	0.52312	0.15283	10.39	1	0	1	1.99716	0:00:52	11.86%	49.85%	(0.98160)
	7/11	0.98160	0.46558	0.52181	0.15329	08.08	2	0	2	1.55335	0:01:40	11.86%	49.85%	(0.98160)
	7/12	0.98160	0.46562	0.52200	0.15322	09.09	4	0	4	1.76247	0:02:57	11.86%	49.85%	(0.98160)
	7/13	0.98160	0.46561	0.52116	0.15351	06.93	2	0	2	1.33144	0:01:26	11.86%	49.85%	(0.98160)
	7/14	0.98160	0.46637	0.52227	0.15312	09.67	3	0	3	1.95056	0:02:13	11.86%	49.85%	(0.98160)
	7/15	0.98160	0.46541	0.52178	0.15330	08.08	3	0	3	1.55335	0:02:13	11.86%	49.85%	(0.98160)
	7/16	0.98160	0.47218	0.52312	0.15283	10.39	1	0	1	1.99716	0:00:55	11.86%	49.85%	(0.98160)
	7/17	0.98160	0.46562	0.52209	0.15319	08.66	3	0	3	1.72418	0:02:05	11.86%	49.85%	(0.98160)
	7/18	0.98160	0.47184	0.52281	0.15293	10.39	1	0	1	1.99716	0:00:54	11.86%	49.85%	(0.98160)
	7/19	0.98160	0.46656	0.52231	0.15311	09.67	3	0	3	1.95056	0:02:03	11.86%	49.85%	(0.98160)
	7/20	0.98160	0.46560	0.52219	0.15315	09.24	2	0	2	1.77525	0:01:40	11.86%	49.85%	(0.98160)
	7/21	0.98160	0.46777	0.52242	0.15307	10.25	3	0	3	1.98437	0:02:08	11.86%	49.85%	(0.98160)
	7/22	0.98160	0.46561	0.52167	0.15333	08.51	3	0	3	1.72865	0:02:01	11.86%	49.85%	(0.98160)
	7/23	0.98160	0.46794	0.52269	0.15298	10.10	3	0	3	1.98431	0:02:17	11.86%	49.85%	(0.98160)
	7/24	0.98160	0.47220	0.52314	0.15282	10.39	2	0	2	1.99716	0:01:28	11.86%	49.85%	(0.98160)
	7/25	0.98160	0.46565	0.52147	0.15339	07.79	5	0	5	1.60922	0:03:44	11.86%	49.85%	(0.98160)
	7/26	0.98160	0.46562	0.52220	0.15315	09.24	2	0	2	1.77525	0:01:24	11.86%	49.85%	(0.98160)
	7/27	0.98160	0.46558	0.52127	0.15347	07.50	3	0	3	1.50227	0:02:21	11.86%	49.85%	(0.98160)
	7/28	0.98160	0.46543	0.52048	0.15373	06.78	3	0	3	1.31865	0:02:11	11.86%	49.85%	(0.98160)
	7/29	0.98160	0.46560	0.52180	0.15329	08.08	2	0	2	1.55335	0:01:29	11.86%	49.85%	(0.98160)
	7/30	0.98160	0.46892	0.52253	0.15303	09.96	3	0	3	1.91417	0:02:14	11.86%	49.85%	(0.98160)
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+														
	Ger	Melhor	Pior	Média	Desv.Pad	Var.Gen.	Aval	Conv	Penal.	Dist.	Tempo			
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+														
	8/1	0.98160	0.00000	0.42809	0.22578	50.36	10	2	8	3.97576	0:03:29	11.86%	49.85%	(0.98160)
	8/2	0.98160	0.00000	0.41021	0.26070	42.42	8	2	6	3.34972	0:06:01	11.86%	49.85%	(0.98160)
	8/3	0.98160	0.45036	0.61336	0.21995	44.16	8	1	5	3.39647	0:05:49	11.86%	49.85%	(0.98160)
	8/4	0.98160	0.00000	0.65984	0.37546	34.05	7	3	2	2.84402	0:03:51	11.86%	49.85%	(0.98160)
	8/5	0.98160	0.46948	0.66450	0.22845	37.09	6	1	4	3.11339	0:04:18	11.86%	49.85%	(0.98160)
	8/6	0.98160	0.00000	0.51892	0.44424	20.63	8	5	1	1.79279	0:03:18	11.86%	49.85%	(0.98160)
	8/7	0.98160	0.00000	0.75193	0.31034	31.31	5	1	2	2.69877	0:03:31	11.86%	49.85%	(0.98160)
	8/8	0.98160	0.00000	0.79772	0.30011	33.04	5	2	1	2.76980	0:02:23	11.86%	49.85%	(0.98160)
	8/9	0.98160	0.00000	0.65987	0.37490	30.59	5	3	1	2.79546	0:01:53	11.86%	49.85%	(0.98160)
	8/10	0.98160	0.00000	0.70768	0.31309	32.18	6	2	3	2.82113	0:03:14	11.86%	49.85%	(0.98160)
	8/11	0.98160	0.93104	*0.93609	0.01517	38.96	2	0	1	3.24500	0:02:04	11.86%	49.85%	(0.98160)
	8/12	0.98160	0.00000	0.65910	0.37531	31.31	6	3	2	2.71018	0:02:20	11.86%	49.85%	(0.98160)
	8/13	0.98160	0.48073	0.89106	0.13761	37.23	2	0	1	3.17915	0:01:28	11.86%	49.85%	(0.98160)

	8/14	0.98160	0.00000	0.74991	0.37525	30.30	3	2	0	2.52389	0:00:53	11.86%	49.85%	(0.98160)
	8/15	0.98160	0.00000	0.74999	0.37529	30.30	5	3	0	2.62447	0:01:46	11.86%	49.85%	(0.98160)
	8/16	0.98160	0.47271	0.84424	0.18608	34.63	5	1	2	3.04238	0:03:12	11.86%	49.85%	(0.98160)
	8/17	0.98160	0.00000	0.61069	0.42276	25.25	6	3	1	2.33851	0:02:18	11.86%	49.85%	(0.98160)
	8/18	0.98160	0.00000	0.65660	0.43011	24.82	5	3	0	2.24313	0:01:32	11.86%	49.85%	(0.98160)
	8/19	0.98160	0.93054	*0.93680	0.01496	31.17	2	0	0	3.09016	0:01:54	11.86%	49.85%	(0.98160)
	8/20	0.98160	0.00000	0.75030	0.37544	22.80	4	2	0	2.57969	0:02:01	11.86%	49.85%	(0.98160)
	8/21	0.98160	0.93241	*0.93733	0.01476	27.27	2	1	0	3.01274	0:00:57	11.86%	49.85%	(0.98160)
	8/22	0.98160	0.00000	0.79780	0.29911	23.81	3	1	1	2.63795	0:01:25	11.86%	49.85%	(0.98160)
	8/23	0.98160	0.00000	0.61130	0.42355	19.34	6	4	1	2.36614	0:01:27	11.86%	49.85%	(0.98160)
	8/24	0.98160	0.00000	0.51832	0.44495	14.57	6	4	1	1.93450	0:01:27	11.86%	49.85%	(0.98160)
	8/25	0.98160	0.00000	0.84418	0.28177	24.24	3	2	0	2.67799	0:00:53	11.86%	49.85%	(0.98160)
	8/26	0.98160	0.00000	0.70488	0.37785	22.80	5	3	1	2.74835	0:01:21	11.86%	49.85%	(0.98160)
	8/27	0.98160	0.00000	0.70575	0.37835	21.21	5	3	1	2.46196	0:01:28	11.86%	49.85%	(0.98160)
	8/28	0.98160	0.00000	0.84396	0.28170	24.39	3	2	0	2.75736	0:00:57	11.86%	49.85%	(0.98160)
	8/29	0.98160	0.00000	0.75220	0.31019	23.09	5	2	2	2.59592	0:02:03	11.86%	49.85%	(0.98160)
	8/30	0.98160	0.48074	0.89086	0.13755	26.84	3	1	1	2.97270	0:01:27	11.86%	49.85%	(0.98160)
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+														
	Ger	Melhor	Pior	Média	Desv.Pad	Var.Gen.	Aval	Conv	Penal.	Dist.	Tempo			
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+														
	9/1	0.98160	0.00000	0.22117	0.31379	45.17	10	7	3	4.00599	0:01:27	11.86%	49.85%	(0.98160)
	9/2	0.98160	0.00000	0.27003	0.31254	33.91	10	6	4	3.21918	0:03:32	11.86%	49.85%	(0.98160)
	9/3	0.98160	0.00000	0.36060	0.28577	32.32	9	4	5	3.21018	0:04:29	11.86%	49.85%	(0.98160)
	9/4	0.98160	0.00000	0.46808	0.22021	29.73	6	2	4	3.16768	0:03:40	11.86%	49.85%	(0.98160)
	9/5	0.98160	0.00000	0.43022	0.26227	22.08	4	3	1	2.65782	0:00:54	11.86%	49.85%	(0.98160)
	9/6	0.98160	0.47503	0.52569	0.15197	22.08	2	1	1	2.97339	0:00:52	11.86%	49.85%	(0.98160)
	9/7	0.98160	0.00000	0.43067	0.26235	17.17	2	1	1	2.31264	0:00:53	11.86%	49.85%	(0.98160)
	9/8	0.98160	0.00000	0.38308	0.29138	16.31	3	2	1	2.20532	0:00:51	11.86%	49.85%	(0.98160)
	9/9	0.98160	0.00000	0.43073	0.26236	17.60	4	2	2	2.38787	0:01:58	11.86%	49.85%	(0.98160)
	9/10	0.98160	0.00000	0.47817	0.21958	19.34	3	1	2	2.63272	0:01:51	11.86%	49.85%	(0.98160)
	9/11	0.98160	0.00000	0.43060	0.26233	19.19	4	3	1	2.59927	0:00:54	11.86%	49.85%	(0.98160)
	9/12	0.98160	0.00000	0.43067	0.26234	18.18	3	2	1	2.55530	0:00:53	11.86%	49.85%	(0.98160)
	9/13	0.98160	0.00000	0.47810	0.21959	19.62	2	1	1	2.64301	0:00:52	11.86%	49.85%	(0.98160)
	9/14	0.98160	0.00000	0.43060	0.26233	17.46	3	2	1	2.39200	0:00:53	11.86%	49.85%	(0.98160)
	9/15	0.98160	0.47503	0.52569	0.15197	22.08	2	1	1	2.97339	0:00:59	11.86%	49.85%	(0.98160)
	9/16	0.98160	0.00000	0.28816	0.32182	12.55	4	3	1	1.78141	0:00:52	11.86%	49.85%	(0.98160)
	9/17	0.98160	0.00000	0.36792	0.29015	18.04	5	3	2	2.49023	0:01:34	11.86%	49.85%	(0.98160)

	9/18	0.98160	0.00000	0.43067	0.26234	17.17	2	1	1	2.31264	0:00:54	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	9/19	0.98160	0.00000	0.47799	0.21959	20.20	3	2	1	2.80367	0:00:54	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	9/20	0.98160	0.00000	0.43060	0.26233	17.17	3	2	1	2.31264	0:00:52	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	9/21	0.98160	0.00000	0.47819	0.21958	19.62	3	2	1	2.64301	0:00:51	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	9/22	0.98160	0.00000	0.43057	0.26233	17.60	3	2	1	2.39448	0:00:52	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	9/23	0.98160	0.47494	0.61549	0.21516	20.35	5	1	2	2.94043	0:03:53	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	9/24	0.98160	0.00000	0.47870	0.21958	18.04	5	1	4	2.61076	0:03:36	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	9/25	0.98160	0.00000	0.38339	0.29148	12.70	4	1	3	1.93043	0:02:03	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	9/26	0.98160	0.32919	0.46738	0.18469	18.76	3	1	2	2.88074	0:01:40	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	9/27	0.98160	0.00000	0.47826	0.21958	16.45	3	2	1	2.58542	0:00:49	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	9/28	0.98160	0.00000	0.36220	0.22872	16.16	2	1	1	2.56062	0:01:08	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	9/29	0.98160	0.00000	0.36286	0.22863	16.16	2	1	1	2.56062	0:00:54	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	9/30	0.98160	0.47514	0.52579	0.15194	18.18	2	1	1	2.88070	0:00:51	11.86%	49.85%	(0.98160)								
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+																						
	Ger		Melhor		Pior		Média		Desv.Pad		Var.Gen.		Aval		Conv		Penal.		Dist.		Tempo	
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+																						
	10/1	0.98160	0.00000	0.09816	0.29448	49.06	10	10	0	3.60549	0:00:00	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	10/2	0.98160	0.00000	0.09816	0.29448	24.82	7	7	0	1.73147	0:00:00	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	10/3	0.98160	0.00000	0.09816	0.29448	18.47	4	4	0	1.46912	0:00:00	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	10/4	0.98160	0.00000	0.09816	0.29448	12.70	4	4	0	1.07721	0:00:00	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	10/5	0.98160	0.00000	0.09816	0.29448	20.63	6	6	0	1.68365	0:00:00	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	10/6	0.98160	0.00000	0.09816	0.29448	13.71	7	7	0	1.08084	0:00:00	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	10/7	0.98160	0.00000	0.09816	0.29448	11.11	5	5	0	1.00954	0:00:00	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	10/8	0.98160	0.00000	0.09816	0.29448	08.23	2	2	0	0.66767	0:00:00	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	10/9	0.98160	0.00000	0.09816	0.29448	08.80	6	6	0	0.81531	0:00:00	11.86%	49.85%	(0.98160)								
	10/10	0.98160	0.00000	0.09816	0.29448	04.33	3	3	0	0.43999	0:00:00	11.86%	49.85%	(0.98160)								

Dados da Evolução da População:

Resumo do Micro GA

Tempo total de simulação : 10:14:14

Número total de avaliações da função: 1085

Número total de indivíduos com falha de convergência: 186

Ger2	Melhor	Média	NumAval
1	0.49317724	*0.4931772	38
2	0.98160315	0.73739020	50
3	0.98160315	0.81879451	137
4	0.98160315	0.85949667	165
5	0.98160315	0.88391797	177
6	0.98160315	0.90019883	102
7	0.98160315	0.91182802	97
8	0.98160315	0.92054991	149
9	0.98160315	0.92733361	116
10	0.98160315	*0.9327605	54

Eficiência:

Ganho %	NumAval	Efic.
102.04	1085	0.09405