

APLICAÇÃO DO MÉTODO DO ENXAME DE PARTÍCULAS NA OTIMIZAÇÃO
DE SISTEMAS DE ANCORAGEM DE UNIDADES FLUTUANTES PARA
EXPLOTAÇÃO DE PETRÓLEO OFFSHORE

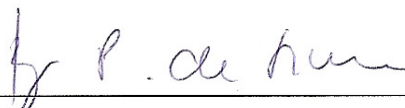
Bruno da Fonseca Monteiro

DISSERTAÇÃO 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 MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:



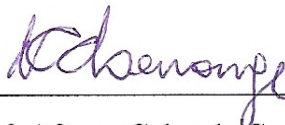
Prof. Breno Pinheiro Jacob, D.Sc.



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



Prof. Carl Horst Albrecht, D.Sc.



Prof. Afonso Celso de Castro Lemonge, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JUNHO DE 2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

MONTEIRO, BRUNO DA FONSECA

Aplicação do Método do Enxame de Partículas na Otimização de Sistemas de Ancoragem de Unidades Flutuantes para Exploração de Petróleo Offshore [Rio de Janeiro] 2008

IX, 119 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 2008)

Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Sistemas *Offshore*
2. Sistemas de ancoragem
3. Otimização

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

*Aos meus pais, Milton e Laudelina,
à minha esposa Tatiana,
ao meu irmão Victor
e aos meus familiares e amigos.*

AGRADECIMENTOS

A Deus acima de tudo e de todos pelo dom da vida, e a sempre Virgem Maria pelo amor e amparo constante.

À Tatiana pelo amor, dedicação e apoio incondicional em todos os momentos.

Aos meus pais Milton e Laudelina e ao meu irmão Victor que sempre me incentivaram nos estudos e comemoraram cada vitória.

Ao meu orientador o Prof. Breno Pinheiro Jacob pelo incentivo e apoio durante a realização deste trabalho.

Ao Prof. Carl Horst Albrecht por todo o apoio e ajuda ao longo de toda a pesquisa sem os quais este trabalho não seria possível.

Aos amigos da DPB (Divisão de Programas e Bolsas) e de toda a PR2 pelo apoio.

A todos os meus amigos que constituem tesouros de verdade.

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

APLICAÇÃO DO MÉTODO DO ENXAME DE PARTÍCULAS NA OTIMIZAÇÃO
DE SISTEMAS DE ANCORAGEM DE UNIDADES FLUTUANTES PARA
EXPLOTAÇÃO DE PETRÓLEO OFFSHORE

Bruno da Fonseca Monteiro

Junho/2008

Orientador: Breno Pinheiro Jacob

Programa: Engenharia Civil

O aumento da demanda de petróleo faz com que a exploração de novas reservas avancem para águas cada vez mais profundas, o que torna os sistemas flutuantes de produção de petróleo *offshore* cada vez mais complexos e críticos. O tempo para o desenvolvimento de projetos para estes sistemas é sempre exíguo, gerando assim uma necessidade de ferramentas computacionais para simulação, análise, síntese e otimização que possam contribuir para tornar o projeto viável e eficiente.

Dessa forma, buscou-se neste trabalho apresentar o desenvolvimento de uma ferramenta de otimização de sistema de ancoragem de plataformas flutuantes através do método do Enxame de Partículas (PSO), obedecendo aos preceitos de segurança estabelecidos pelas normas.

Os modelos numéricos implementados no programa de análise acoplada SITUA/Prosim são utilizados no contexto da ferramenta de otimização. Apresentam-se resultados da otimização de sistemas típicos, para ilustrar a aplicação da ferramenta utilizada.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

APPLICATION OF THE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION METHOD ON THE
OPTIMIZATION OF MOORING SYSTEMS FOR FLOATING UNITS FOR
OFFSHORE OIL EXPLOTATION

Bruno da Fonseca Monteiro

June/2008

Advisor: Breno Pinheiro Jacob

Department: Civil Engineering

The increase of the oil demand has been motivating exploration activities in deeper waters. In such scenarios, the design of floating systems for offshore oil exploitation is more complex and critical. Resources for the development of such systems are always scarce, thus generating a need for computational tools that can contribute for feasible and efficient design.

Therefore, this work presents the development of an optimization tool for mooring systems for floating platforms, employing the Particle Swarm Optimization (PSO) method, and following security criteria established by the design rules..

The numerical models implemented in the SITUA/Prosim coupled analysis program are employed in the context of the optimization tool. Results of typical systems are presented, in order to illustrate the application of the tool.

Índice

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	HISTÓRICO / CONTEXTO.....	1
1.2	OBJETIVOS.....	4
1.3	METODOLOGIA	5
1.4	ESTRUTURAÇÃO Do TEXTO	6
2	SISTEMAS FLUTUANTES DE EXPLORAÇÃO <i>OFFSHORE</i>	7
2.1	INTRODUÇÃO	7
2.2	CASCO.....	8
2.2.1	Semi-submersível	8
2.2.2	Plataforma de Pernas Tensionadas.....	9
2.2.3	Spar.....	10
2.2.4	Navios.....	11
2.3	RISERS.....	13
2.4	LINHAS DE ANCORAGEM.....	15
2.4.1	Introdução	15
2.4.2	Ancoragem convencional.....	15
2.4.3	Ancoragem em Taut-Leg	16
2.4.4	Ancoragem Vertical.....	17
2.4.5	Complacência Diferenciada (DICAS).....	18
2.4.6	Posicionamento Dinâmico.....	18
2.4.7	Âncoras.....	19
2.4.8	Amarras	21
2.4.9	Cabos de aço	21
2.4.10	Cabos de Poliéster.....	22
3	METODOLOGIAS DE ANÁLISE E PROJETO DE SISTEMAS DE ANCORAGEM	23
3.1	INTRODUÇÃO	23
3.2	CONDIÇÕES AMBIENTAIS PARA PROJETO.....	24

3.3	SITUAÇÕES A SEREM ANALISADAS	25
3.4	FORMULAÇÕES PARA ANÁLISE DINÂMICA DE UNIDADES FLUTUANTES ANCORADAS	27
3.4.1	Introdução	27
3.4.2	Formulações Desacopladas	27
3.4.3	Formulações Acopladas.....	29
3.5	A FORMULAÇÃO ACOPLADA DO PROGRAMA PROSIM	31
3.5.1	Carregamentos Ambientais; Modelos Hidrodinâmicos	32
3.5.2	Equações de Movimento do Casco: Solução.....	35
3.5.3	Esquema de Acoplamento Casco – Linhas	35
3.5.4	Equação de movimento das linhas.....	36
4	CONCEITOS GERAIS SOBRE OTIMIZAÇÃO	42
4.1	INTRODUÇÃO	42
4.2	TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO	44
4.2.1	Programação Matemática.....	45
4.2.2	Técnicas de Busca Global	48
4.3	ALGORITMOS GENÉTICOS	51
5	OTIMIZAÇÃO PELO MÉTODO DO ENXAME DE PARTÍCULAS (PSO)	54
5.1	HISTÓRICO.....	54
5.2	ALGORITMO BÁSICO	55
5.3	ATRAÇÃO SOCIAL	58
5.4	VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS.....	59
6	APLICAÇÕES: DESCRIÇÃO DOS MODELOS E MOTODOLOGIA	61
6.1	INTRODUÇÃO	61
6.2	SISTEMA ACOPLADO ANCORAGEM-RISER-CASCO – SITUA/PROSIM.....	61
6.2.1	Modelagem da Unidade Flutuante	61
6.2.2	Linhas	62

6.2.3	Dados Ambientais	62
6.2.4	Diagrama de <i>Offset</i>	63
6.3	MODELOS ESTUDADOS	65
6.3.1	Modelo 1 – P1	65
6.3.2	Modelo 2 – P2	68
6.3.3	Modelo 3 – P3	70
6.4	DADOS AMBIENTAIS COMUNS A TODOS OS MODELOS	72
6.5	METODOLOGIA DE OTIMIZAÇÃO	73
6.5.1	Algoritmo de Otimização – O ProgOtim.....	75
7	APLICAÇÕES: RESULTADOS OBTIDOS.....	79
7.1	INTRODUÇÃO	79
7.2	MODELO P1.....	80
7.3	MODELO P2.....	87
7.4	MODELO P3.....	96
8	CONCLUSÕES.....	101
8.1	COMENTÁRIOS FINAIS.....	101
8.2	PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	103
9	REFERÊNCIAS.....	104
	APÊNDICE A EQUAÇÕES DE MOVIMENTO DO CASCO DA UNIDADE FLUTUANTE	111
A.1	SISTEMA DE COORDENADAS.....	111
A.2	EQUAÇÕES DE MOVIMENTO DO CASCO: FORMULAÇÃO	113

1 INTRODUÇÃO

1.1 HISTÓRICO / CONTEXTO

A exploração petrolífera no Brasil em reservatórios situados na área *offshore* teve início em 1968, na Bacia de Sergipe, campo de Guaricema, situado em lâmina d'água de cerca de 30 metros na costa do estado de Sergipe, na região Nordeste e limitando-se a esta região até o ano de 1977 e com lâminas d'água de até 50 metros, utilizando plataformas fixas denominadas jaquetas.

A primeira descoberta de petróleo na Bacia de Campos, localizada na parte marítima do estado do Rio de Janeiro, na região Sudeste do país e atualmente a principal província petrolífera do Brasil, aconteceu em 1974. Ainda assim, sua exploração deu-se apenas a partir de 1977 na segunda descoberta, com o campo de Enchova, em lâmina d'água de 120 metros.

A partir de 1984, a Bacia de Campos começou a mostrar seu completo potencial, com a descoberta de campos gigantes em águas profundas que, na época, variavam de 300 a mais de 1.000 metros de lâmina d'água. O que também trouxe grandes desafios, pois para explorar petróleo nestas profundidades as plataformas fixas deveriam apresentar grande rigidez tornando-se demasiadamente caras e tornando-se assim inviáveis. A solução foi o emprego de plataformas flutuantes e ancoradas.

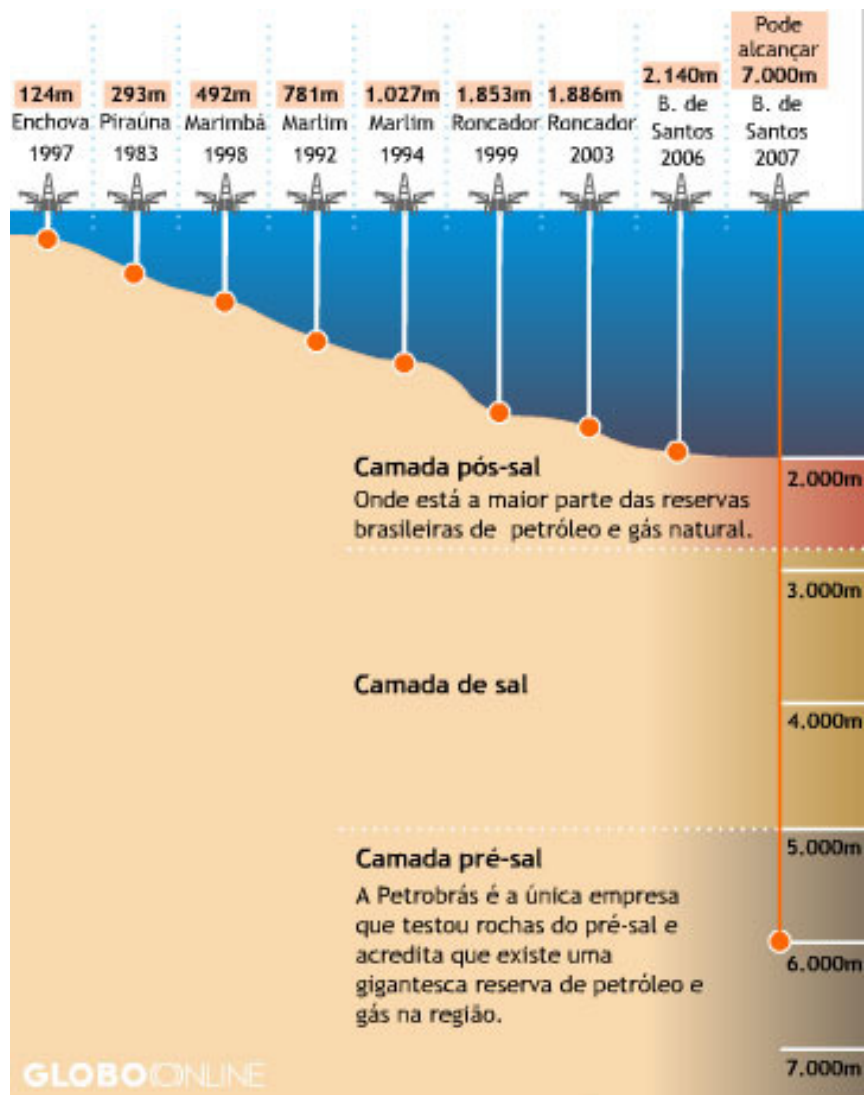


Figura 1 Evolução da exploração em águas profundas.

Em 1997, o Brasil, através da Petrobras, ingressou no seleto grupo de 16 países que produz mais de 1 milhão de barris de óleo por dia e no dia 21 de abril de 2006, às 14h30min, o Presidente Luiz Inácio Lula da Silva deu início à produção da plataforma P-50, no Campo de Albacora Leste (Figura 2), na Bacia de Campos, que permitiu ao Brasil atingir a auto-suficiência sustentável em petróleo.

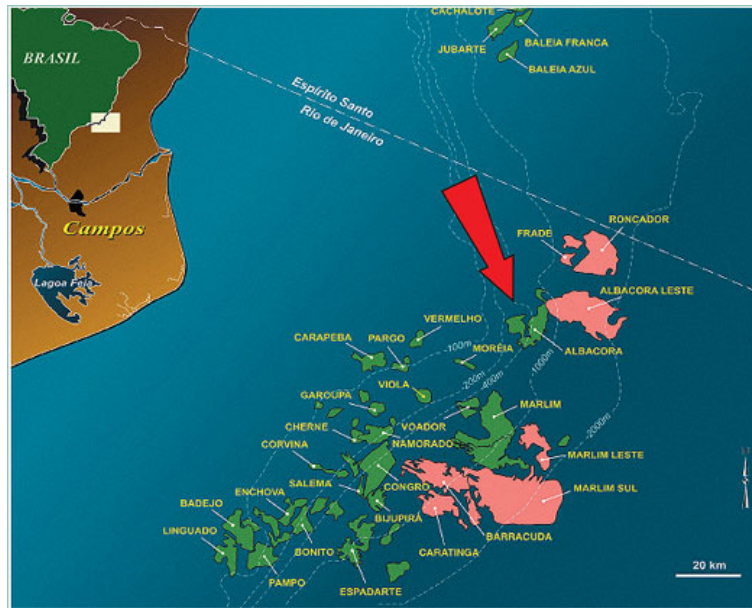


Figura 2. Campo de Albacora Leste, na Bacia de Campos.

Alcançar esta auto-suficiência significa reduzir a vulnerabilidade do País às flutuações internacionais do mercado de petróleo e gastos em importação, além da geração de emprego e renda no país.

Em 2007 foi descoberto pela Petrobrás o campo de Tupi, na bacia de Santos, cujas reservas são de 5 a 8 bilhões de barris de petróleo de qualidade e gás natural e é o maior descoberto no Brasil até então e pode aumentar as reservas de petróleo e gás da companhia de 40% a 60% onde a lâmina d'água pode atingir os 3000 m.

1.2 OBJETIVOS

Como visto anteriormente a exploração de petróleo avança para águas cada vez mais profundas, o que traz grandes desafios em várias etapas de projeto e pesquisa como no desenvolvimento de materiais que suportem elevadas pressões no fundo do oceano e como restringir o passeio de uma plataforma flutuante ancorada, por exemplo.

Neste contexto, o presente trabalho busca estudar a aplicação de uma ferramenta computacional para otimização de sistemas de ancoragem, através do método do Enxame de Partículas (PSO), tomando os raios de ancoragem e azimutes das linhas como variáveis de projeto, de modo a procurar maior eficiência em termos do passeio da embarcação e das trações nas linhas.

Uma ferramenta de otimização procura conceder ao projetista mais opções de sistemas de ancoragem, procurando determinar um projeto ótimo com redução dos custos globais associado a menores passeios mínimo da plataforma e manutenção da tração das linhas em valores adequados.

1.3 METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos, tomou-se como ponto de partida o programa ProgOtim [ALBRECHT, 2005] – um programa de otimização de ancoragem, *risers* e canhoneio em permanente atualização. De acordo com os resultados apresentados em [ALBRECHT, 2005], onde foram apresentados estudo comparativos entre diferentes métodos de otimização incluindo o Algoritmo Genético clássico, o Micro Algoritmo Genético e o Método do Enxame de Partículas (PSO), optou-se por este último para a otimização de sistemas de ancoragem no desenvolvimento desta pesquisa.

Foram incorporadas melhorias e novos recursos no ProgOtim, incluindo a possibilidade de agrupar os valores determinados para os raios de ancoragem, para todas as linhas de um mesmo corner, e tomando uma variação constante nos azimutes das linhas.

Para a modelagem e análise das configurações de sistemas de ancoragem, incluindo a geração de diagrama de *offset* dos modelos estudados, utilizou-se o programa de análise acoplada SITUA-PROSIM desenvolvido em cooperação entre a Petrobrás e o LAMCSO - Laboratório de Métodos Computacionais e Sistemas *Offshore*/PEC/COPPE/UFRJ.

Foi utilizado um computador com processador Intel Pentium D 3Ghz e 1Gb de RAM para a execução da otimização.

1.4 ESTRUTURAÇÃO DO TEXTO

O texto restante deste trabalho está dividido em capítulos, estruturados na seqüência apresentada a seguir.

O capítulo 2 trata de dos Sistemas Flutuantes de exploração e exploração *offshore*, como os tipos de plataforma, *risers* e linhas de ancoragem.

O capítulo 3 apresenta as metodologias de análise e projeto de sistemas de ancoragem, as condições de projeto e carregamentos ambientais (onda, vento e correnteza), as situações que devem ser analisadas, as formulações de análise a partir da mais tradicional baseada em modelos desacoplados e definindo a abordagem mais recente baseada em modelos acoplados.

No capítulo 4 são descritos os conceitos gerais sobre otimização e as técnicas mais comuns como a programação matemática e de busca global.

O capítulo 5 descreve os métodos de otimização evolutiva, trazendo os conceitos gerais e apresentando os algoritmos genéticos. Mostra mais detalhadamente o método Enxame de Partículas (PSO) por fazer parte diretamente do escopo deste trabalho.

No capítulo 6 encontram-se as descrições dos modelos e os estudos das aplicações realizadas bem como uma apresentação do ProgOtim, programa utilizado na otimização dos sistemas de ancoragem.

O capítulo 7 apresenta os resultados obtidos para os modelos estudados.

Por fim, o capítulo 8 traz as conclusões das aplicações feitas e as sugestões de trabalhos futuros.

2 SISTEMAS FLUTUANTES DE EXPLORAÇÃO *OFFSHORE*

2.1 INTRODUÇÃO

Os sistemas *offshore* são compostos basicamente pelo casco, pelas linhas, pelos equipamentos submarinos e pelos poços.

Destes quatro grupos citados veremos mais detalhadamente o casco e as linhas por serem de vital importância para o desenvolvimento deste trabalho.

Não serão detalhados aqui os equipamentos submarinos como árvore de natal molhada, dutos, válvulas, etc. nem mesmo equipamentos de perfuração e completação dos poços, por não se tratarem de objetos fundamentais para a realização do trabalho.

As linhas, que são estruturas esbeltas em relação ao comprimento, podem ser ancoragem, *risers*, cabos elétricos e umbilicais. Trataremos aqui da ancoragem, por ser o centro desta pesquisa e os *risers* por se tratarem de componentes importantes na configuração, análise e custo de todo o sistema.

2.2 CASCO

O casco refere-se ao tipo de plataforma de exploração de petróleo *offshore* e pode ser classificado em semi-submersível, navio, perna atirantada (TLP- “Tension Leg Plataform”) e Spar. Foram desenvolvidos para exploração de petróleo em águas profundas, a partir de 200m, onde as plataformas fixas não são apropriadas.

2.2.1 Semi-submersível

Este tipo de plataforma pode ser usado na produção ou perfuração *offshore* (figura 3). Consiste de flutuadores, denominados *pontoons*, compartimentados em tanques com finalidades de oferecer lastro e flutuação à plataforma. Sobre estes flutuadores se apóiam as colunas que por sua vez sustentam os conveses. Ela pode manter-se estacionária, através de propulsores acionados por um sistema computadorizado, denominado de posicionamento dinâmico, que é normalmente usado durante a fase de perfuração ou completação ou por linhas de ancoragem que serão explicitadas no próximo capítulo.



Figura 3. Plataforma semi-submersível de perfuração *offshore*.

Estas plataformas necessitam do auxílio de embarcações para serem transportadas para o local de instalação (figura 4).



Figura 4. Plataforma semi-submersível sendo transportada para o local de instalação.

2.2.2 Plataforma de Pernas Tensionadas

Uma plataforma TLP (*Tension Leg Platform*), figura 5, é uma estrutura flutuante, semelhante à plataforma semi-submersível, cujo casco possui excesso de flutuação, que é compensado por tendões verticais tensionados conectados a um sistema de fundação e tracionados no topo pela força resultante entre peso e empuxo (restauração hidrostática).

A TLP por possuir movimentos bem restringidos possibilita que a completção dos poços seja do tipo “seca” com a árvore de natal na plataforma facilitando assim o controle e a intervenção nos poços, reduzindo os custos de instalação e produção.

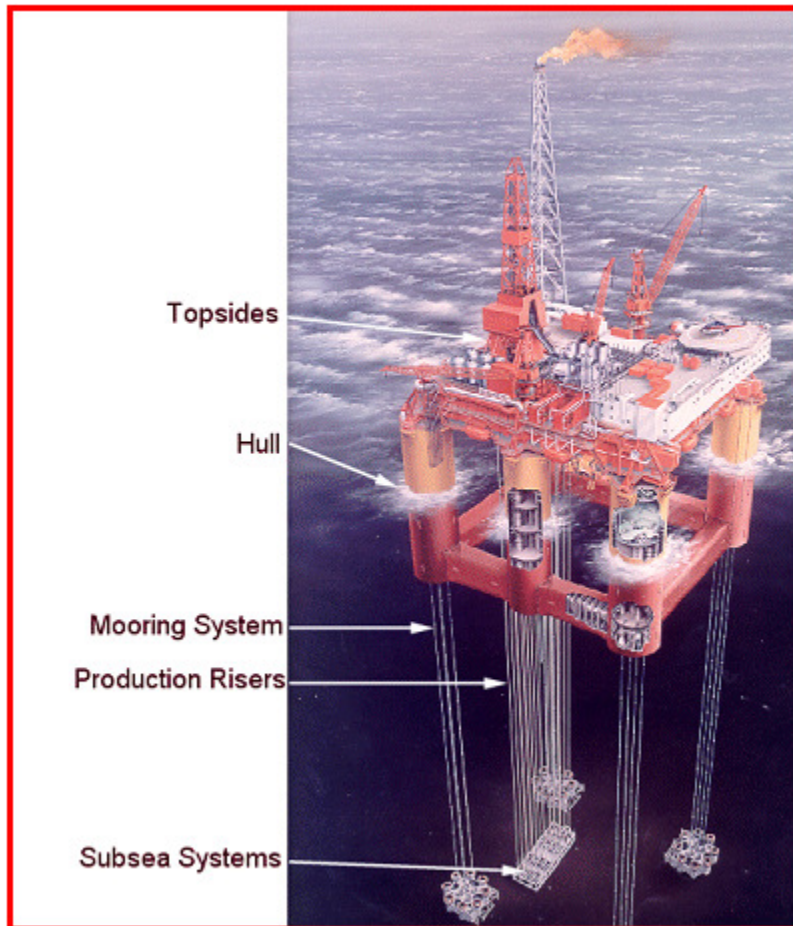


Figura 5 – Plataforma de Pernas Tensionadas - TLP

2.2.3 Spar

A plataforma do tipo Spar é formada de um único cilindro de aço de grande diâmetro, ancorado, com conveses instalados no topo. Seu calado é constante e contém cerca de 200 m gerando pequenos movimentos verticais e possibilitando a utilização de *risers* rígidos de produção. Utilizam-se também supressores de vórtices neste cilindro a fim de que se possa inibir as vibrações induzidas pelo fenômeno de *vortex shedding* ocasionado principalmente pela ação das correntes marinhas.



Figura 6 – Plataforma do tipo Spar

2.2.4 Navios

Os navios eram usados inicialmente para as operações de perfuração e/ou completção, denominados navios sonda, figura 7.



Figura 7 – Vista Geral de um Navio Sonda

Posteriormente os navios foram adaptados a extrair, armazenar e exportar petróleo, através da conversão de navios petroleiros ou graneleiros em Unidade de

Produção, Armazenamento e Alívio de Petróleo, ou sua sigla em inglês FPSO (“Floating Production Storage and Offloading”), figura 8.



Figura 8 – Vista Geral de uma Unidade FPSO

2.3 RISERS

Risers são estruturas tubulares utilizadas na indústria do petróleo que conectam o poço a unidade flutuante, cuja principal função é transportar os fluidos provenientes do poço até a plataforma ou vice-versa, como no caso de um poço injetor. Estes podem ser flexíveis, formados por camadas alternadas de plástico e aço, ou rígidos, constituídos de aço.

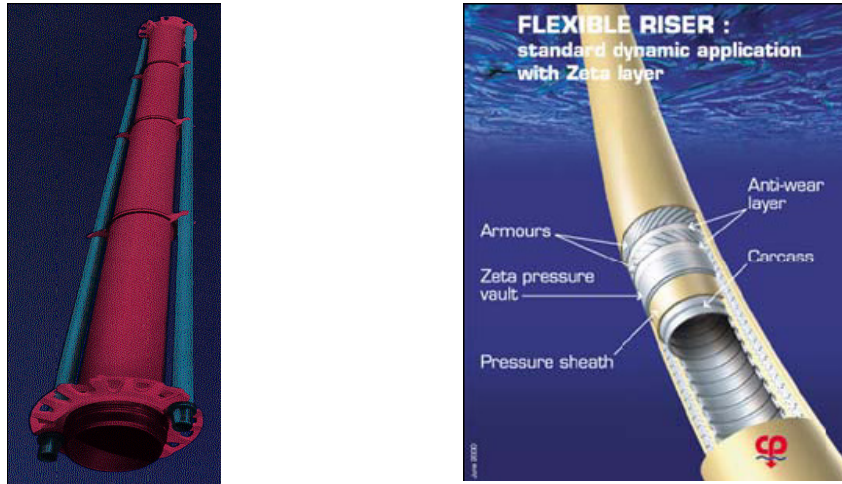


Figura 9 – *Riser* rígido de perfuração / *Riser* flexível de produção

Os *risers* flexíveis podem assumir diferentes configurações em catenária como mostra a figura 10.

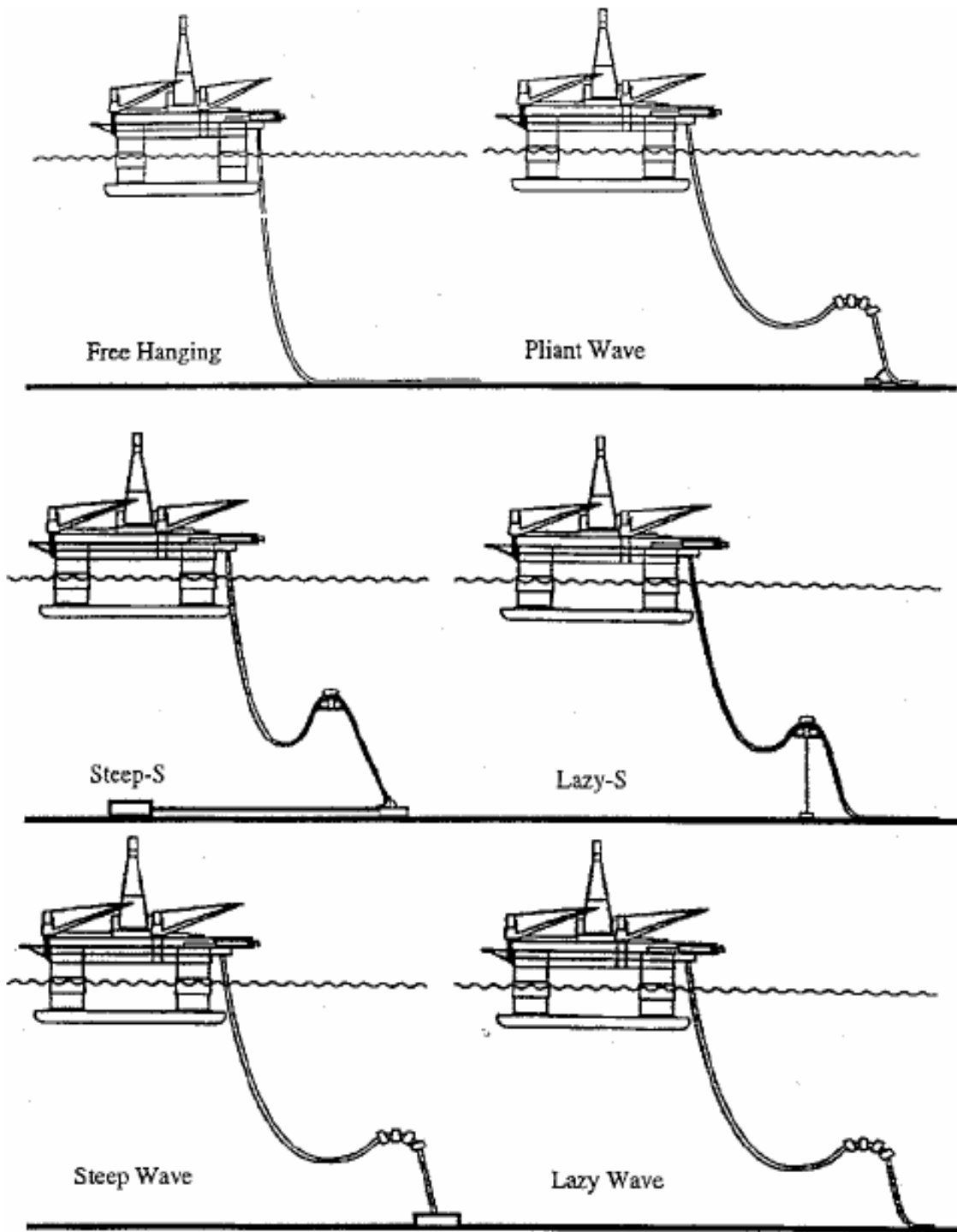


Figura 10 – Configurações de *risers* flexíveis.

2.4 LINHAS DE ANCORAGEM

2.4.1 Introdução

As linhas de ancoragem têm como função conectar a unidade flutuante ao fundo do mar para que ela possa permanecer fixa numa mesma locação. Para oferecer a força de restauração necessária são dispostas em catenária (ancoragem convencional) ou utilizadas como linhas retesadas (*taut-leg*) ou tendões.

O sistema de ancoragem confere à unidade flutuante a capacidade de conservar sua posição no mar e, conseqüentemente, é de fundamental importância nas características operacionais e de segurança [API, 1997].

Os navios e semi-submersíveis podem ser ancorados pelas suas extremidades. No caso do navio, a ancoragem pode ser central, o que permite que o corpo flutuante se oriente em relação à força ambiental predominante [American Bureau of Shipping, 1996].

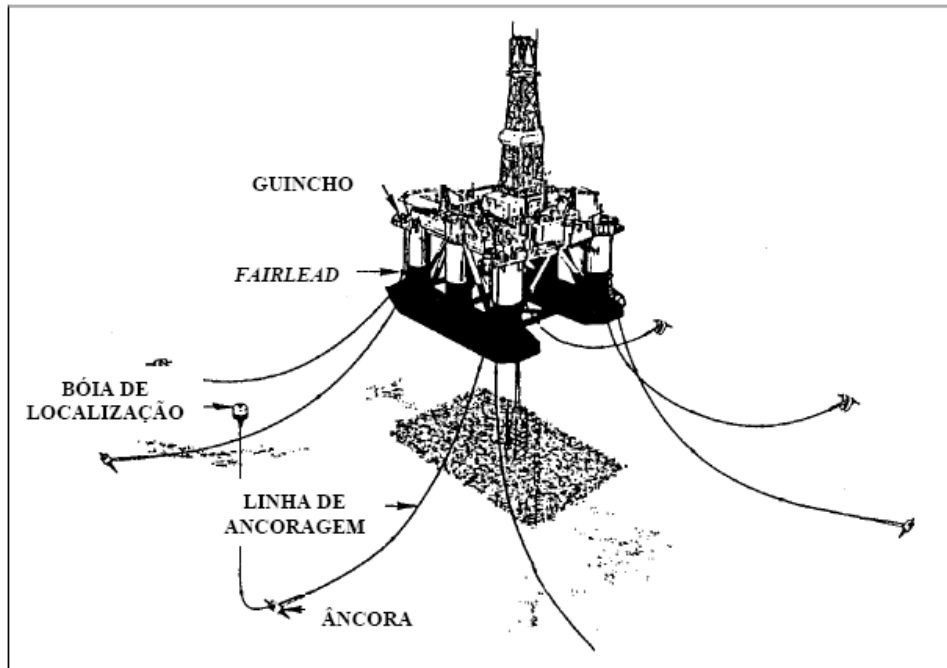
Os materiais mais utilizados nas linhas de ancoragem são as amarras de aço, os cabos de aço e mais recentemente os cabos de poliéster [ROSSI et al., 2001].

2.4.2 Ancoragem convencional

Denomina-se ancoragem convencional aquela composta por linhas em catenária, figura 11, e é utilizada em operações de produção ou perfuração. Este tipo de ancoragem utiliza a força de restauração das linhas para manter a unidade flutuante estacionária. Esta força de restauração está relacionada com vários parâmetros, um deles é o raio de ancoragem, um dos principais problemas deste tipo de ancoragem.

O raio de ancoragem deve ser razoavelmente grande para atender os critérios de projeto para passeio das unidades flutuantes ancoradas (10% da lâmina d'água). Naturalmente em um campo de exploração de petróleo isto gera um congestionamento de linhas de unidades próximas, interferindo diretamente no posicionamento das mesmas, juntamente com equipamentos submarinos.

As linhas ancoradas são presas ao fundo do mar por âncoras de resistência horizontal.



Fonte : [API,2001]

Figura 11 – Ancoragem convencional

2.4.3 Ancoragem em Taut-Leg

Com o objetivo de contornar as desvantagens do sistema em catenária pode-se adotar a ancoragem em *taut-leg* [DEL VECCHIO, 1995], figura 12, que consiste em linhas mais retasadas com um ângulo de topo de aproximadamente 45° com a vertical. Dentre seus maiores benefícios temos uma projeção horizontal menor, com a mesma ordem de grandeza da lâmina d'água e uma maior rigidez do sistema, sendo o passeio da embarcação limitado a offsets menores (distâncias menores).

Em contrapartida, o uso do sistema *taut-leg* exige âncoras que suportem esforço vertical. Sendo, dessa forma, utilizadas âncoras de sucção, VLA (âncoras com resistência vertical) ou estacas de fundeio.

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

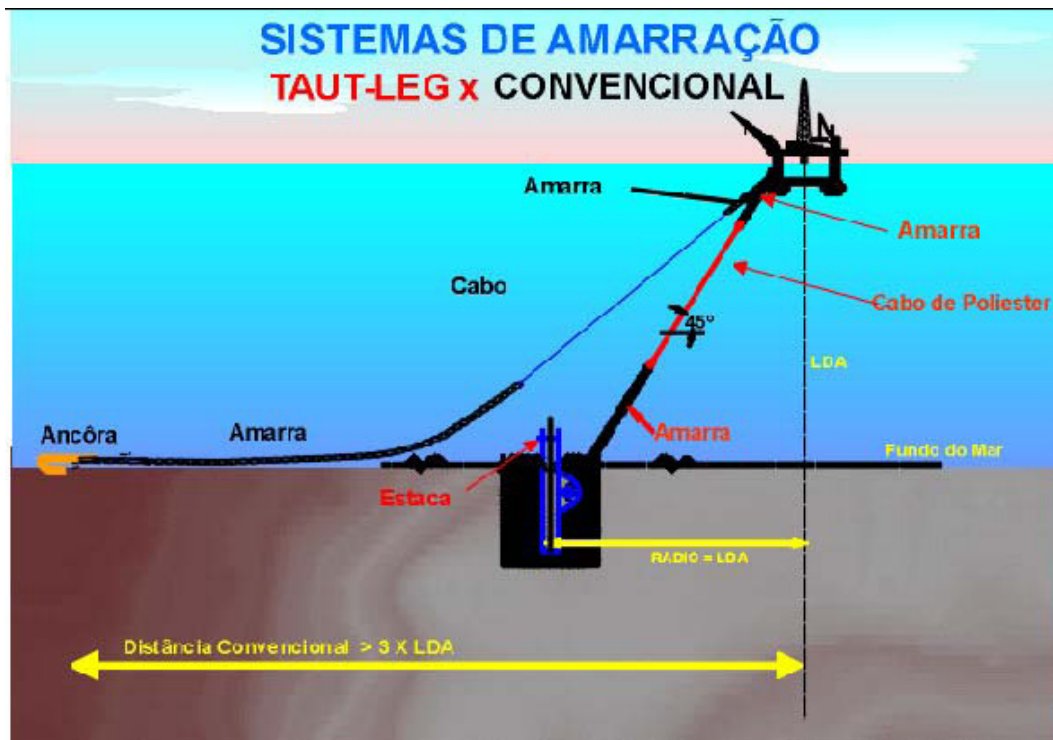


Figura 12 – Sistema de ancoragem *Taut-Leg* x Convencional

2.4.4 Ancoragem Vertical

Este tipo de ancoragem baseia-se na utilização de tendões verticais, que podem ser de cabo de aço ou material sintético, permanecendo constantemente tracionadas proporcionando alta rigidez no plano vertical e baixa rigidez no plano horizontal.

Este tipo de ancoragem é usado principalmente em plataformas tipo TLP (*Tension Leg Platform*), mas também pode ser adotada por bóias, monobóias, entre outras desde que proporcionem um excesso de flutuabilidade capaz de manter os tendões permanentemente tracionados.

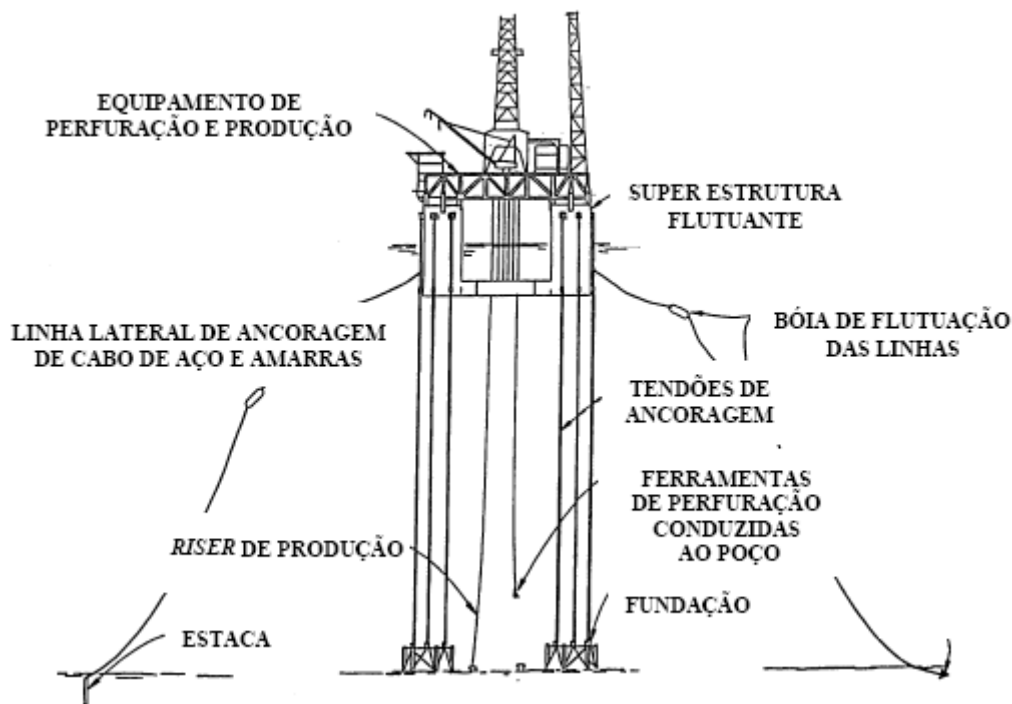


Figura 13 – Ancoragem vertical – TLP

2.4.5 Complacência Diferenciada (DICAS)

A Petrobras desenvolveu um novo tipo de ancoragem [GARZA-RIOS et al., 1997], [MASSETTI, 1997], denotado DICAS (*Differentiated Compliance Anchoring System*), consistindo num sistema de linhas de ancoragens com ligações na proa e popa do navio.

As linhas de popa oferecem uma resistência menor aos movimentos da unidade flutuante, permitindo que a mesma se alinhe com as características ambientais.

2.4.6 Posicionamento Dinâmico

Entende-se por posicionamento dinâmico (figura 14) um sistema que controla automaticamente a posição e aproamento de uma embarcação por meio de propulsão ativa [BRAY, 1998], [FOSSEN, 1994]. A característica fundamental do Posicionamento Dinâmico – DP é a integração de um grande número de subsistemas operando conjuntamente [TANNURI, 2001]. Na ocorrência de falha de qualquer um deles, o sistema todo é comprometido, o que implica a perda de posição e aproamento por parte da embarcação. Por este motivo pode-se fazer necessária a utilização de âncoras de

segurança. Este tipo de ancoragem é utilizado em atividades de perfuração e intervenção em poços de petróleo.

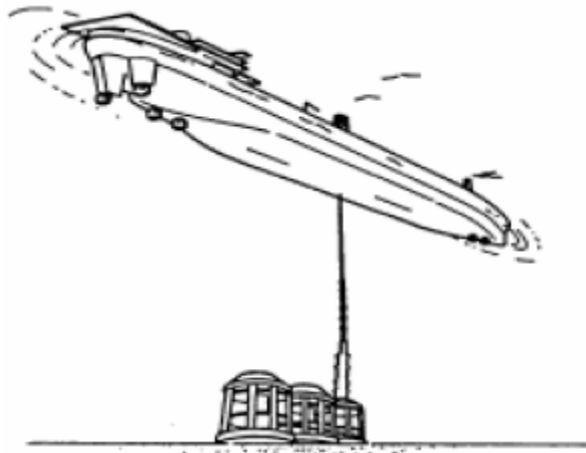


Figura 14 – Sistema de Ancoragem DP.

2.4.7 Âncoras

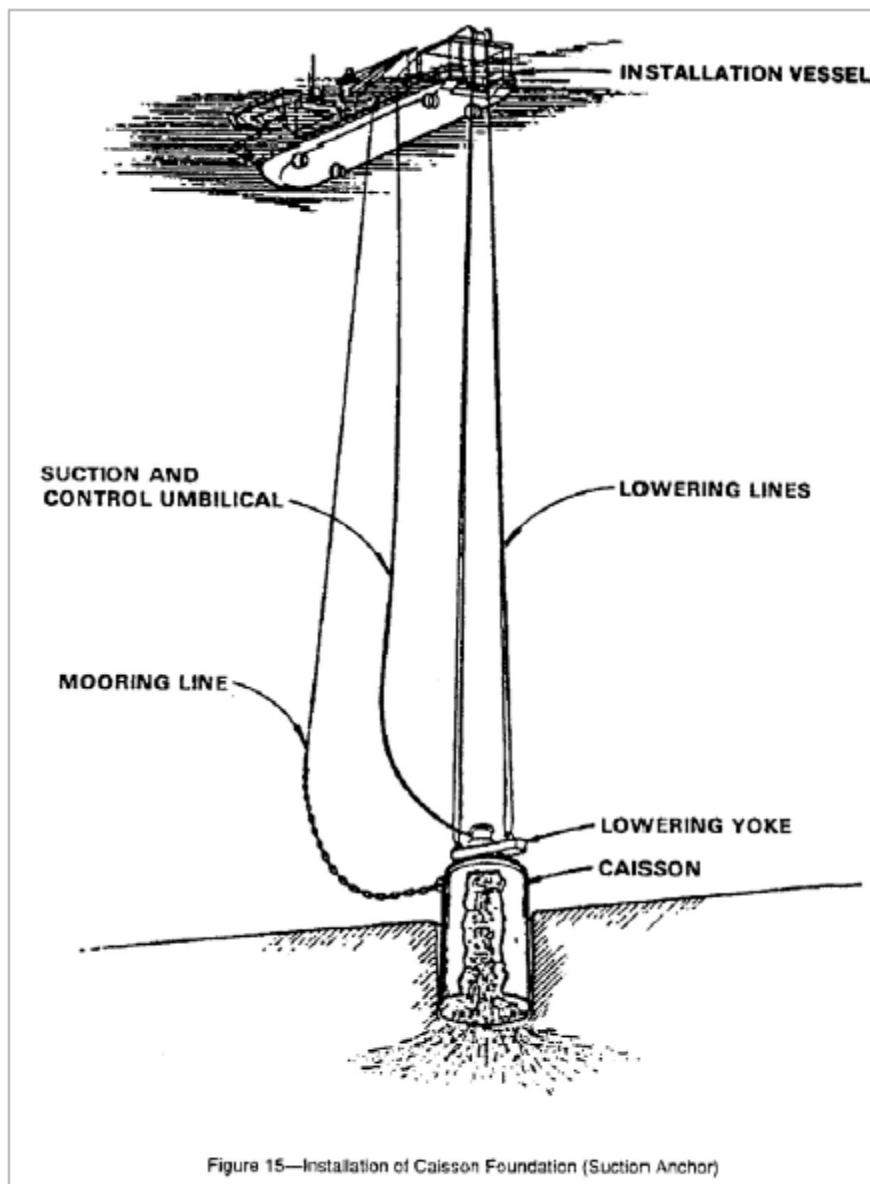
A âncora é o elemento responsável pela fixação do ponto de ancoragem onde é presa a linha de ancoragem para manter estacionária a unidade flutuante.

Na ancoragem tradicional, em catenária, a âncora deve resistir apenas às cargas horizontais onde o mais comum é utilização de âncoras de arraste que são fáceis de instalar, porém necessitam de um longo trecho de linha apoiado no fundo para garantir exatamente que não sofrerão cargas verticais.

Na ancoragem com linhas retesadas a âncora deverá suportar cargas verticais de grande magnitude. Para este fim podem ser usadas as âncoras VLA (“Vertically Loaded Anchors”) ou estaca.

As estacas mais utilizadas são:

- Estacas de sucção possuem grande diâmetro e pequeno comprimento [COLLIAT, 2002] sendo fechadas no topo. Para fixá-la no fundo do mar basta retirar água do seu interior e então se cria uma diferença de pressão que faz com que ela se entere.



Fonte: [API, 2001]

Figura 15 – Estaca de Sucção

- Estacas tradicionais, de grande comprimento e de pequeno diâmetro são instaladas com martelo hidráulico submarino.
- Estacas torpedo possuem grande comprimento e pequeno diâmetro, são lançadas por gravidade de uma determinada profundidade (~100m) como se fosse um torpedo sem explosivos [MEDEIROS, 2002], [COLLIAT, 2002] e a própria energia da queda faz com que a estaca atinja a penetração necessária no solo.

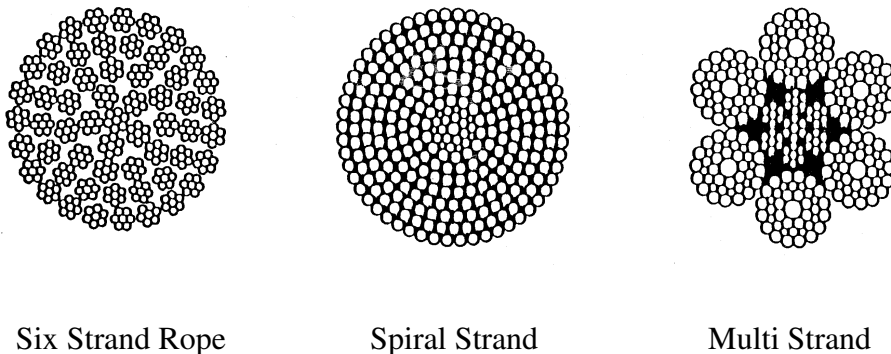
Um estudo mais detalhado sobre âncoras pode ser encontrado em [ELTAHER et al., 2003].

2.4.8 Amarras

Segundo [ALBRECHT, 2005], o tipo mais utilizado de amarra aplicado na ancoragem de unidades flutuantes são as que possuem elos com malhete. O elo Kenter é o mais utilizado para unir dois tipos de corrente dentre os diversos existentes. Apesar destes elementos terem cargas de ruptura igual, e em certas ocasiões superior a de uma corrente de mesma dimensão, apresenta durabilidade à fadiga consideravelmente menor. As linhas de ancoragem devem, desta forma, utilizar o menor número destes elos de ligação.

2.4.9 Cabos de aço

A classificação do cabo consiste de dois números, como por exemplo, 6x19. O primeiro número indica a quantidade de pernas torcidas e o segundo indica a quantidade de fios em cada perna.



Six Strand Rope

Spiral Strand

Multi Strand

FONTE: [API, 1997]

Figura 16 - Cabos de Aço

Dentre os acima expostos, os cabos *Six Strand*, devido ao seu fácil manuseio, são mais comumente utilizados nas unidades de perfuração. Já os cabos do tipo *Spiral Strand*, devido à sua resistência e durabilidade são utilizados com mais frequência em unidades de produção.

Para minimizar a corrosão da trança metálica dos cabos de aço podem ser empregados cabos galvanizados.

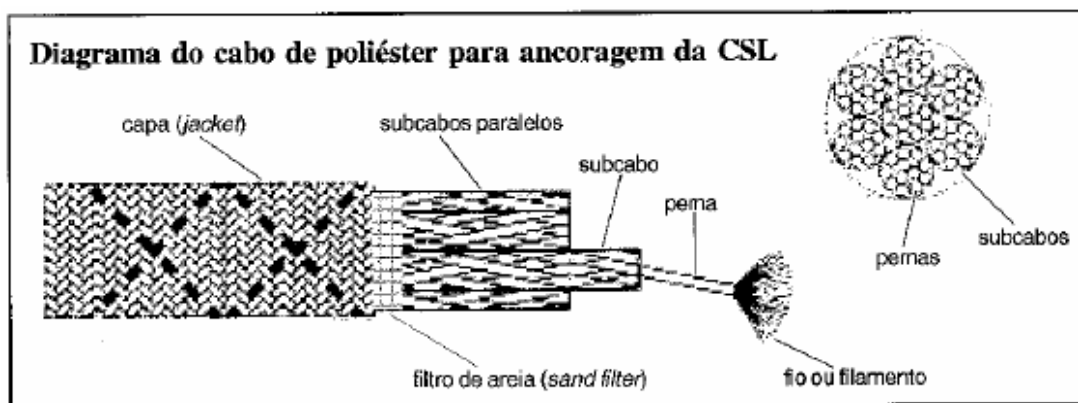
Com relação à resistência dos arames que formam o cabo, geralmente são empregados dois tipos IPS (*Improved Plow Steel*) ou EIPS (*Extra Improved Plow Steel*). Por ser mais resistente à tração o EIPS é mais recomendado para unidades flutuantes [ALBRECHT, 2005].

2.4.10 Cabos de Poliéster

Em geral, são classificados como cabos todos os cabos sintéticos e, como cordas, todos os cabos e cordas feitos de qualquer fibra natural [PETROBRAS, 2000].

O cabo de poliéster é um cabo de material sintético, que apresenta uma flexibilidade axial bem maior que do cabo de aço e das amarras com a mesma carga de ruptura nominal e um peso submerso por unidade de comprimento bem menor. Eles providenciam ainda a complacência necessária em decorrência das propriedades elásticas da fibra, evitando o uso de longas configurações em catenária usadas em sistemas de amarração convencionais.

Os tendões de poliéster apresentam baixa ou nenhuma rigidez à compressão axial. Por este motivo, devem estar necessariamente submetidos a esforços axiais de tração.



Fonte: [SENRA,2004]

Figura 17 - Cabo de Poliéster

3 METODOLOGIAS DE ANÁLISE E PROJETO DE SISTEMAS DE ANCORAGEM

3.1 INTRODUÇÃO

Um sistema flutuante ancorado de exploração ou mesmo de perfuração *offshore*, de acordo com os carregamentos ambientais sofre um deslocamento horizontal denominado deriva, passeio ou *offset*. Este é a distância entre a posição inicial de equilíbrio neutro e a posição final de equilíbrio sob a condição de tempo mais severa, sendo medido como um percentual da lâmina d'água.

Uma medida da eficiência de um sistema de ancoragem é a magnitude do passeio da unidade flutuante. Este referido passeio é inversamente proporcional à rigidez do sistema de ancoragem, que terá seu limite estabelecido pelo tipo de material utilizado nas linhas, respeitando certos limites de segurança [API, 1997].

É importante destacar que o sistema não deve falhar por fadiga, ou seja, sua composição deve garantir a integridade estrutural durante o seu período de operação.

A união destes dois fatores: passeio mínimo e trações dentro dos limites de segurança nos dão um ponto ótimo de operação que será determinado pelo projeto de ancoragem.

3.2 CONDIÇÕES AMBIENTAIS PARA PROJETO

Inicialmente, para o projeto de sistemas de ancoragem devem-se considerar os dados ambientais (ventos, ondas e correnteza) e estabelecer as correspondências entre eles e sua probabilidade de ocorrência. Segundo [ALBRECHT, 2005], as condições ambientais usualmente aplicadas são: condição máxima de projeto e condição máxima de operação.

A condição máxima de projeto é a condição extrema que o sistema deve suportar sem danos, sendo definida como uma combinação de ondas, ventos e correntes para qual o sistema deve ser projetado. Precisa-se definir também o tipo de ancoragem a ser utilizado; permanente ou provisória. A permanente considera um período de cem anos para a recorrência de um evento, ou seja, o sistema deve ser projetado para um carregamento ambiental centenário. Já a provisória é utilizada em sistemas que estarão em operação por um período inferior a 5 anos em uma locação.

A condição máxima de operação é a combinação máxima de condições ambientais sob a qual o sistema deverá operar tanto em atividades de operação quanto em atividades de perfuração.

3.3 SITUAÇÕES A SEREM ANALISADAS

A análise do sistema de ancoragem segundo a norma API RP 2SK [API, 1997] varia em função do tipo de ancoragem, se permanente ou temporário e a fase do projeto. Estas situações são intacta, avariada e eventualmente a transiente além da análise de fadiga.

Na situação intacta a análise é feita considerando todas as linhas intactas e a posição de equilíbrio da unidade flutuante sob a ação de carregamentos permanentes é baseada no comportamento carga-passeio do sistema de ancoragem.

Para a situação avariada a análise é feita considerando o rompimento de uma linha de ancoragem e assim a UF busca uma nova posição de equilíbrio. Atualmente já se avalia também a situação com uma segunda linha de ancoragem rompida.

A situação transiente ocorre quando durante uma tempestade uma linha de ancoragem se rompe e um pico de tração pode ocorrer nas linhas remanescentes até que a unidade flutuante venha a se estabilizar na posição de equilíbrio com o sistema avariado. Para verificar este aumento de tração, é necessária uma análise no domínio do tempo para determinar os movimentos da unidade flutuante após o rompimento da linha.

Existe, entretanto, uma incerteza sobre em que instante de ruptura ocorrerá a maior tração. Uma sugestão do API RP 2SK [API, 1997] é fazer várias simulações rompendo a linha em instantes diferentes dentro de um intervalo de tempo em que esteja contido o valor máximo de movimento/tração da unidade com o sistema intacto. Para simplificar esta análise, o API RP 2SK [API, 1997] sugere fazer uma simulação no tempo para determinar o movimento transiente (*overshoot*) da unidade flutuante sem os efeitos de alta e baixa frequência. Posteriormente, é feita uma análise na frequência para determinar os movimentos de baixa e alta frequência da unidade e, então, é feita a composição destes movimentos com o movimento transiente. O mesmo procedimento é aplicado para a obtenção da tração na linha.

A análise de fadiga das linhas de ancoragem é necessária para unidades flutuantes que permanecem ancoradas na mesma locação por um período longo. O DNV

POSMOOR [DNV, 1989] estabelece que unidades ancoradas por mais de 5 anos na mesma locação devem apresentar uma verificação da vida a fadiga das linhas de ancoragem.

A tabela 1 abaixo mostra as premissas de projeto da norma [API, 2001], para os limites de tração nos diferentes tipos de análise.

Tabela 1: Limites de tração para os diferentes tipos de análise

CONDIÇÃO	MÉTODO DE ANÁLISE	PORCENTAGEM DA TRAÇÃO DE RUPTURA DA LINHA
Intacta	Quase-estática	50
Intacta	Dinâmica	60
Avariada	Quase-estática	70
Avariada	Dinâmica	80
Transiente	Quase-estática	85
Transiente	Dinâmica	95

3.4 FORMULAÇÕES PARA ANÁLISE DINÂMICA DE UNIDADES FLUTUANTES ANCORADAS

3.4.1 Introdução

De acordo com [API, 1997], poderiam ser utilizados dois métodos de análise, a quasi-estática e a dinâmica, para determinar a resposta do sistema. Segundo [ALBRECHT, 2005] a análise dinâmica é necessária em quatro situações. São elas:

1. Nos casos onde a embarcação apresentar grandes valores de resposta na frequência da onda – como os navios;
2. Quando a profundidade da lâmina d'água ultrapassar 200 m;
3. Quando a configuração da linha contiver grandes elementos de arrasto;
4. Quando for necessário fazer uma análise de fadiga, devido à significativa componente de tensão dinâmica da linha.

Para as aplicações práticas em águas profundas na Bacia de Campos, observa-se que praticamente todas essas condições são atendidas, o que exige o uso de ferramentas de análise dinâmica.

O item a seguir descreve a metodologia de análise dinâmica que vinha sendo tradicionalmente empregada, baseada em formulações desacopladas.

3.4.2 Formulações Desacopladas

A prática de projeto atual para o sistema de ancoragem e *risers* da unidade flutuante consiste em adotar um procedimento onde há pouca integração entre os modelos de análise do casco da plataforma, das linhas de ancoragem e dos *risers* [LIMA, 2006]. Dessa forma os efeitos não-lineares e dinâmicos originários da interação do comportamento hidrodinâmico do casco com o comportamento estrutural e hidrodinâmico das linhas e *risers* são desconsiderados.

Nesta formulação duas etapas distintas são consideradas separadamente: a análise dos movimentos do casco da unidade flutuante, e a análise estrutural dos *risers*.

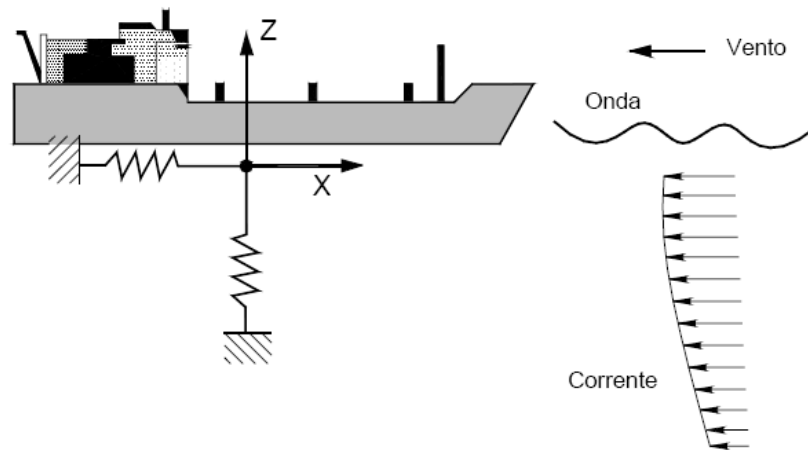


Figura 18 – Modelo Desacoplado

Primeiramente efetua-se uma análise hidrodinâmica para obtenção dos movimentos do casco, e uma estimativa das trações das linhas de ancoragem, não considerando o comportamento não-linear dinâmico das linhas que compõem o sistema *offshore*. Neste caso, utiliza-se uma simplificação para representar as linhas com coeficientes escalares de massa, rigidez e amortecimento, inseridos na equação de movimento do flutuante (mesmo assim, muitas vezes somente as linhas de ancoragem são consideradas, ignorando-se os *risers*). Tais coeficientes podem ser determinados a partir de modelos analíticos simplificados baseados na equação da catenária, ou calibrados a partir de modelos experimentais.

Na segunda etapa, os movimentos da unidade flutuante obtidos anteriormente são aplicados no topo de cada *riser*, agora representados por um modelo rigoroso de elementos finitos, para a avaliação de suas respostas estruturais.

A formulação desacoplada pode ser descrita de maneira sucinta da seguinte forma: inicialmente, realiza-se uma análise hidrodinâmica do casco utilizando programas baseados na Teoria Potencial, como o [ARIANE, 1999], [WAMIT, 1995] ou [WADAM, 2005], que fornecem resultados em termos de coeficientes linearizados e funções de transferência de forças atuantes na plataforma, considerando apenas os carregamentos de onda de altura unitária. Estes coeficientes hidrodinâmicos são fornecidos como dados de entrada para programas como o [SIMO, 2004] e [DYNASIM, 2001], para a obtenção da resposta dinâmica dos movimentos do casco. Estes programas realizam a solução numérica das equações de movimento do corpo rígido, submetido às

ações ambientais de vento, onda e correnteza, com as linhas representadas por coeficientes escalares.

Para finalizar a análise, os movimentos obtidos alimentam programas como o [ANFLEX, 1996] ou [RIFLEX, 2005], que se servem de um modelo de elementos finitos para efetuar a análise e o projeto estrutural de cada *riser*.

Sabe-se que as simplificações relacionadas ao procedimento de análise desacoplada se tornam mais graves para sistemas com grande número de *risers*, e/ou instalados em lâminas d'água profundas; este último aspecto pode se tornar crucial quando projetos de unidades flutuantes ancoradas em até 3000 m de lâmina d'água são considerados [WICHERS, 2001], [HEURTIER, 2001], [KIM, 2001], [ASTRUP, 2001], [JACOB, 1997].

3.4.3 Formulações Acopladas

Como vemos atualmente, a exploração de petróleo avança para águas cada vez mais profundas e as plataformas possuem um número elevado de *risers*, o que faz com que a formulação “desacoplada”, onde a interação entre o casco e as linhas não é considerada de forma austera, tenha seus resultados seriamente prejudicados.

Na formulação acoplada (figura 19), o programa incorpora simultaneamente um modelo hidrodinâmico para calcular as cargas ambientais aplicadas no casco da plataforma, e determinar seus movimentos, associado a modelos de elementos finitos para representar de forma rigorosa o comportamento estrutural e hidrodinâmico das linhas. Nesta formulação, todos os efeitos não-lineares dinâmicos do sistema são incorporados implícita e automaticamente. O equilíbrio é obtido em cada passo de tempo do procedimento de solução das equações de movimento, o que garante um tratamento consistente entre os movimentos da unidade flutuante e a resposta estrutural das linhas, proporcionando, portanto, maior confiabilidade nos resultados.

O primeiro programa a utilizar este conceito de formulação acoplada foi o Prosim [JACOB, 2006], que vem sendo desenvolvido desde 1997 por pesquisadores da Petrobras e do LAMCSO – Laboratório de Métodos Computacionais e Sistemas *Offshore*, do PEC/COPPE/UFRJ. A descrição do procedimento de acoplamento será apresentada no próximo item.

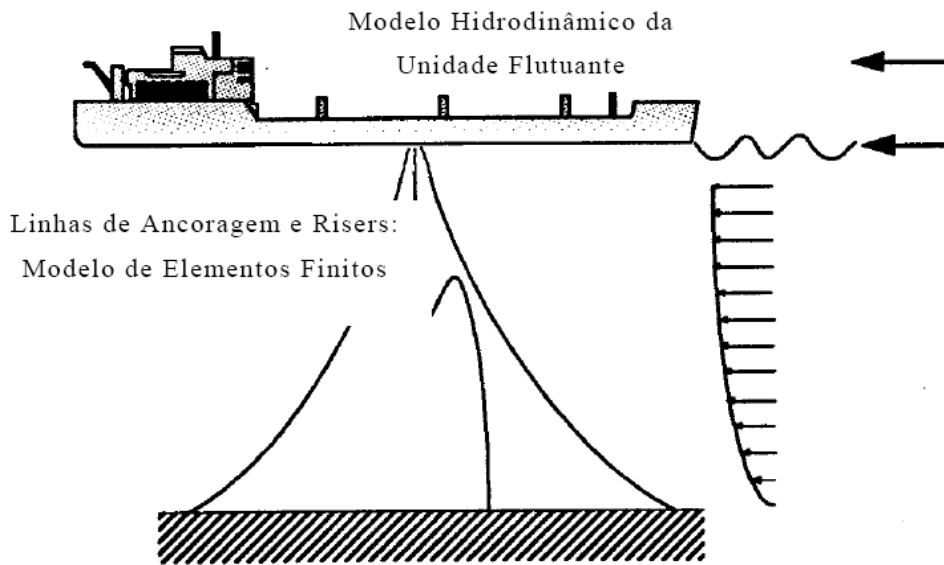


Figura 19 – Modelo Acoplado

3.5 A FORMULAÇÃO ACOPLADA DO PROGRAMA PROSIM

O programa Prosim emprega um procedimento de análise acoplada de plataformas flutuantes baseado na integração numérica no domínio do tempo das equações de movimento de corpo rígido da plataforma (modelada por elementos cilíndricos), associadas à representação estrutural e hidrodinâmica do comportamento das linhas de ancoragem e *risers* por modelos de elementos finitos.

No apêndice A serão apresentados alguns aspectos da formulação e solução das equações de movimento de grande amplitude do casco da plataforma, e nas próximas seções deste capítulo têm-se uma breve descrição dos modelos hidrodinâmicos e de cálculo das forças ambientais. Em seguida, tem-se um breve esboço do esquema utilizado para o acoplamento do modelo hidrodinâmico do casco com a estrutura / modelo hidrodinâmico das linhas, seguido dos principais aspectos da formulação para a discretização no espaço e no tempo do modelo estrutural para as linhas.

As equações de movimento consideram efeitos não-lineares geométricos decorrentes de grandes deslocamentos do corpo; além disso, como será visto em seções posteriores, 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.

3.5.1 Carregamentos Ambientais; Modelos Hidrodinâmicos

Os carregamentos ambientais são compostos pelas forças externas que incidem sobre o sistema de produção *offshore*. Estes carregamentos provêm de ondas, ventos e correntezas atuantes sobre o casco do corpo flutuante e apenas de ondas e correntezas atuantes sobre as linhas de ancoragem e *risers*.

Será apresentado nesta seção de forma sucinta o conceito dos referidos carregamentos ambientais, pois sua modelagem foge do desígnio do presente trabalho. Uma abordagem detalhada, bem como o cálculo das forças podem ser encontrados em [JACOB, 2006].

Ondas

A onda pode ser definida como uma onda regular de especificada altura, período, direção e fase, ou por dois ou mais componentes sobrepostos, cada um com diferentes valores de altura, período e direção. Os estados de mar irregulares também podem ser considerados, de forma unidirecional ou bidirecional com a formulação de Pierson-Moskowitz ou espectros Jonswap [CHAKRABARTI, 1987]; neste caso, o estado de mar é representado no domínio do tempo por um conjunto de componentes de onda regular produzidos a partir do espectro de onda, com mesmo período e com fases distribuídas aleatoriamente. As velocidades, acelerações e pressões em um ponto da água são obtidos pela soma dos valores calculados para cada onda componente. A teoria linear de Airy [CHAKRABARTI, 1987], que é a mais comumente usada em aplicações práticas, é empregada para o cálculo das velocidades e acelerações das partículas do fluido.

Correnteza

As forças de correnteza marítima são consideradas por meio de perfis poligonais de velocidades medidas desde o fundo do mar até a superfície. Neste caso, adota-se uma tabela que consiste da velocidade de correnteza, com suas respectivas direções de ataque versus profundidade.

Assume-se que este perfil de correnteza move-se com a superfície da onda, ou seja, durante o cálculo, a profundidade de interpolação na tabela de correnteza é medida abaixo da superfície instantânea da onda.

Embora a correnteza possa ser considerada primordialmente como carregamento estático, existem alguns efeitos dinâmicos a ela associados. Pode-se mencionar, por exemplo, as vibrações induzidas por vórtices (VIV) em elementos esbeltos (como por exemplo, em *risers* e tendões), e a variação no valor da velocidade da correnteza medida no tempo, que é usualmente ignorada.

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

Modelos Hidrodinamicos

Após as velocidades e acelerações das partículas do fluido serem calculadas, as forças agindo sobre a estrutura (membros do casco e linhas) são calculadas, utilizando diferentes modelos hidrodinâmicos: ou extensões da formulação clássica de Morison para as linhas [MORISON, 1950]; ou uma formulação híbrida Morison / Difração para os cascos de plataformas que podem ser representados por membros cilíndricos equivalentes com grandes diâmetros (tais como TLPs ou semi-submersíveis). A formulação integral da difração para o casco dos navios também está disponível em [FUCATU, 2003].

No caso de corpos esbeltos para os quais a fórmula de Morison pode ser aplicada, tais como membros reticulados de plataformas ou linhas de ancoragem e *risers*, as forças de correnteza podem ser consideradas diretamente no cálculo da parcela de arraste que leva em conta às 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.

Vento

As forças do vento são computadas em cada passo de tempo por interpolação a partir de tabelas de coeficientes de arrasto, funções de ângulo e de ataque do vento. Estes coeficientes são normalmente determinados por meio de testes em túnel de vento.

Existem dois métodos para se considerar os efeitos de vento atuantes na parte emersa de unidades flutuantes. O primeiro seria considerar a força de vento como uma parcela estática, constante no tempo; e o segundo como uma parcela dinâmica, variável no tempo, obtida a partir de um espectro de vento tal como o espectro API [API, 1993].

O cálculo da parcela estática da carga de vento em navios e plataformas é efetuado determinando-se forças e momentos, através de expressões (A.19), que se relacionam diretamente com os coeficientes hidrodinâmicos dados na forma adimensional como:

$$\begin{aligned} F_x &= \frac{1}{2} \rho_{ar} C_{v_{fx}}(\psi) A_{ts} V_w^2 \\ F_y &= \frac{1}{2} \rho_{ar} C_{v_{fy}}(\psi) A_{ls} V_w^2 \\ M_z &= \frac{1}{2} \rho_{ar} C_{v_{mz}}(\psi) A_{ls} L V_w^2 \end{aligned} \quad (3.1)$$

onde: ρ_{ar} Massa Específica do ar

V_w Velocidade do vento (função da altura de referência e período de tempo)

A_{ts} Área exposta frontal da unidade flutuante

A_{ls} Área exposta lateral da unidade

L Comprimento da unidade

$C_{v_{fx}}(\psi), C_{v_{fy}}(\psi), C_{v_{mz}}(\psi)$ Coeficientes aerodinâmicos de força e momento

O cálculo da força de vento depende também da determinação da parcela dinâmica (denominada também como força de vento de baixa frequência), que de modo similar às ondas geram forças variáveis no tempo. Um espectro, que representa a

parcela dinâmica do carregamento de vento atuante em plataformas, bastante aplicado em projetos é o proposto pela norma API RP 2A [API, 1993].

3.5.2 Equações de Movimento do Casco: Solução

A solução das equações de movimento (A.14), descritas no Apêndice A, é realizada utilizando-se o método de integração no tempo de quarta-ordem de Runge-Kutta. Esse método funciona em sistemas de equações diferenciais acopladas com a forma $\frac{dy}{dt} = f(y, t)$, que é semelhante às aquelas demonstradas na equação (A.14). O método de solução de Runge-Kutta se baseia em extrapolações polinomiais das variáveis em cada passo de tempo seguinte através de um passo em dado momento, e na determinação dos coeficientes do polinômio em termos dos valores estimados das derivadas das variáveis em tempos intermediários de passo.

No entanto, antes de aplicar o método de Runge-Kutta, algumas manipulações nas equações (A.14) devem ser realizadas, a fim de ter em conta, por exemplo, o fato de que a força e os vetores de momento, f e m , têm componentes que são proporcionais às acelerações do corpo (derivados das variáveis básicas) (por exemplo, os termos de inércia provêm da fórmula de Morison). Estes componentes irão gerar a chamada "massa adicionada", que pode variar no tempo. Maiores detalhes da manipulação das equações de movimento podem ser encontrados em [JACOB, 2006]; brevemente falando, consistem em separar os termos de f e m que dependem das acelerações do corpo, e transferir estes termos, afetados pelos valores da "massa adicionada", para o lado esquerdo das equações de movimento.

3.5.3 Esquema de Acoplamento Casco – Linhas

Como mencionado no Apêndice A, o lado direito da Eq. (A.14) é composto por forças e momentos f e m que atuam sobre a plataforma, incluindo as resultantes das cargas ambientais (ondas, correntes, vento). Além dessas cargas externas, as forças exercidas pelas amarras e os *risers* estão igualmente incluídas nos vetores f e m .

Esta é a chave do esquema considerado para o acoplamento entre o modelo hidrodinâmico do casco (descrito acima) com o modelo de elementos-finitos das

amarras e *risers* (que serão descritas na seção a seguir): o acoplamento é realizado por forças sobre o lado direito de as equações de movimento do casco.

Neste sistema de acoplamento, um (ou mais) passos da análise dinâmica não-linear do modelo de elementos finitos de cada linha é realizado a cada etapa de Runge-Kutta para a integração das equações de movimento do casco. As linhas são analisadas sob a ação de todas as cargas ambientais, e também com os componentes de movimento do casco (a partir da etapa anterior RK) prescritas no topo de cada linha. Os resultados destas análises e EF são as forças e momentos no topo da linha, que são depois incluídos nos vetores f e m das forças que atuam sobre o casco.

Embora possa ser considerado como um "acoplamento fraco", apresentou resultados muito bons. Principalmente, por garantir uma eficiência computacional consideravelmente melhor do que poderia ser fornecido por uma alternativa "fortemente acoplada" onde, por exemplo, as malhas de EF de todas as amarras e *risers* seriam montadas em conjunto com o casco e seria considerado como um "nó" deste modelo. Estudos sobre o acoplamento forte nesse esquema "fortemente acoplado" foram realizados [BAHIENSE, 2007], para avaliar melhor o mérito relativo de ambos os esquemas.

3.5.4 Equação de movimento das linhas

Para concluir a descrição do procedimento de análise acoplada empregado no Prosim, resta apresentar a formulação e o procedimento de solução das equações de movimento das linhas, a partir das quais se obtém as parcelas de forças das linhas incluídas nos vetores f e m do lado direito das equações A.14.

Sabe-se que a descrição matemática para a representação do comportamento dinâmico estrutural é estabelecida por um problema de valor inicial e de contorno (PVI/C). O PVI/C é constituído por um sistema de equações diferenciais parciais (EDP), que descrevem as equações de movimento, e um sistema de condições iniciais e de contorno.

Um procedimento usual para se obter a resposta estrutural dinâmica consiste em empregar uma técnica de "semi-discretização" independente, em que as equações de movimento são primeiro discretizadas no espaço pelo "Método dos Elementos Finitos"

– MEF [BELYTSCHKO, 1983] e em seguida discretizadas no tempo por um algoritmo de integração como Newmark [BATHE, 1996], por exemplo.

Discretização Espacial

No programa Prosim esta discretização espacial é feita pelo Método dos Elementos Finitos, empregando elementos de treliça espacial e pórtico espacial. Os elementos de treliça possuem dois nós com três graus de liberdade translacionais por nó (figura 20). Como este tipo de elemento não possui graus de liberdade angulares conseqüentemente não é possível fornecer rigidez flexional a estes elementos. Por este motivo estes elementos representam bem as linhas para as quais a rigidez à flexão pode ser desconsiderada tais como linhas de ancoragem e cabos umbilicais. Devido à menor quantidade de graus de liberdade por nó, os elementos de treliça usualmente requerem um tempo de processamento inferior ao utilizado pelos elementos de pórtico.

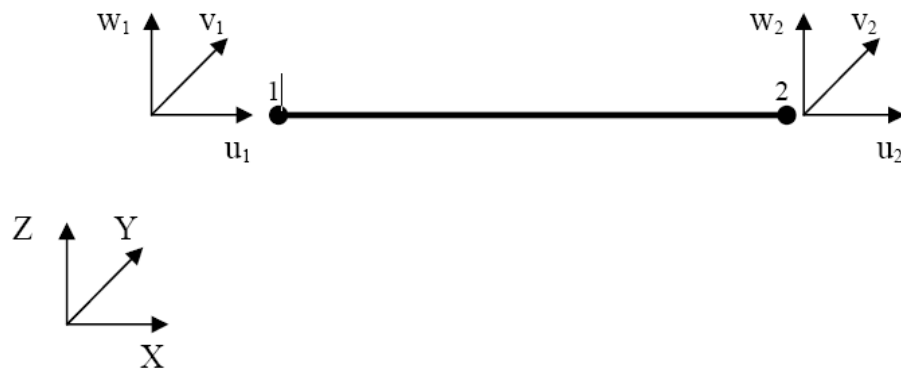


Figura 20 – Elemento de Treliça Espacial.

Os elementos de pórtico possuem dois nós com seis graus de liberdade por nó (Figura 21). Este elemento permite considerar a rigidez à flexão das linhas e representam bem linhas cuja rigidez à flexão é representativa tais como *risers* rígidos e *risers* flexíveis.

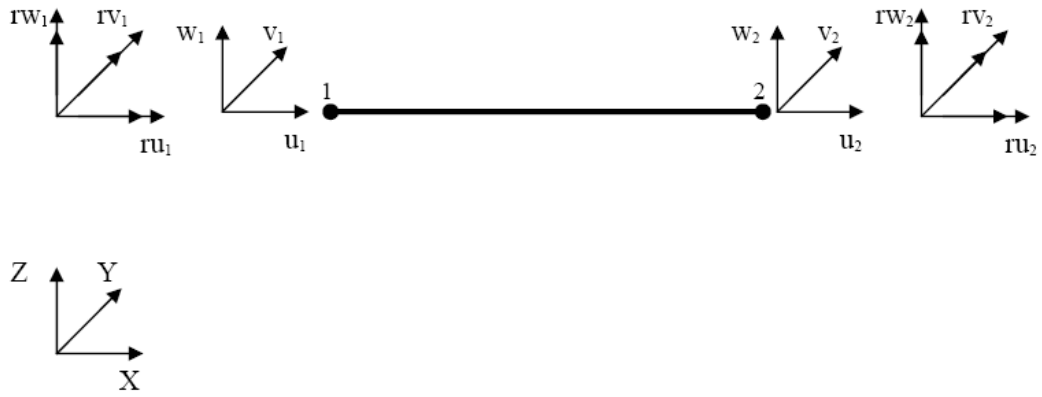


Figura 21 – Elemento de Pórtico Espacial.

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 converte 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:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = F(t) \quad (3.2)$$

As incógnitas destas equações são os vetores $u(t)$, $\dot{u}(t)$ e $\ddot{u}(t)$ 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:

$$u(0) = u_0; \quad \dot{u}(0) = v_0 \quad (3.3)$$

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 $F(t)$ contendo as resultantes nodais das cargas.

Finalmente, M , C e 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 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]:

$$C = \alpha_m + \alpha_k K \quad (3.4)$$

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

Estas equações semi-discretas de movimento são, então, resolvidas, por um algoritmo de integração no tempo tal como um membro da família Newmark [BATHE, 1996], que é caracterizado pelos seguintes operadores:

$$\mathbf{d}_{n+1} = \mathbf{d}_n + \Delta t \mathbf{v}_n + \frac{\Delta t^2}{2} [(1-2\beta)\mathbf{a}_n + 2\beta\mathbf{a}_{n+1}] \quad (3.5)$$

$$\mathbf{v}_{n+1} = \mathbf{v}_n + \Delta t[(1-\gamma)\mathbf{a}_n + \gamma\mathbf{a}_{n+1}] \quad (3.6)$$

onde \mathbf{a}_{n+1} , \mathbf{v}_{n+1} e \mathbf{d}_{n+1} são aproximações para os valores desconhecidos $\ddot{u}(t_{n+1})$, $\dot{u}(t_{n+1})$ e $u(t_{n+1})$; Δt é o intervalo de tempo; γ e β são parâmetros ajustáveis definido para cada membro particular da família Newmark.

Vários algoritmos implícitos e explícitos podem ser indicados como membros desta família de algoritmos. Algoritmos implícitos tais como a regra trapezoidal ($\gamma = 1/4$, $\beta = 1/2$) são mais adequadas para os problemas inerciais onde a resposta dinâmica é modos de vibração de baixa frequência [HUGHES, 1987]; por exemplo, sistemas flutuantes de produção em operação ou sob cargas ambientais extremas. Por outro lado, os algoritmos explícitos tais como o método das Diferenças Centrais ($\gamma = 1/2$, $\beta=0$) são mais adequados para os problemas transientes, por exemplo, imediatamente após a ruptura de uma linha de amarração. O Prosim utiliza o algoritmo conhecido como α B-Newmark que consiste em uma modificação no algoritmo original de Newmark onde o α é um parâmetro ajustável que tem o objetivo de controlar o grau de dissipação

numérica para reduzir ruídos espúrios de alta frequência, e que deve ser fornecido pelo usuário no intervalo $[-1/3, 0]$, maiores detalhes desse método pode ser encontrado em [JACOB, 2006].

Pode ser mostrado [HUGHES, 1987], que a aplicação dos operadores de integração no tempo de Newmark para discretização no tempo na forma da EQ. (3.2) (Com $\ddot{\mathbf{u}}(t_{n+1})$, $\dot{\mathbf{u}}(t_{n+1})$ e $\mathbf{u}(t_{n+1})$ substituído por \mathbf{a}_{n+1} , \mathbf{v}_{n+1} e \mathbf{d}_{n+1}) conduz a um conjunto de sistema de equações algébricas “efetivas”, que deve ser resolvido a cada passo do processo de integração no tempo. Uma forma geral e eficaz para este sistema de equações pode ser expresso como:

$$\mathbf{A}_{n+1} \mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{b}_{n+1} \quad (3.7)$$

A “matriz efetiva” \mathbf{A} é definida como uma combinação da massa, amortecimento e matriz rigidez afetadas por coeficientes escalares em termos de parâmetros de Newmark, o tempo de passo do valor, e o parâmetro de amortecimento de Rayleigh. O vetor de "cargas efetivas" \mathbf{b} é calculado em termos das cargas elásticas externas, forças de amortecimento e inércia. Uma forma particular para este sistema dependerá não só da escolha do operador de integração, mas também da implementação do esquema, que irá definir o principal vetor desconhecido \mathbf{x} como vetor de deslocamentos, velocidades ou acelerações.

Tratamento do Problema Não-Linear

Para problemas não lineares elástico-dinâmicos, as equações de movimento de discretização no tempo podem ser escritas como:

$$\mathbf{M} \mathbf{a}_{n+1} + \mathbf{R}(\mathbf{d}_{n+1}) = \mathbf{F}_{n+1} \quad (3.8)$$

onde $\mathbf{R}(\mathbf{d}_{n+1})$ é um vetor de forças internas (funções não lineares de deslocamentos desconhecidos \mathbf{d}_{n+1}), incluindo as contribuições não lineares de forças e de amortecimento elástico. Uma das estratégias possíveis para o tratamento dos efeitos não lineares com os algoritmos implícitos de integração no tempo consiste em assumir uma linearização na vizinhança da posição dos deslocamentos correspondentes ao instante t_{n+1} , e expressar o termo não linear $\mathbf{R}(\mathbf{d}_{n+1})$ como uma série de Taylor truncada que inclui \mathbf{K}_T , a tangente matriz de rigidez. Como consequência da linearização assumida, equilíbrio ao final do passo $n + 1$ já não é assegurado; por isto o uso de técnicas

iterativas para a solução de sistemas de equações não lineares é necessário, a fim de obter respostas dinâmicas confiáveis. O método de Newton-Raphson (NR) e suas variantes têm sido tradicionalmente usados para este fim, em análise dinâmica não linear. Uma forma incremental-iterativa discreta para a resolução de equações é dada pelas seguintes expressões:

$$\mathbf{M} \mathbf{a}_{n+1}^{(k)} + \mathbf{C} \mathbf{v}_{n+1}^{(k)} + \mathbf{K}_T \Delta \mathbf{d}^{(k)} = \mathbf{F}_{n+1} - \mathbf{R}(\mathbf{d}_{n+1}^{(k-1)}) ; \mathbf{d}_{n+1}^{(k)} = \mathbf{d}_{n+1}^{(k-1)} + \Delta \mathbf{d}^{(k)} \quad (3.9)$$

A aplicação de um operador de integração implícito no tempo à Eq. (3.9) também irá conduzir a um conjunto de sistemas efetivos de equações algébricas semelhantes ao (3.7) (agora com deslocamentos incrementais como incógnitas primárias), para ser resolvido em cada iteração da técnica NR. Expressões preditoras e corretoras para os operadores de Newmark podem ser escritos como se segue [JACOB, 1994]

$$\mathbf{a}^* = -\frac{1}{\beta \Delta t} \mathbf{v}_n + \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \mathbf{a}_n ; \quad \mathbf{v}^* = \left(1 - \frac{\gamma}{\beta} \right) \mathbf{v}_n + \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \Delta t \mathbf{a}_n \quad (3.10)$$

$$\mathbf{a}_{n+1}^{(k)} = \mathbf{a}^* + \frac{1}{\beta \Delta t^2} \Delta \mathbf{d}^{(k)} ; \quad \mathbf{v}_{n+1}^{(k)} = \mathbf{v}^* + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \Delta \mathbf{d}^{(k)} \quad (3.11)$$

Uma formulação detalhada da implementação do algoritmo implícito de integração no tempo de Newmark em associação com a técnica NR, incluindo a forma particular da “matriz efetiva” \mathbf{A} e a o vetor \mathbf{b} (já referido como o “*vetor efetivo residual*”) pode ser encontrado em [JACOB, 1994].

4 CONCEITOS GERAIS SOBRE OTIMIZAÇÃO

4.1 INTRODUÇÃO

A definição de otimização está muito bem explicitada por [SOARES, 1997], como sendo um mecanismo de análise de decisões complexas, envolvendo seleção de valores para variáveis, com o simples objetivo de quantificar performance e medir a qualidade das decisões. A intenção é encontrar a melhor solução, respeitando, se necessário, restrições de viabilidade imposta aos parâmetros do problema.

Os problemas em engenharia e ciências podem ser formulados de duas maneiras: encontrar o efeito de uma dada causa ou, de outro modo, definir a causa que produz efeito desejado ou medido. A primeira classe de problemas é denominada problemas diretos, enquanto que a segunda classe são os problemas inversos.

Problemas inversos incluem todos os problemas que visam à reconstrução da informação por meio de um modelo matemático, utilizando os dados desejados ou medidos. Os problemas inversos para os quais os dados provêm de medidas são conhecidos como problemas de identificação ou estimação de parâmetros. Outro grupo de problemas inversos é constituído pelos problemas de síntese, nos quais os dados são assumidos arbitrários, neste caso pode não haver uma solução. A este grupo pertencem os problemas de projeto ótimo, nos quais o propósito é o desenvolvimento de um dispositivo que possa prover um desempenho ótimo em termos de custos e/ou propriedades físicas, entre outros [NEITTAANMÄKI et al., 1996].

Um projeto ótimo pode ser formulado como um problema de otimização, em que o desempenho deve ser otimizado, satisfazendo todas as restrições, se houverem. Assim, a otimização almeja a maximização ou minimização de determinadas características de um projeto. Otimizar ou tornar ótimo significa buscar uma melhor solução para um determinado problema.

A otimização é um ramo de pesquisa que trabalha com problemas formulados de maneira a maximizar ou minimizar uma certa função em um espaço dimensional finito Euclidiano sobre um subconjunto deste espaço, o que é usualmente determinado por desigualdades funcionais. No século passado, a otimização alcançou um nível de

amadurecimento que inclui muitos ramos como, otimização linear, otimização global, otimização discreta, entre outras. Cada um destes ramos tem uma boa fundamentação teórica e é respaldado por uma extensa coleção de algoritmos sofisticados e softwares. A otimização é uma poderosa metodologia para alcançar soluções de problemas em uma vasta área de aplicações, tais como, em economia, administração, indústria e engenharia.

A aplicação da otimização em engenharia, que é o escopo deste trabalho, tem uma longa história. Duas classes de problemas de otimização que são os problemas lineares e os não lineares foram vastamente usados nas mais diversas áreas de aplicação, tais como planejamento de produção, projeto e ajustes de dados [WEISE, 2007], [NEITTAANMÄKI et al., 1996].

A popularidade dos métodos estocásticos pode ser atribuída ao fato de que esses são métodos de simples implementação e que não requerem o cálculo de derivadas para o modelo matemático desenvolvido. Esses métodos podem ser usados para otimizar funções contínuas ou discretas. Duas importantes condições, que devem ser satisfeitas para que o uso desses métodos seja possível, primeiramente [WEISE, 2007] [ANDERSSON, 2000] o problema deve ser parametrizado, de alguma maneira, a fim de descrever cada possível solução. Essa parametrização pode ser inteira, seqüencial ou na forma de números reais, dependendo do problema e do método utilizado e em segundo lugar, porém não menos importante, deve haver a possibilidade de estimar um valor para a função objetivo, baseado nas características utilizadas para descrever a solução.

4.2 TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO

Algoritmos destinados a resolver problemas de otimização podem ser classificados a partir de diversos pontos de vista, sendo possível a seguinte classificação: algoritmos determinísticos e algoritmos probabilísticos.

Os algoritmos determinísticos, também conhecidos como algoritmos clássicos, em geral são baseados no cálculo de derivadas de primeira ordem ($f \in C^1$) ou em aproximações destas, ou também no cálculo de derivadas parciais de segunda ordem ($f \in C^2$). A procura do ponto ótimo usa as coordenadas do ponto corrente (x_k) como ponto de partida para a próxima iteração ($k+1$).

Os algoritmos probabilísticos são aqueles que utilizam a probabilidade como parte de sua lógica. Na prática, isso significa que o algoritmo implementado deve acessar um gerador de números pseudo-aleatórios. O algoritmo utiliza bits aleatórios como um guia para o seu comportamento, diferente dos algoritmos convencionais, um algoritmo probabilístico, dada uma mesma sequência de entrada, não necessariamente leva a um mesmo estado final. Os algoritmos probabilísticos podem ainda ser de busca não-informada, quando a única resposta gerada durante a busca é se foi alcançada ou não a solução do problema, ou de busca informada, quando são colhidas informações sobre o espaço de busca durante o processo, qualificando-as e até mesmo sugerindo uma ordem de exploração das mesmas.

Dentre as principais técnicas usadas na resolução de problemas de otimização, diferenciam-se dois grandes grupos: *Programação Matemática* e *Técnicas de busca global*.

Existe, além destes, o método da busca exaustiva [LACERDA, 1999], que consiste em gerar possíveis soluções sistematicamente ou aleatoriamente, e avaliar cada uma delas podendo aceitá-la ou rejeitá-la. Dessa forma, é considerado o método da força bruta, e se o espaço de busca for muito grande, a busca pode durar um tempo proibitivo a esta técnica. No entanto, se for possível gerar soluções de forma sistemática, seguramente o método encontra o ponto ótimo global.

4.2.1 Programação Matemática

As técnicas de programação matemática surgiram no campo de pesquisa operacional, para solucionar problemas onde deve-se encontrar valores para um conjunto de variáveis, de forma a satisfazer um conjunto de inequações como restrições, e ainda maximizar ou minimizar uma outra equação em função destas variáveis. Os métodos matemáticos apresentam teoremas que comprovam sua convergência, contudo, nenhum deles garante uma solução ótima global. Esta é uma deficiência dos métodos clássicos que se tem tentado superar. A programação matemática pode ser subdividida de acordo com as restrições e a função objetivo, da seguinte forma:

- Programação linear: Quando tanto as restrições como a função objetivo são funções lineares das variáveis de projeto;
- Programação não-linear: Quando a função objetivo ou pelo menos uma das restrições é função não-linear das variáveis de projeto.

Podem existir problemas de otimização com restrições e sem restrições, existindo técnicas de programação matemática mais adequadas para cada um deles. A seguir serão superficialmente abordados alguns métodos de programação matemática.

Programação Linear

A programação linear (PL) tem como objetivo encontrar a solução ótima em problemas onde a função-objetivo e todas as restrições são representadas por funções (equações ou inequações) lineares das variáveis de projeto. Este caso é pouco frequente em engenharia, visto que a grande maioria dos problemas práticos são formulados com funções não-lineares das variáveis de projeto. Segundo [LUENBERGER, 1984], qualquer problema de programação linear pode ser representado por uma “formulação padrão”:

$$\text{Minimizar/Maximizar:} \quad Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} \text{Sujeita a:} \quad & a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \\ & a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2 \\ & \cdot \quad \quad \quad \cdot \\ & a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n = b_m \end{aligned}$$

$$e \quad x_1 \geq 0, \quad x_2 \geq 0, \quad \dots, \quad x_n \geq 0,$$

onde Z é a função-objetivo, x_i são as variáveis ou incógnitas e b_i , c_i e a_{ij} são as constantes do problema.

O principal método aplicado para a resolução de problemas desta categoria é conhecido como *Simplex*, foi desenvolvido na década de quarenta.

Para melhor compreensão do método algumas definições são necessárias, como se segue:

- Soluções básicas: dado um sistema “ $A.x = B$ ” de m equações lineares simultâneas e n incógnitas, onde o número de soluções é infinito e o posto da matriz A é m ($m < n$), pode-se selecionar $m \times m$ submatrizes não singulares de A e colocar as restantes $(n-m)$ variáveis nulas. A solução do sistema resultante é chamada solução básica e designada por x_B .
- Variáveis básicas: são as m variáveis ditas acima.
- Variáveis não-básicas: são as $n-m$ variáveis anuladas, também descritas anteriormente.
- Base: A matriz $m \times m$ é chamada base, ou matriz base, e denotada por B .

O procedimento do método consiste em ir de uma base para a outra, trocando uma variável básica por uma não básica, até que o ótimo seja alcançado. Assim vemos que os pontos de maior importância do método são: como encontrar uma solução básica inicial viável, de forma rápida; como organizar um procedimento que avalie a qualidade de uma solução básica; e como transitar de uma base para outra melhor.

Maiores detalhes sobre estes procedimentos podem ser encontrados nas referências [MACULAN, 1980] e [CASTRO, 1999].

Programação Não-Linear

Os métodos de *programação não-linear* [CASTRO, 1999] aplicados a problemas de otimização se distinguem conforme o problema seja restringido ou não-restringido. Os problemas de otimização sem restrições são muito simples, contudo muito pouco

prováveis na área da engenharia. Entretanto, métodos bastante conhecidos podem ser citados, como o *método de Newton*, para problemas unidimensionais, e o *método dos gradientes conjugados*, usado para problemas multidimensionais.

O princípio do método de Newton é minimizar uma função através de uma aproximação local por uma função quadrática por meio de uma expansão em série de Taylor, considerando termos até a segunda ordem, na vizinhança de um ponto.

O método dos gradientes conjugados é baseado no conceito de direções conjugadas, que, segundo [LUENBERGER, 1984], é definido como:

“Dada uma matriz simétrica Q , dois vetores d_0 e d_1 são ditos Q -ortogonais ou conjugados em relação à Q se $d_0^T Q d_1 = 0$ ”.

Generalizando o conceito acima, tem-se que um conjunto finito de vetores $\{d_0, d_1, \dots, d_n\}$ é dito Q -ortogonal se $d_i^T Q d_j = 0$ para todo $i \neq j$, e, sendo a matriz Q definida positiva, estes vetores são linearmente independentes. A matriz Hessiana $F(x_k)$ é um exemplo da matriz Q acima citada.

O método do gradiente conjugado gera a cada passo uma direção conjugada d_k que é uma combinação linear de $-\nabla f(x_k)$ e da direção usada no passo anterior (d_{k-1}).

Existem ainda diversas outras técnicas de programação não-linear, como o método dos multiplicadores de Lagrange, método das penalidades e outros. Por fugir do escopo deste trabalho não serão todas elas descritas, porém maiores detalhes podem ser encontrados em [OLIVIERI, 2004], [MATEUS, 1986], [VANDERPLAATS, 1984], [LUENBERGER, 1984], [AVRIEL, 1976] e [WAH, et al., 2000]

Todas as técnicas até então citadas, são baseadas no método de subida de encosta (Hill Climbing), ou seja, investigam os pontos adjacentes do espaço de busca e movem-se no sentido em que o valor da função objetivo aumenta, em casos de maximização, ou diminui, em casos de minimização. Por isso, esta classe de técnicas tende a ter dificuldades se a função objetivo tem muitos máximos e mínimos locais, podendo assim convergir para um valor ótimo localizado, contudo, são geralmente bastante rápidos.

4.2.2 Técnicas de Busca Global

As técnicas de busca global caracterizam-se pela capacidade de explorar regiões do espaço de busca além dos pontos de ótimo local. Para isto, todas elas fazem uso de dois princípios conhecidos como exploração e exploração (do inglês *exploitation*). Estes dois termos têm a mesma tradução, contudo na literatura especializada, elas ganham significados diferentes. Quando se fala em *exploração*, faz-se referência à capacidade de visitar pontos desconhecidos no espaço de busca a procura de novas soluções, e *exploração* significa retirar informações presentes nas soluções encontradas.

Das técnicas de busca global mais utilizadas na área de otimização, podem ser citadas três de grande importância: *Busca Tabu*, *Recozimento Simulado* (Simulated Annealing), e *Algoritmos Genéticos*. No restante desta seção, será apresentada uma breve descrição das duas primeiras técnicas. No próximo capítulo serão apresentados os conceitos relacionados a Algoritmos Genéticos e PSO, que será o algoritmo empregado neste trabalho.

Busca Tabu

Segundo [LACERDA, 1999], o método de *Busca Tabu* baseia-se em um conjunto de princípios da área de inteligência artificial clássica, e se assemelha com os métodos clássicos de programação matemática apenas no sentido de que também se inicia a partir de uma única solução inicial, que pode ser sugerida aleatoriamente. Soluções viáveis são derivadas da solução atual, através de um procedimento conhecido como movimento. Assim, um conjunto de soluções é formado, seguindo todos os possíveis movimentos a partir da solução atual, estes movimentos são controlados pelas restrições tabu e critérios de aspiração.

Restrições tabu são condições impostas aos movimentos, que tornam alguns deles proibidos, conhecidos apenas como tabu, e colocados numa lista, dita lista tabu. A lista tabu é uma estrutura de armazenamento circular de tamanho fixo ou variável, e quando um novo movimento entra na lista, o movimento mais antigo é retirado.

Critérios de aspiração são critérios que eliminam restrições tabu e desta forma, um movimento proibido pode ser permitido, caso satisfaça o critério de aspiração.

Este método de busca vem sendo largamente aplicado em problemas de otimização combinatória, e o algoritmo abaixo, proposto por [LACERDA, 1999], ilustra os passos de uma busca tabu.

Algoritmo da Busca Tabu
escolher uma solução inicial x (ponto arbitrado)
para i variando de 1 a n **faça**
 definir conjunto de movimentos candidatos a partir de x
 $x \leftarrow$ "melhor movimento" do conjunto de movimentos candidatos
 retirar x do conjunto de movimentos candidatos
 enquanto ((x for tabu) e (x não satisfizer o critério de aspiração)) **faça**
 $x \leftarrow$ "melhor movimento" do conjunto de movimentos candidatos
 retirar x do conjunto de movimentos candidatos
 fim do enquanto
fim do para
retornar (x)

Algoritmo 1 – Busca Tabu

Recozimento simulado

O primeiro trabalho sobre o método do Recozimento Simulado deve-se a [KIRKPATRICK *et al.*, 1983], que propôs um algoritmo inspirado no processo físico do recozimento dos metais aplicado à otimização de problemas. Esse estudo baseou-se no processo proposto por [METROPOLIS *et al.*, 1953] para o cálculo da distribuição de equilíbrio de um conjunto de átomos em diferentes temperaturas.

A analogia deste método com o processo físico do recozimento dos metais consiste em elevar a temperatura de um sólido acima de sua temperatura de fusão e, em seguida, baixá-la gradativamente de forma que a estrutura molecular atinja o máximo de organização estrutural. Neste momento, as moléculas irão adquirir uma estrutura cristalina estável e, por sua vez, um nível de energia mais fraco possível.

Um algoritmo do método de recozimento simulado foi apresentado em [LACERDA, 1999], da seguinte forma:

Algoritmo do Recozimento Simulado

escolher um ponto arbitrário x_0

inicializar T como uma temperatura suficientemente alta

$i \leftarrow 0$

enquanto ($T > 0$) **faça**

 realizar um movimento aleatório de x_i para x_{i+1}

$\Delta E \leftarrow E(x_{i+1}) - E(x_i)$

se ($\Delta E < 0$) **então**

$i \leftarrow i+1$

senão

$p \leftarrow (\Delta E/T)$

se ($p < \text{randômico}\{0,1\}$) **então** $i \leftarrow i+1$

fim do se

se (E não foi reduzido significativamente em várias interações) **então**

 reduzir a temperatura T

fim do se

fim do enquanto

retornar (x_i)

Algoritmo 2 – Recozimento Simulado

Quando a temperatura está alta, grandes áreas do espaço de busca são exploradas, uma vez que quase todo movimento é aceito. Quando a temperatura baixa, o algoritmo cai em algum vale. Se o resfriamento for lento o suficiente, é esperado que o sistema já tenha encontrado a “decida de encosta” do mínimo ótimo de energia, ou seja, a solução ótima global do problema.

4.3 ALGORITMOS GENÉTICOS

O termo “genético” vem da teoria da evolução das espécies proposta por Charles Darwin por volta de 1842 [DARWIN, 1996] que mesmo sendo descrito em um nível mais abstrato forneceu os parâmetros que permitiram sintetizar o mecanismo em um modelo computacional.

Assim como acontece na natureza, em um Algoritmo Genético (AG) o indivíduo mais adaptado ao meio tem mais chances de sobreviver e gerar mais descendentes passando suas características adiante através da prole. Nesse contexto, cada indivíduo do AG é uma solução candidata do problema proposto, que, por sua vez, faz o papel do meio-ambiente, já que estabelece os parâmetros que possibilitam avaliar se um indivíduo é adaptado ou não.

O AG foi desenvolvido por [HOLLAND, 1975] como método de otimização na qual uma população de indivíduos é identificada por seu código genético cujas características são passadas para as gerações seguintes onde os melhores indivíduos terão maior chance de se reproduzir, garantindo uma melhoria dos indivíduos/soluções subseqüentes.

A seguir são descritos as principais definições relacionadas com algoritmos genéticos, segundo [KLIR, 1995], [BRANDT, 1998], [CASTRO, 2001] e [GOLDBERG, 1989].

- **Cromossomo**- Cadeia de caracteres representando alguma informação relativa às variáveis do problema. Cada cromossomo representa deste modo uma solução do problema;
- **Gen ou Gene**- É a unidade básica do cromossomo. Cada cromossomo tem um certo número de genes, cada um descrevendo uma certa variável do problema.
- **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 através do genótipo;
- **População**- Conjunto de cromossomos ou soluções;
- **Geração**- O número da iteração que o Algoritmo Genético executa;
- **Operações Genéticas**- Operações que o Algoritmo Genético realiza sobre cada um dos cromossomos.
- **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 do processo de seleção e cruzamento, sendo responsável pela diversidade dos indivíduos, através de modificações na estrutura genética de alguns poucos cromossomos;
- **Espaço de Busca ou Região Viável**- É o conjunto, espaço ou região que compreende as soluções possíveis ou viáveis do problema a ser otimizado. Deve ser caracterizado pelas funções de restrição, que definem as soluções viáveis do problema a ser resolvido.
- **Função Objetivo ou de Avaliação**- É a função que se quer otimizar. Esta contém a informação numérica do desempenho de cada cromossomo na população. Na função objetivo estão representadas as características do problema que o Algoritmo Genético necessita para realizar seu objetivo, sendo expressa normalmente como:

$$\text{Obj} = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Onde x_1, x_2, \dots, x_n são as variáveis que o algoritmo procura determinar para otimizar Obj. Esta função é, em princípio calculada para cada indivíduo da população.

- **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;

O algoritmo 3 apresenta um exemplo de algoritmo genético apresentado por [LEMONGE, 1999].

Algoritmo genético genérico

Inicialize a população

Avalie indivíduos na população

Repita

 Selecione indivíduos para reprodução

 Aplique operadores de recombinação e mutação

 Avalie indivíduos na população

 Selecione indivíduos para sobreviver

Até critério de parada satisfeito

Fim

Algoritmo 3 – Algoritmo Genético Genérico

5 OTIMIZAÇÃO PELO MÉTODO DO ENXAME DE PARTÍCULAS (PSO)

5.1 HISTÓRICO

O método de otimização por enxame de partículas (Particle Swarm Optimization – PSO) foi desenvolvido por Kennedy e Eberhart, em 1995 [KENNEDY e EBERHART, 1995], a partir da modelagem matemática que implementa uma metáfora do comportamento social de um grupo de pássaros a procura de alimento ou de um lugar para construir o ninho constituindo uma técnica de computação estocástica, oriunda do trabalho do biólogo Frank Heppner, que analisou o comportamento, conforme ilustrado na Figura 22.



Figura 22 – Representação do método Enxame de Partículas

Ao observar o comportamento desses grupos observa-se que quando um pássaro encontra o alimento, por exemplo, todos os demais passam a encontrá-lo também, mais rapidamente. Segundo [GOMES, 2004], O que acontece é um aprendizado por parte do bando no momento que um dos pássaros adquire determinado conhecimento. Prado e Saramago [PRADO e SARAMAGO, 2005] chamam esse processo de “inteligência social”.

O método Enxame de partículas é semelhante aos métodos de computação evolutiva em que, uma população (enxame), formada por indivíduos (partículas) vasculham o espaço de busca à procura de uma solução apropriada para um determinado problema. Contudo, na otimização por enxame de partículas, cada indivíduo tem uma velocidade, responsável pela exploração do espaço (evolução) e uma memória, para guardar a melhor posição já visitada [EBERHART et al, 1996]. Além disso, o algoritmo considera também, a melhor posição encontrada pela população.

Segundo [PARSOPOULOS e VRAHATIS, 2002], cada partícula é tratada como um ponto dentro do espaço de busca, que ajusta seu próprio “vôo” de acordo com sua própria experiência, bem como a experiência do “vôo” de outras partículas.

5.2 ALGORITMO BÁSICO

O algoritmo PSO básico consiste de três passos: i) geração de posições e velocidades de partículas, ii) atualização da velocidade e, finalmente, iii) atualização da posição.

Primeiramente, as posições, x_0^i , e velocidades, v_0^i , do enxame inicial de partículas são gerados aleatoriamente usando-se os limites máximos e mínimos dos valores das variáveis, x_{\max} e x_{\min} , como expressado nas equações 4.1 e 4.2. As posições e velocidades são dadas em formato de vetor com sobrescritos e subscritos denotando a *i-ésima* partícula no tempo k . Nas equações 4.1 e 4.2, *rand* é uma variável aleatória de distribuição uniforme que pode tomar qualquer valor entre 0 e 1. Este processo de inicialização leva o enxame de partículas a ser aleatoriamente distribuído no espaço [HASSAN et al, 2004].

$$x_0^i = x_{\min} + rand(x_{\max} - x_{\min}) \quad (4.1)$$

$$v_0^i = \frac{x_{\min} + rand(x_{\max} - x_{\min})}{\Delta t} = \frac{\text{posição}}{\text{tempo}} \quad (4.2)$$

O segundo passo é atualizar as velocidades de todas as partículas no tempo $(k+1)$ usando os valores de *fitness* que são funções das posições atuais das partículas no espaço no tempo k . O valor da *fitness* da partícula determina qual partícula tem o melhor valor global no enxame atual, p_k^g , e também determina a melhor posição de cada

partícula através do tempo, p^i , isto é, na atual e em todas as iterações anteriores. A fórmula da atualização da velocidade usa estas duas informações para cada partícula no enxame com o efeito do movimento atual, v_k^i , prover a direção de busca, v_{k+1}^i , para a próxima iteração. A fórmula de atualização da velocidade inclui alguns parâmetros aleatórios, representados pelas variáveis uniformemente distribuídas, $rand$, para tentar obter uma cobertura de todo o espaço de busca e evitar que se fique preso em um ótimo local. Os três valores que afetam a nova direção de busca, seu atual movimento, a memória própria da partícula e a influência do enxame, são incorporados através de uma soma, como mostrado na equação 4.3, com três fatores de ponderação, denominados fator de inércia, w , um fator de individualidade, c_1 , e um fator de identidade de grupo, c_2 .

$$v_{k+1}^i = \underbrace{wv_k^i}_{\text{movimento atual}} + \underbrace{c_1 rand \frac{(p^i - x_k^i)}{\Delta t}}_{\text{influência da memória da partícula}} + \underbrace{c_2 rand \frac{(p_k^g - x_k^i)}{\Delta t}}_{\text{influência do enxame}} \quad (4.3)$$

A atualização da posição é o último passo em cada iteração. A posição de cada partícula é atualizada usando seu vetor velocidade como mostrado na Equação 4.4.

$$x_{k+1}^i = x_k^i + v_{k+1}^i \Delta t \quad (4.4)$$

As três etapas de atualização da velocidade, atualização da posição e cálculo de *fitness* são repetidas até que o critério de convergência desejado seja alcançado.

O intervalo de tempo Δt é substituído por iterações, recebendo valor unitário. Pode ainda funcionar como valor de escala para aumentar a influência da memória da partícula e do enxame sobre o movimento atual.

No algoritmo de PSO clássico, as variáveis podem assumir qualquer valor, mesmo fora de seus limites de restrição. Este fenômeno pode levar à divergência. Para evitar este problema, no presente trabalho, quando as variáveis violarem seus limites mínimos ou máximos elas são artificialmente trazidas novamente para dentro dos limites através da anulação do termo de movimento atual.

$$v_{k+1}^i = c_1 rand \frac{(p^i - x_k^i)}{\Delta t} + c_2 rand \frac{(p_k^g - x_k^i)}{\Delta t} \quad (4.5)$$

De posse de todas essas informações, o algoritmo básico da otimização por enxame de partículas pode ser brevemente descrito da seguinte forma: dada uma população inicial de partículas, atualiza-se o vetor velocidade de cada agente até que se atinja o critério de parada. A figura 23 ilustra esta lógica.

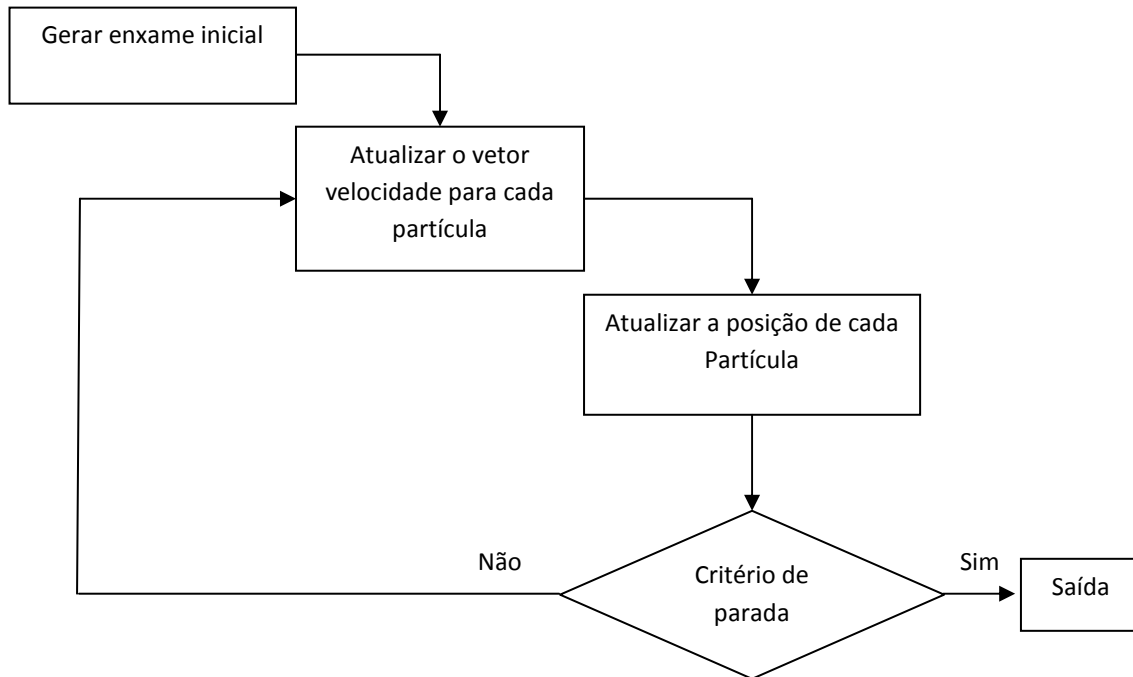


Figura 23 – Fluxograma geral para ilustrar a lógica de um algoritmo PSO

5.3 ATRAÇÃO SOCIAL

A Atração Social foi desenvolvida por [ALBRECHT, 2005], para tornar a exploração do espaço mais abrangente, pois através de experimentos verificou-se que havia uma tendência do enxame a migrar rapidamente para a região do melhor ponto obtido até aquele momento.

Este termo é similar ao de [HE et al., 2004], porém utiliza-se o centróide do enxame ao invés de usar uma partícula escolhida aleatoriamente.

A equação 4.6 mostra o termo que representa a Atração Social que foi incluída no código.

$$c_3 rand \frac{(C - x_k^i)}{\Delta t} \quad (4.6)$$

Onde,

$$C = \frac{\sum_{k=1}^N x_k^i}{N} \quad (4.7)$$

Buscando uma melhoria no rendimento do método, foi feita uma alteração no termo da atração social, utilizando no lugar do centróide do enxame, um “centro de massa”, onde a massa de cada partícula é representada pelo valor da função no ponto.

Dessa forma C fica expresso por:

$$C = \frac{\sum_{k=1}^N f_k x_k^i}{\sum_{k=1}^N f_k} \quad (4.8)$$

5.4 VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS

Inércia

A componente inercial controla a busca global, levando a partícula a explorar mais o espaço de busca, o que é muito bom nas iterações iniciais, mas que traz uma dificuldade para o PSO em convergir para o ótimo nas iterações finais, visto que esta componente tende a manter a partícula na velocidade anterior.

Para equacionar esta questão o fator de inércia da Eq. (4.3) é variável. Sua implementação no ProgOtim, utilizado neste trabalho é a não-linear apresentada por [CHATTERJEE e SIARRY, 2004] como segue:

$$w_i = \left\{ \frac{(N-i)^n}{N^n} \right\} * (w_{ini} - w_{fin}) + w_{fin} \quad (4.9)$$

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

O expoente de não linearidade n pode ser definido pelo usuário e, neste trabalho, foi utilizado $n = 1,2$

O PSO pode ainda ser implementado com inércia fixa ou linear.

Memória da Partícula, Memória do Enxame e Social (Enxame Instantâneo)

Estas componentes tendem a agrupar as partículas em torno de máximos, levando a uma busca local.

O controle dos coeficientes da equação para cada termo permite o balanço entre busca global e local.

A melhor solução foi obtida reduzindo-se a inércia ao longo das gerações e aumentando-se as outras parcelas.

6 APLICAÇÕES: DESCRIÇÃO DOS MODELOS E MOTODOLOGIA

6.1 INTRODUÇÃO

São descritos neste capítulo os modelos estudados bem como a metodologia aplicada na otimização. Também apresenta-se a modelagem do casco e das linhas através do programa de análise acoplada SITUA/PROSIM, os dados ambientais e o diagrama de *offset*.

Os resultados obtidos estão devidamente apresentados no capítulo 7.

6.2 SISTEMA ACOPLADO ANCORAGEM-RISER-CASCO – SITUA/PROSIM

Os exemplos utilizados neste trabalho foram modelados no programa SITUA/PROSIM, constituindo sistemas acoplados de ancoragem, *risers* e casco, podendo ser executadas análises estáticas ou dinâmicas com a formulação explicitada no capítulo 3.

Os principais módulos do SITUA para montagem e análise de modelos de ancoragem são: modelagem da Unidade Flutuante, modelagem das linhas, dados ambientais e diagrama de *offset*, que serão descritos abaixo.

6.2.1 Modelagem da Unidade Flutuante

Este módulo do SITUA permite a modelagem da UF considerando quatro conjuntos de dados resumidos abaixo:

Primeiramente a geometria, que pode ser descrita por um conjunto de cilindros, ideal para plataformas semi-submersíveis; como um navio ou como movimento prescrito.

Após a definição da geometria é determinada a posição que são seus dados referentes à posição da UF no sistema global.

Em seguida os dados de massa são adicionados como deslocamento, raio de giração, centro de gravidade e todos os dados referentes a massa da UF.

Para finalizar a modelagem da UF são atribuídos os coeficientes: a representação do comportamento hidrodinâmico que podem ser oriundos de outros programas como o WAMIT [LEE, 1998], bem como os coeficientes para cálculo das forças de vento e correnteza podem ser definidos.

No presente trabalho são utilizados conjuntos de cilindros para modelagem do casco da UF.

6.2.2 Linhas

As principais características para modelagem das linhas, ancoragem ou *risers*, no SITUA são:

- **Geometria** – A catenária é descrita obedecendo a projeção horizontal, a tração total no topo, a força horizontal ou ângulo de topo;
- **Composição** – No caso do *riser* pode ser aço (*riser* rígido), *riser* flexível; para ancoragem tem-se cabo de aço, amarra, poliéster, etc.;
- **Malha de Elementos** – Determinação da graduação da malha de elementos finitos para os segmentos que compõem a linha;
- **Condições de Contorno** – Podem ser definidas nó a nó ou para casos gerais o próprio sistema aplica as condições padrão;
- **Tipo de Elemento Finito** – Treliça ou Pórtico;
- **Orientação Espacial** – Ângulo que a linha faz com a direção Norte.

6.2.3 Dados Ambientais

O SITUA permite a modelagem de correnteza, estado de mar (com ondas uni ou bidirecionais), vento e fundo.

A correnteza é inserida como um perfil de velocidade em função da profundidade, que pode variar de direção e intensidade.

A onda pode ser modelada com regular ou irregular. No primeiro caso deve-se inserir a amplitude, período e direção para cada componente de onda. Para onda irregular utiliza-se os espectros de Jonswap ou Pierson Moskowitz e, ainda, para onda bidirecional deve-se definir um conjunto de dados para as duas direções de propagação da onda.

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

6.2.4 Diagrama de *Offset*

Após a modelagem completa do sistema, com um simples clicar de um botão, pode obter um diagrama que mostra o passeio da UF, analisando-se a posição de equilíbrio que a embarcação assumirá quando submetida a diversos carregamentos.

Uma análise estática acoplada é feita para as oito direções possíveis de ocorrências de correntezas em uma dada região que são Norte, Nordeste, Leste, Sudeste, Sul, Sudoeste, Oeste e Noroeste, já incluídas no modelo e lidas automaticamente, para um determinado período de recorrência.

O módulo do SITUA denominado Análise de *Offset* gerencia todos os dados ambientais, carregando-os automaticamente do banco de dados e efetua uma análise estática acoplada para cada direção e fornece o resultado em forma de gráfico, o “Diagrama de *Offset*”, conforme figura 24.

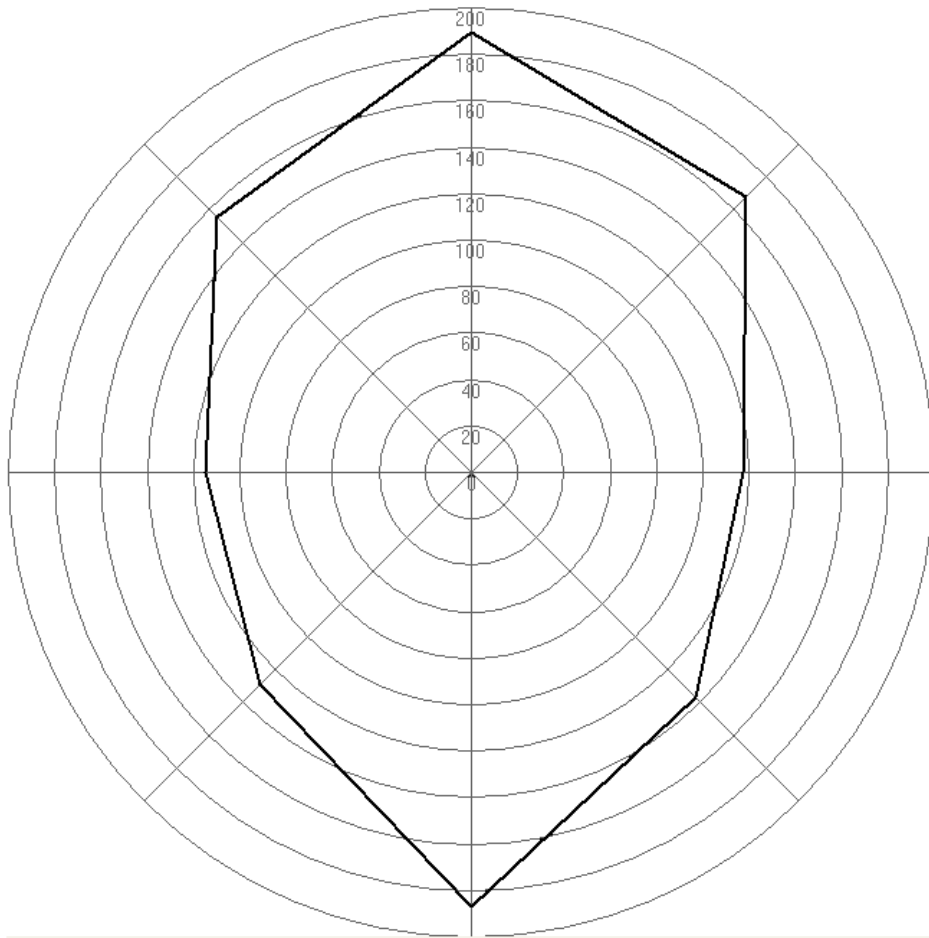


Figura 24 – Diagrama de *Offset*

6.3 MODELOS ESTUDADOS

Para gerar e analisar os modelos apresentados neste trabalho foi utilizado o programa SITUA.

Como já citado anteriormente no item 1.3 foi escolhido o método PSO para otimização do sistema de ancoragem.

A seguir são apresentados os modelos utilizados.

6.3.1 Modelo 1 - P1

Este modelo, denominado P1, é fundamentalmente o mesmo utilizado por [ALBRECHT, 2005], na otimização do sistema de ancoragem, porém neste trabalho o raio de ancoragem será variável. A proposta é melhorá-lo ainda mais utilizando a variação dos raios de ancoragem e dos azimutes das linhas. Trata-se de um modelo simples, mas assimétrico, composto por oito linhas de ancoragem, com arranjo inicial simétrico e 5 *risers* com arranjo assimétrico, todos voltados para o Norte.

O casco utilizado neste modelo tem seus dados descritos abaixo e pode ser visualizado na figura 25.

Peso: 23800 toneladas;

Calado de projeto: 22,2 m;

Comprimento: 106 m

Boca: 65 m;

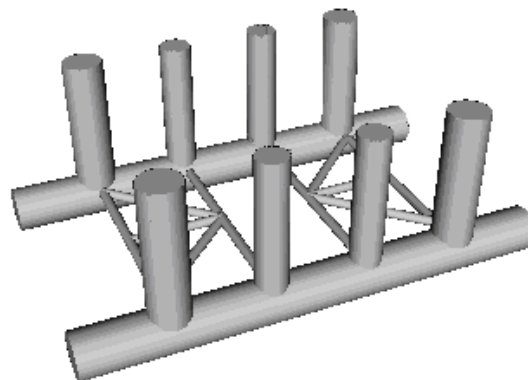


Figura 25 – Casco da plataforma P1

A lâmina d'água utilizada foi de 2400 m e as linhas de ancoragem foram divididas em três segmentos utilizando amarra nas extremidades e cabo de poliéster no trecho intermediário, sua composição está descrita abaixo:

Tabela 2 – Composição das linhas do modelo P1

Segmento	Comprimento(m)	Material	Diam (m)	MBL (kN)
Topo	250	Amarra	0,16	21234,00
Intermediário	3000	Poliéster	0,20	10987,00
Fundo	700	Amarra	0,16	21234,00

Para os *risers* foi utilizado o material de *riser* flexível, com 0.277 m de diâmetro do banco de dados do SITUA.

A figura 26 mostra a disposição das linhas do modelo estudado.

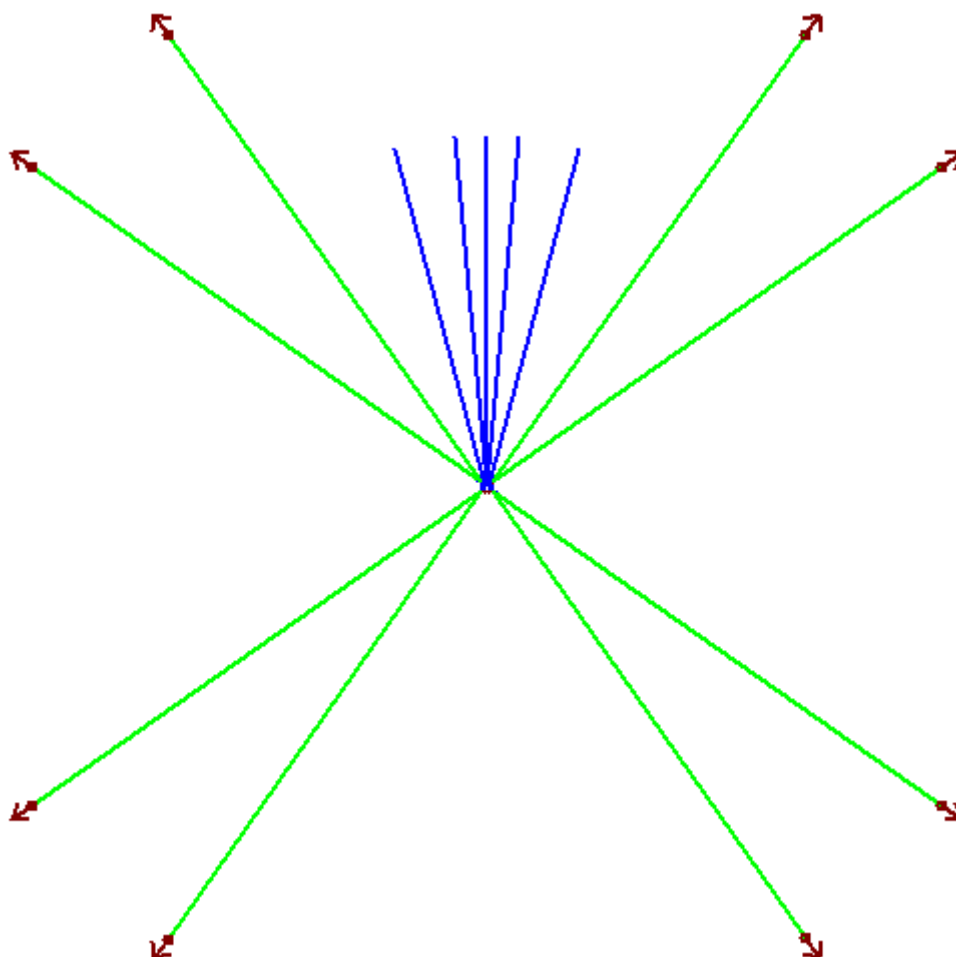


Figura 26 – Arranjo das linhas do modelo P1

Na figura 27 pode-se observar, de forma tridimensional, todo o sistema e perceber nitidamente sua assimetria.

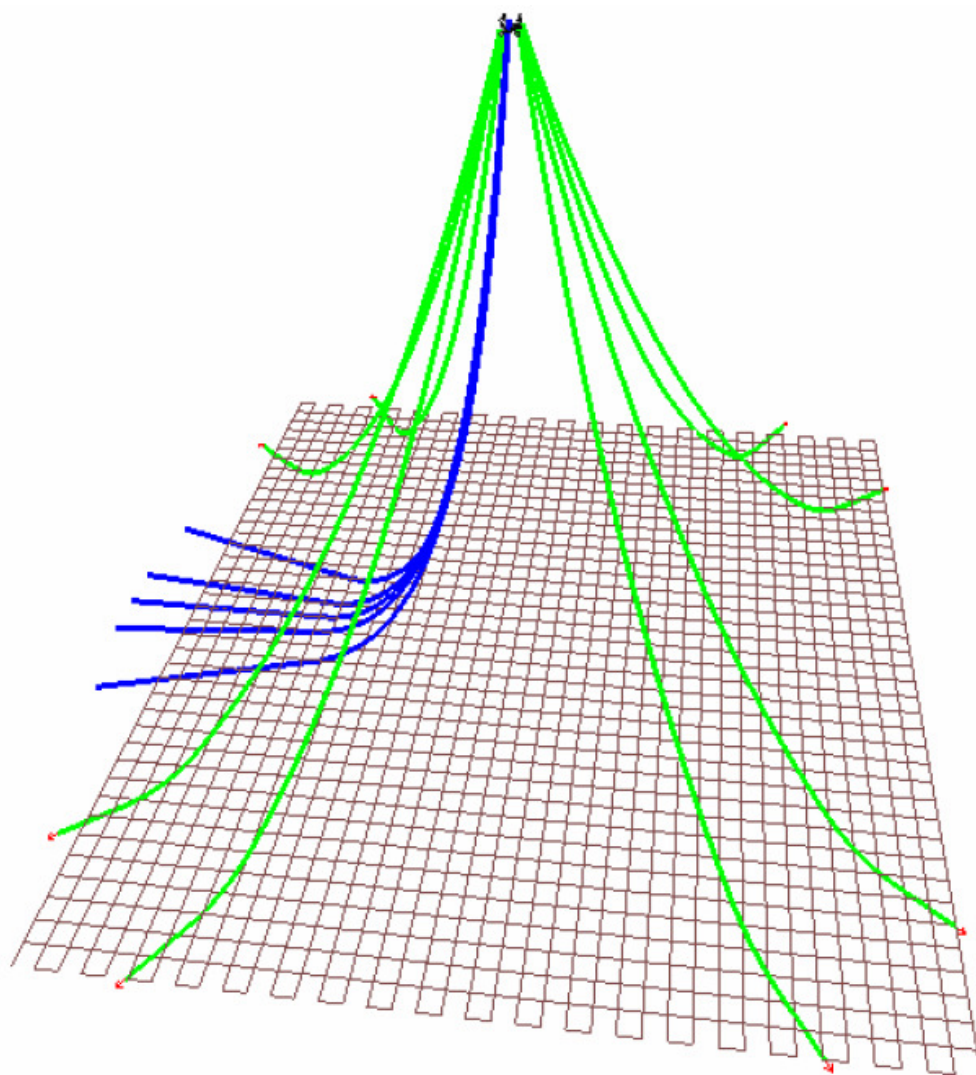


Figura 27 – Vista tridimensional do modelo P1

6.3.2 Modelo 2 - P2

Este modelo é formado por um conjunto de 16 linhas de ancoragem distribuídas inicialmente de forma simétrica e com 14 *risers*. Ele apresenta uma complexidade bem superior em relação ao modelo P1 descrito na seção anterior.

Os dados do casco (figura 28) vêm apresentados a seguir:

Peso: 67900 toneladas;

Calado de projeto: 27,5 m;

Comprimento: 88 m

Boca: 88 m;

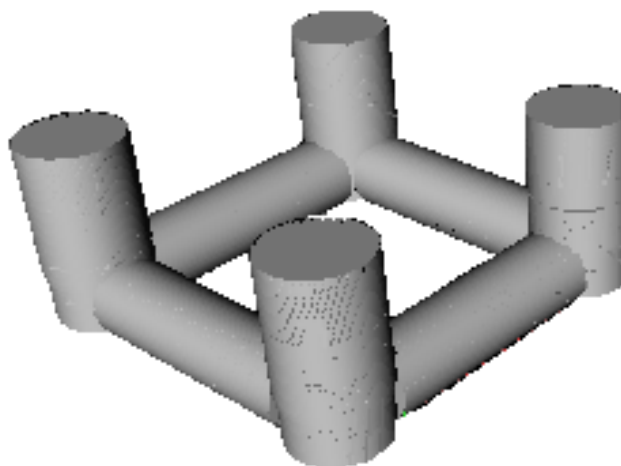


Figura 28 – Casco do modelo P2

A lâmina d'água arbitrada para este modelo foi de 1800 m e as linhas de ancoragem foram decompostas em três segmentos utilizando amarra nas extremidades e cabo de poliéster no trecho intermediário, sua composição está descrita a seguir:

Tabela 3 – Composição das linhas do modelo P2

Segmento	Comprimento(m)	Material	Diam (m)	MBL (kN)
Topo	60,75	Amarra	0,21	11047
Intermediário	2530	Poliéster	0,21	12263
Fundo	1000	Amarra	0,21	11047

Para os *risers* foi utilizado o material de *riser* flexível, porém possuem configuração variada, alguns com 8'', e outros com 7'', buscando um caso real.

Na figura 29 tem-se a disposição das linhas do modelo P2.

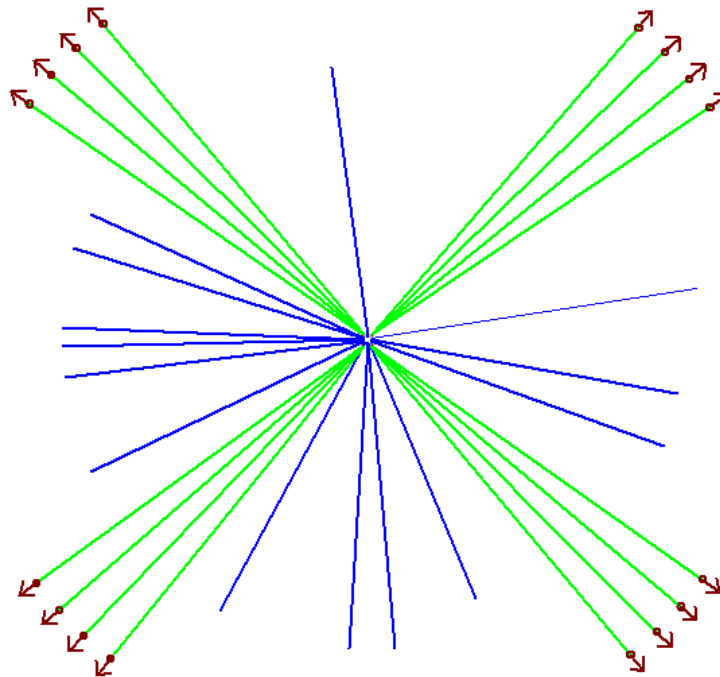


Figura 29 – Disposição das linhas do modelo P2

A figura 30 mostra a visão tridimensional do modelo P2.

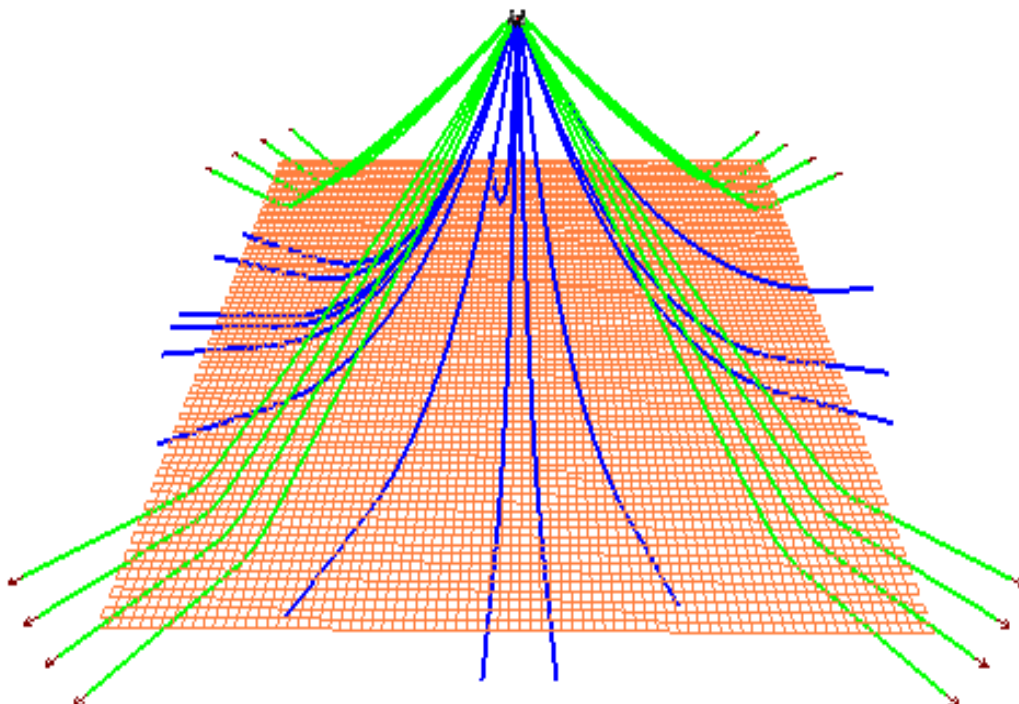


Figura 30 – Vista tridimensional do modelo P2

6.3.3 Modelo 3 – P3

O modelo P3 é constituído por 80 cilindros, 20 linhas de ancoragem dispostas de forma simétrica e 19 *risers*, um modelo ainda mais real e complexo do que o modelo P2 apresentado na seção anterior.

Os dados do casco (figura 31) estão apresentados a seguir:

Peso: 61864 toneladas;

Calado de projeto: 18,3 m;

Comprimento: 88 m

Boca: 88 m;

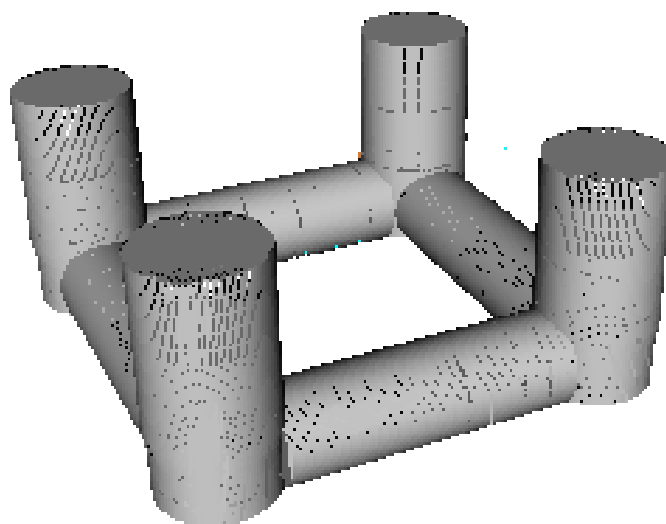


Figura 31 – Casco do modelo P3

O modelo P3 apresenta uma lâmina d'água de 1800 m e é formado por um conjunto de 20 linhas de ancoragem e 19 *risers* do tipo flexível, de configuração variada simulando um caso real.

As linhas de ancoragem são formadas por três segmentos como mostra a tabela 4.

Tabela 4 – Composição das linhas do modelo P3

Segmento	Comprimento(m)	Material	Diam (m)	MBL (kN)
Topo	150	Amarra	0,111	11856
Intermediário	2000	Poliéster	0,201	10987
Fundo	150	Amarra	0,111	11856

A figura 32 mostra a disposição das linhas e a figura 33 a vista tridimensional do modelo P3.

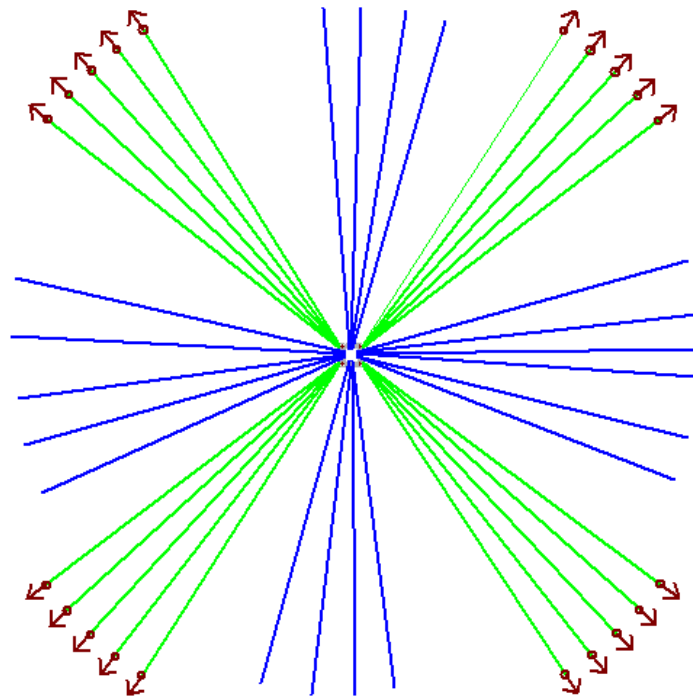


Figura 32 – Disposição das linhas do modelo P3

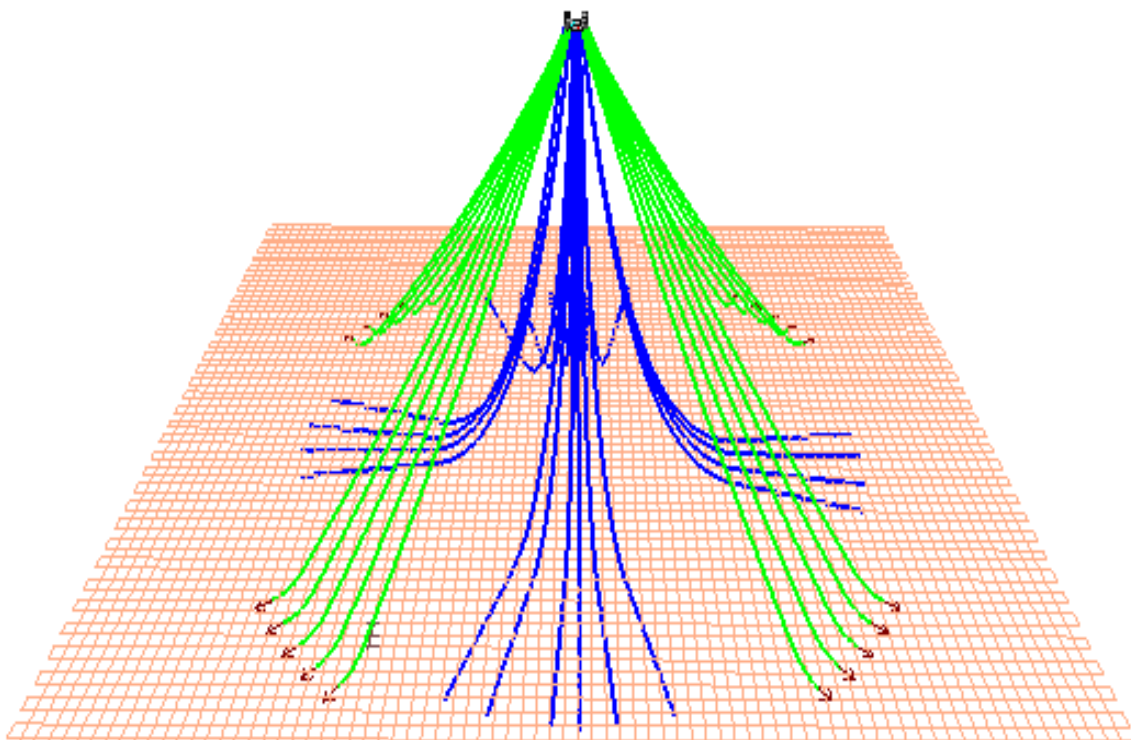


Figura 33 – Vista tridimensional do modelo P3

6.4 DADOS AMBIENTAIS COMUNS A TODOS OS MODELOS

Serão aplicados os carregamentos ambientais de correnteza e a parcela estática do vento, tendo em vista que será efetuada apenas a análise estática.

Os carregamentos de correnteza foram aplicados em oito direções: Norte, Nordeste, Leste, Sudeste, Sul, Sudoeste, Oeste e Noroeste, com período de recorrência de 100 anos.

Para o carregamento de vento foi utilizado o período de recorrência de 10 anos.

O SITUA apresenta um recurso que permite a importação dos dados Meteo-Oceanográficos da ET-3000.00-1000-941-PPC-001 [PETROBRAS, 1999], de onde foram extraídos ambos os carregamentos.

O fundo utilizado no modelo P1 é plano e com inclinação de 0°, no modelo P2 o fundo também é plano, contudo tem inclinação de 2° - Norte, no modelo P3 o fundo é plano com inclinação de 0°.

6.5 METODOLOGIA DE OTIMIZAÇÃO

Os modelos descritos nas seções anteriores foram otimizados utilizando o método do Enxame de Partículas (PSO). A seguir será apresentada toda a metodologia utilizada na otimização dos modelos.

Variáveis Livres

As variáveis livres escolhidas para a otimização do sistema de ancoragem são três: o raio de ancoragem, a tração de trabalho média e o azimute das linhas.

A composição de cada linha, como o tipo de material utilizado e o número de segmentos permaneceu inalterada.

Dessa forma, o modelo P1 tem 17 dimensões sem utilizar o agrupamento das linhas de ancoragem: o azimute das 8 linhas de ancoragem, o raio de ancoragem para cada linha e a tração de trabalho média. Com o agrupamento das linhas de ancoragem por corner tem-se uma redução para 9 dimensões: o azimute dos 4 corners, o raio de ancoragem para cada corner e a tração de trabalho média.

Já o modelo P2 sem agrupamento das linhas de ancoragem, apresenta 33 dimensões: o azimute das 16 linhas de ancoragem, o raio de ancoragem de cada linha e a tração de trabalho média. Utilizando o agrupamento das linhas de ancoragem, este modelo P2, apresenta uma grande redução do número de dimensões sendo apenas 9: o azimute dos 4 corners, o raio de ancoragem para cada corner e a tração de trabalho média.

O modelo P3 possui 9 dimensões: o azimute dos 4 corners, o raio de ancoragem para cada um dos 4 corners e a tração de trabalho média.

Função Objetivo e Restrição

A função objetivo utilizada é o *offset* da plataforma, que desejamos que seja mínimo. A expressão utilizada para este fim é:

$$f = e^{\frac{k^* \cdot \text{offset}}{\text{profund}}} \quad (6.1)$$

Onde:

Offset – Maior *offset*, em metros, da plataforma entre as oito direções analisadas.

Profund – profundidade, em metros, da locação analisada.

k – Fator de ajuste.

Foi escolhido $k = 8$, pois com *offsets* pequenos a variação da função mostra-se mais significativa com este valor como pode-se observar na figura 34.

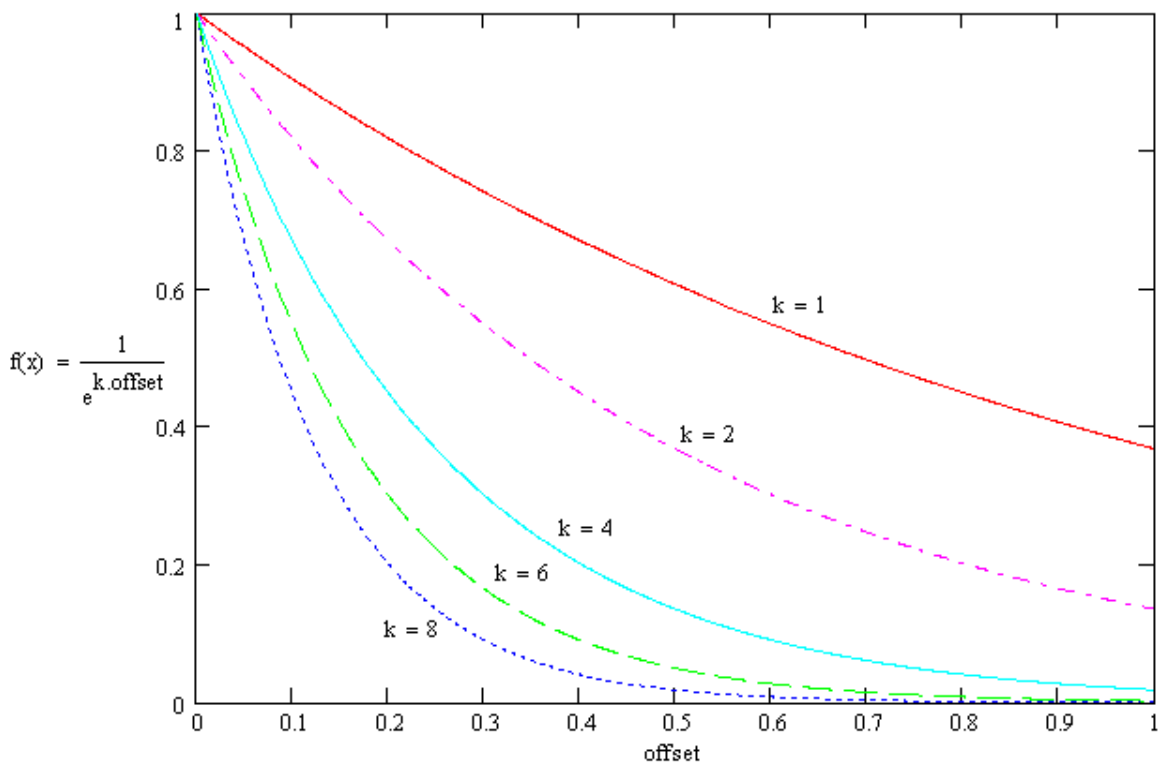


Figura 34 – Escolha do valor do k

Para alcançar o objetivo, i.e., redução do *offset* da plataforma pode-se diminuir o raio de ancoragem bem como aumentar a tração de trabalho. No entanto, a [API, 2001] recomenda que a tração que a linha está submetida não ultrapasse 50% da tração de ruptura (MBL) quando aplicada a análise estática. E, ainda, a tração não deve ser inferior a 30% da tração de ruptura da linha (MBL) devido às características operacionais da linha. Se aplicada a análise dinâmica, a recomendação da [API, 2001], é que a esta tração não ultrapasse 60% da tração de ruptura (MBL), para a situação intacta.

Contudo, o foco deste trabalho é estudar o procedimento de otimização, sendo assim empregadas análises estáticas e, portanto as penalizações associadas à estática.

Para tanto foram utilizadas funções de penalidade descritas a seguir:

$$Pen03 = \begin{cases} e^{-0.3 \frac{TracMax}{MBL}}, & \text{se } \frac{TracMax}{MBL} \leq 0.3 \\ 0, & \text{se } \frac{TracMax}{MBL} > 0.3 \end{cases} \quad (6.2)$$

E

$$Pen06 = \begin{cases} e^{\frac{TracMax}{MBL} - 0.5}, & \text{se } \frac{TracMax}{MBL} \geq 0.5 \\ 0, & \text{se } \frac{TracMax}{MBL} < 0.5 \end{cases} \quad (6.3)$$

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 é descrita como se segue:

$$f_{obj} = \frac{1}{f + pen03 + pen06} \quad (6.4)$$

Desta forma, quanto maior o valor da função objetivo menor será o *offset* da plataforma.

6.5.1 Algoritmo de Otimização – O ProgOtim

Como dito anteriormente utilizou-se o programa ProgOtim para a otimização dos sistemas de ancoragem. O ProgOtim lê os modelos gerados no SITUA e partir deles são gerados os indivíduos utilizando as variáveis livres citadas na seção anterior que são o raio de ancoragem, o azimute de cada linha ou de cada corner e a tração de trabalho. A figura 35 mostra a variação possível para estas variáveis, bem como a opção do agrupamento das linhas de ancoragem, que são fornecidas pelo usuário.

	Minimo	Maximo	Precisão	Vel. Máxima
Alfa :	-5	5	0.1	1
Raio :	200	2000	10	500
Tração :	100	600	5	500

Agrupa Linhas por "Corner"
 Raio Variável por Linha ou por "Corner"
 Número de "Corners" =

Figura 35 – Variáveis livres

Na tela seguinte do ProgOtim (figura 36) foram definidos os parâmetros utilizados no método Enxame de Partículas:

- **Tamanho da População:** 10 indivíduos;
- **Número Máximo de Gerações:** 30;
- **Critério de Parada:** Média maior ou igual a 95% do melhor indivíduo durante 3 gerações consecutivas;
- **Variação não linear da inércia:** $k = 1,2$;
- **Atração Social** ao “centro de massa”

OPÇÕES DE ALGORITMO :

Algoritmo Genético Clássico
 Algoritmo Genético com Micro-populações
 Sistema Imunológico Artificial - CLONALG
 PSO

Outras Opções :

Save Relatório detalhado
 Histórico Imprime Binário
 Restart Log de Catenária
Codificação :
 Binária Real
 Usar semente fixa
 Usar indivíduo original (Seeding)
 Desenha segundo Melhor Anticorpo
 Imprimir Indivíduos

CRITÉRIOS DE PARADA :

Numero Maximo de Gerações
 Valor Limite para a função objetivo
 Média Estacionária
 Média Dentro de um percentual do Melhor
 Média Estac. E Dentro de um perc. do melhor

Parâmetros :

Numero Máximo de Gerações :
 Valor Limite para a Função objetivo :
Parada por Média :
 Número Gerações :
 Percentual do melhor :

Parâmetros PSO :

Tamanho da População :

Coefficiente da Velocidade :

Variando
 Global :
 Local :
 Social :

Usar Atração Social

Controle de Inercia :

Fixa
 Variação Linear
 Variação não linear
 Proporcional à distancia
 Proporcional ao Fitness
 K :

Figura 36 – Parâmetros do PSO

Raio de ancoragem

A variação do raio de ancoragem nos modelos P1 e P2 foi definida com limite inferior de 1500 m e superior de 3000 m, o modelo P3 ficou com o limite inferior de 200 m e superior de 2000 m..

Desenvolveu-se para este trabalho, uma abordagem de agrupamento dos raios de ancoragem por corner implementado do ProgOtim, para uma segunda análise dos modelos P1 e P2 e a análise do modelo P3, i.e, todas as linhas de ancoragem de uma mesma direção, terão raios únicos, tornando mais adequada a aplicação deste sistema num caso real por facilitar a instalação das âncoras.

Azimute

O ângulo alfa da figura 35 refere-se à variação permitida para o azimute das linhas, que no modelo P1 variou de -10° a 10° , no P2 de -5° a 5° para todas as linhas quando não houve o agrupamento destas.

Desenvolveu-se também, para este trabalho, associado ao agrupamento dos raios de ancoragem, citado na seção anterior, uma variação única no ângulo de cada linha de um mesmo corner, igualmente implementado no ProgOtim. Tornando viável tanto a instalação do sistema num caso real quanto ainda evitando o cruzamento das linhas de ancoragem. Na execução dos modelos P2 e P3 com agrupamento das linhas de ancoragem a variação permitida do azimute foi de -5° a 5° por corner.

Como a geração dos indivíduos é feita de forma aleatória, pode acontecer que este indivíduo apresente um cruzamento das linhas de ancoragem (sem agrupamento)ou mesmo de uma linha de ancoragem com um *riser*. Neste caso o indivíduo não será avaliado e receberá um *fitness* muito baixo.

Tração Média de Trabalho

Esta variável é uma tração aplicada em todas as linhas do sistema e utilizada como base para equilíbrio do mesmo.

Devido à assimetria do sistema ele se apresenta desequilibrado. Para obter o equilíbrio necessário ao projeto, é utilizado o método ALFA [KAIZER, 2003] e implementado no ProgOtim da seguinte forma:

$$fator = \frac{\text{Resultante}}{|F_{pos}| + |F_{neg}|} \quad (6.5)$$

Onde:

Resultante é o valor da resultante de desequilíbrio do sistema;

Fpos e **Fneg**, são respectivamente, a soma das componentes projetadas das forças horizontais de cada linha, em que Fpos é a soma das componentes positivas e Fneg das negativas.

As forças horizontais positivas são corrigidas por:

$$F_H = (1 - fator) * F_H \quad (6.7)$$

E as negativas por:

$$F_H = (1 + fator) * F_H \quad (6.7)$$

Depois de corrigidas e definidas as forças horizontais, o SITUA ajusta o comprimento central de cada linha para obter uma catenária que satisfaça o raio de ancoragem e a força horizontal.

Para os três modelos foram utilizados a variação de 980,67 kN a 9806,65 kN na tração da base.

Análise

Após ser lido o modelo gerado no SITUA e todos os parâmetros serem definidos, um simples clicar do mouse aciona o processo de otimização no ProgOtim, onde são executadas oito análises acopladas onde a maior tração e o maior *offset* obtidos são usados para calcular a *fitness* e, o processo é repetido para cada indivíduo da população.

Para poupar custos computacionais, tendo em vista que a análise dinâmica é muito onerosa, apenas a análise estática será realizada.

7 APLICAÇÕES: RESULTADOS OBTIDOS

7.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos na otimização dos modelos descritos no capítulo anterior.

Pode-se comparar o *offset* original com o otimizado bem como os valores das variáveis livres de cada modelo.

Vale a pena ressaltar que as configurações do sistema de ancoragem obtidas aqui não devem ser consideradas como representativas de projetos reais, e servem apenas para ilustrar o ganho que pode se ter com o uso da ferramenta de otimização. Isso porque as avaliações serão feitas apenas através de análises estáticas (já que as análises dinâmicas são onerosas para o uso dos recursos computacionais disponíveis durante a execução dos trabalhos desta dissertação).

Além disso, deve-se considerar também que as variáveis livres consideradas atualmente no processo de otimização são azimute, raio e trações nas linhas; como comentado anteriormente no capítulo 6, uma ferramenta para uso prático na otimização de projetos reais de sistemas de ancoragem deverá considerar também a otimização dos materiais que compõem os segmentos das linhas.

7.2 MODELO P1

Modelo Original

O modelo P1 antes de ser otimizado apresenta um *offset* máximo de 319 m, que representa 13,3% da lâmina d'água, e a linha mais tracionada está com 37,5% da MBL.

A figura 37 mostra o diagrama de *offset* original do modelo P1.

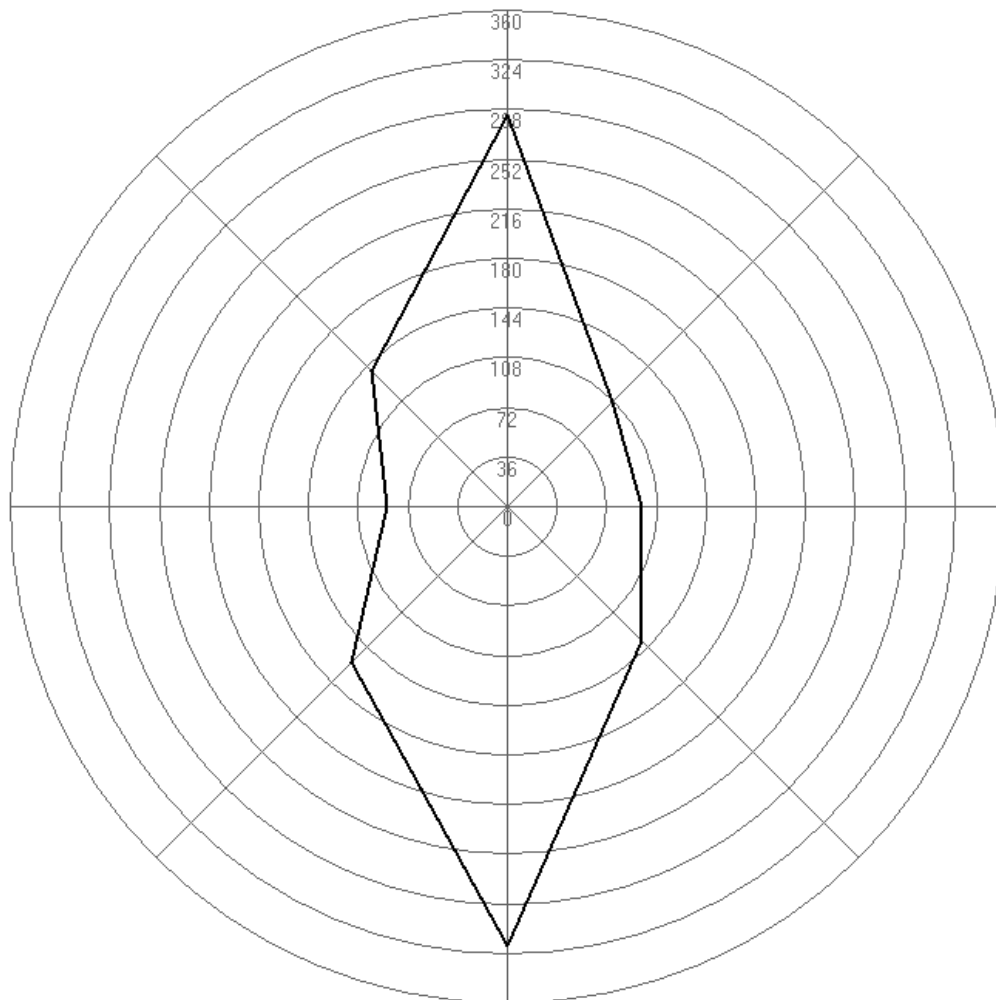


Figura 37 – Diagrama de *Offset* original do modelo P1

Resultados sem agrupamento de linhas de ancoragem por corner

A tabela 5 apresenta um resumo das execuções feitas utilizando o PSO com o modelo P1. Como se trata de um processo aleatório existem poucas chances de se obter um mesmo resultado, dados os mesmos parâmetros iniciais, assim foram feitas cinco execuções e são apresentados o melhor, a média e o desvio padrão entre as execuções. Os valores do melhor, pior e média são referentes ao *fitness* da função, o *offset* é dado em percentual da lâmina d'água e o fator é relativo ao percentual da tração de ruptura da linha mais tracionada (MBL).

Tabela 5: Resultados da Otimização do modelo P1

RESUMO DA OTIMIZAÇÃO					
	Melhor	Pior	Média	Offset(%)	Fator(%)
Melhor entre as cinco execuções	0,441	0,439	0,440	10,23	49,7
Média das cinco execuções	0,430	0,392	0,422	10,558	48,94
Desvio Padrão entre as cinco execuções	0,011	0,058	0,016	0,315	1,184

Pode-se observar uma melhora significativa no *offset* do modelo original em relação ao otimizado além da manutenção da tração nos valores operacionais.

A figura 38 mostra a evolução do algoritmo na otimização deste modelo para a melhor solução apresentada na tabela 5.

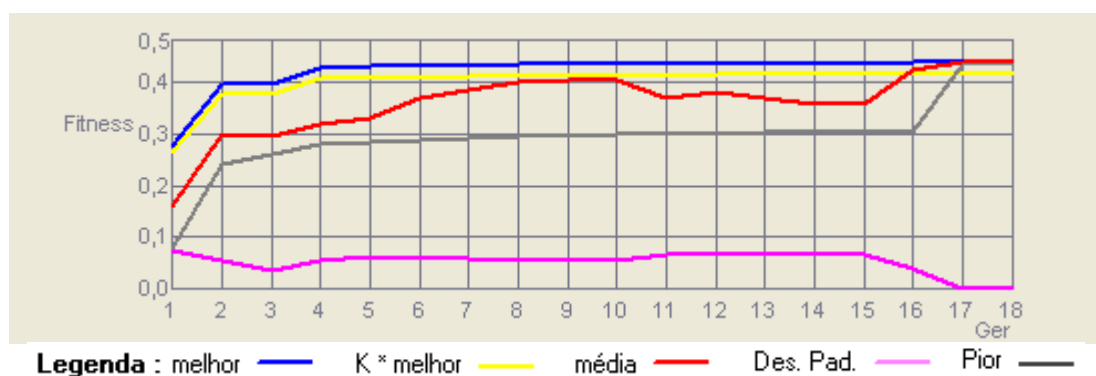


Figura 38 – Evolução do algoritmo na otimização do modelo P1.

A tabela 6 apresenta um comparativo entre as variáveis livres no modelo original e no otimizado.

Tabela 6: Comparativo do modelo P1 original e otimizado.

	Original			Otimizado		
	Raio(m)	Azim(°)	Tração(kN)	Raio(m)	Azim(°)	Tração(kN)
Linha 1	3950,0	305,0	1972,4	3000,0	308,9	2222,93
Linha 2	3950,0	325,0	1972,4	2995,1	328,1	2223,26
Linha 3	3950,0	35,0	1972,4	3000,0	37,5	2222,93
Linha 4	3950,0	55,0	1972,4	3000,0	54,1	2222,93
Linha 5	3950,0	125,0	1972,4	2801,7	128,6	2614,09
Linha 6	3950,0	145,0	1972,4	3000,0	145,2	2613,76
Linha 7	3950,0	215,0	1972,4	3000,0	212,5	2613,76
Linha 8	3950,0	235,0	1972,4	3000,0	234,9	2613,76

As figuras 39, 40 e 41 mostram, respectivamente, o diagrama de *offset*, a distribuição das linhas e a vista tridimensional do modelo otimizado com o melhor resultado como mostra a tabela 5.

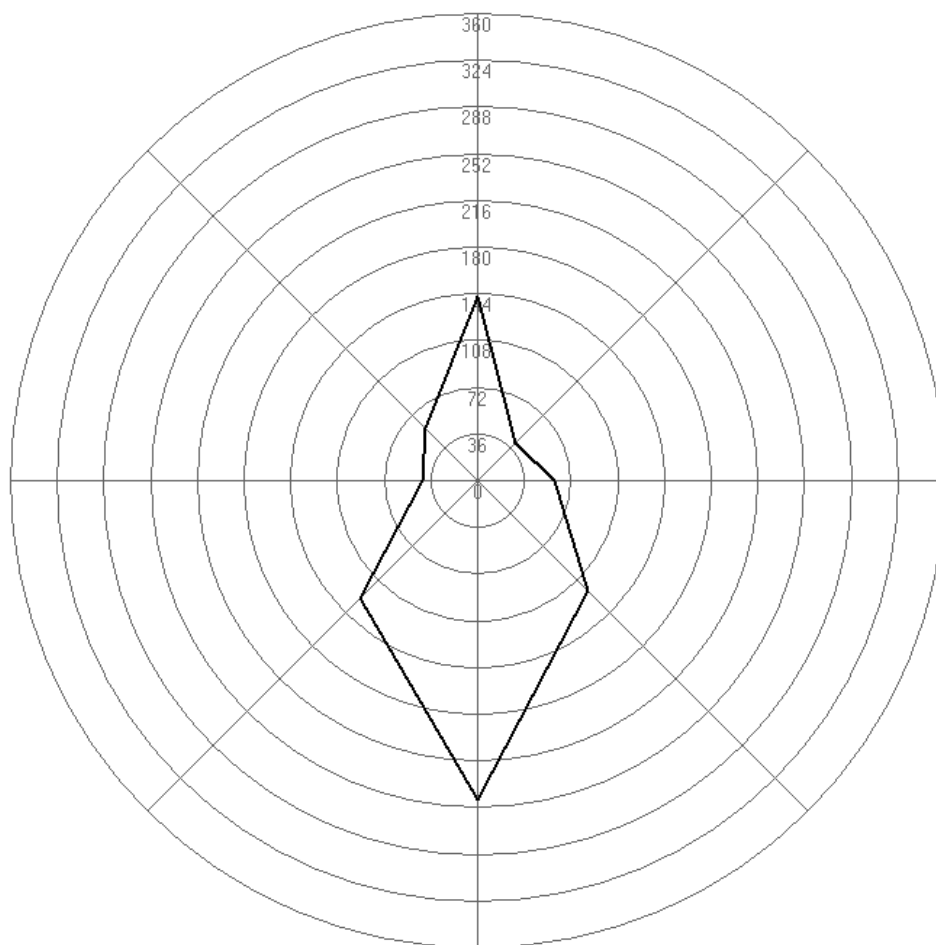


Figura 39 – Diagrama de *Offset* do modelo P1 otimizado sem agrupamento de linhas por corner.

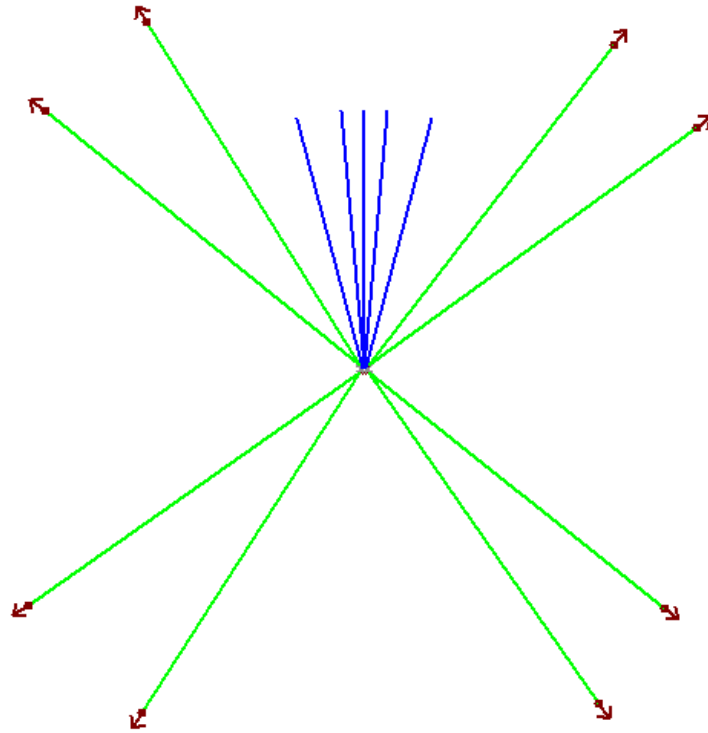


Figura 40 – Disposição das linhas do modelo P1 otimizado sem agrupamento de linhas por corner.

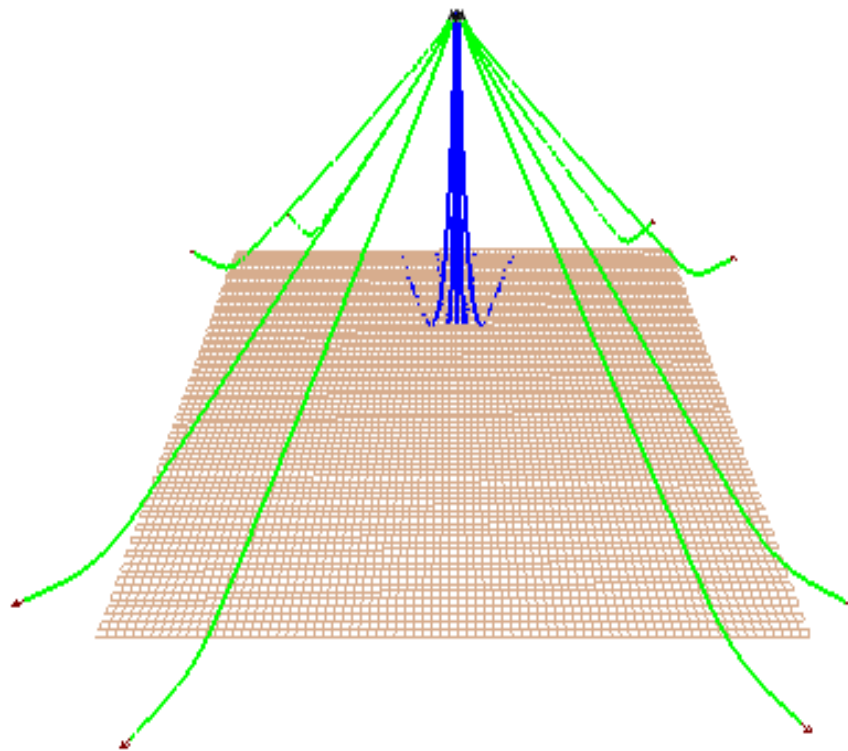


Figura 41 – Vista tridimensional do modelo P1 otimizado sem agrupamento de linhas por corner.

Resultados com agrupamento de linhas de ancoragem por corner

A tabela 7 apresenta um resumo das execuções feitas utilizando o PSO com o modelo P1. Como se trata de um processo aleatório existem poucas chances de se obter um mesmo resultado, dados os mesmos parâmetros iniciais, assim foram feitas cinco execuções e são apresentados o melhor, a média e o desvio padrão entre as execuções. Os valores do melhor, pior e média são referentes ao *fitness* da função, o *offset* é dado em percentual da lâmina d'água e o fator é relativo ao percentual da tração de ruptura da linha mais tracionada (MBL).

Tabela 7: Resultados da Otimização do modelo P1

RESUMO DA OTIMIZAÇÃO					
	Melhor	Pior	Média	Offset(%)	Fator(%)
Melhor entre as cinco execuções	0,472	0,468	0,470	9,4	49,7
Média das cinco execuções	0,458	0,421	0,454	9,708	49,280
Desvio Padrão entre as cinco execuções	0,010	0,064	0,013	0,243	0,683

Pode-se observar uma melhora significativa no *offset* do modelo original em relação ao otimizado além da manutenção da tração nos valores operacionais.

A figura 42 mostra a evolução do algoritmo na otimização deste modelo para a melhor solução apresentada na tabela 7.

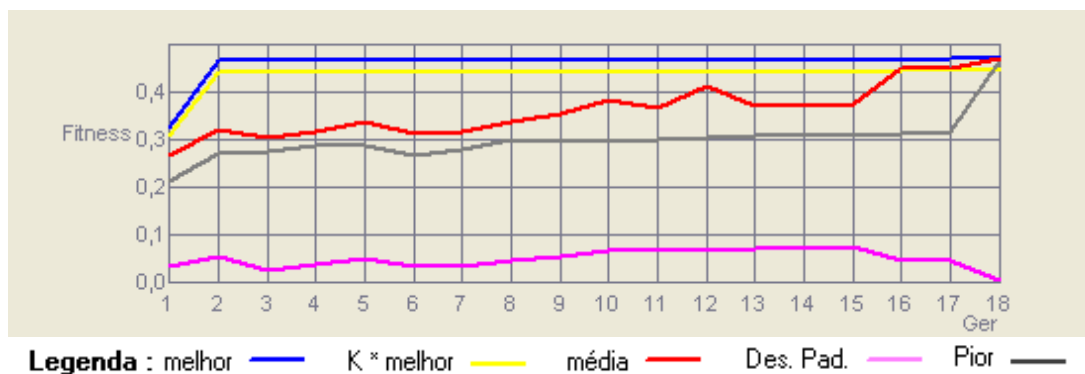


Figura 42 – Evolução do algoritmo na otimização do modelo P1 com agrupamento de linhas por corner.

A tabela 6 apresenta um comparativo entre as variáveis livres no modelo original e no otimizado.

Tabela 8: Comparativo do modelo P1 original e otimizado.

	Original			Otimizado		
	Raio(m)	Azim(°)	Tração(kN)	Raio(m)	Azim(°)	Tração(kN)
Linha 1	3950,0	305,0	1972,4	2942,6	313,3	2128,3
Linha 2	3950,0	325,0	1972,4	2942,6	333,3	2128,3
Linha 3	3950,0	35,0	1972,4	3000,0	29,4	2131,0
Linha 4	3950,0	55,0	1972,4	3000,0	49,4	2131,0
Linha 5	3950,0	125,0	1972,4	3000,0	131,7	2614,1
Linha 6	3950,0	145,0	1972,4	3000,0	151,7	2614,1
Linha 7	3950,0	215,0	1972,4	2601,0	214,5	2608,7
Linha 8	3950,0	235,0	1972,4	2601,0	234,5	2608,7

As figuras 43, 44 e 45 mostram, respectivamente, o diagrama de *offset*, a distribuição das linhas e a vista tridimensional do modelo otimizado com o melhor resultado como mostra a tabela 7.

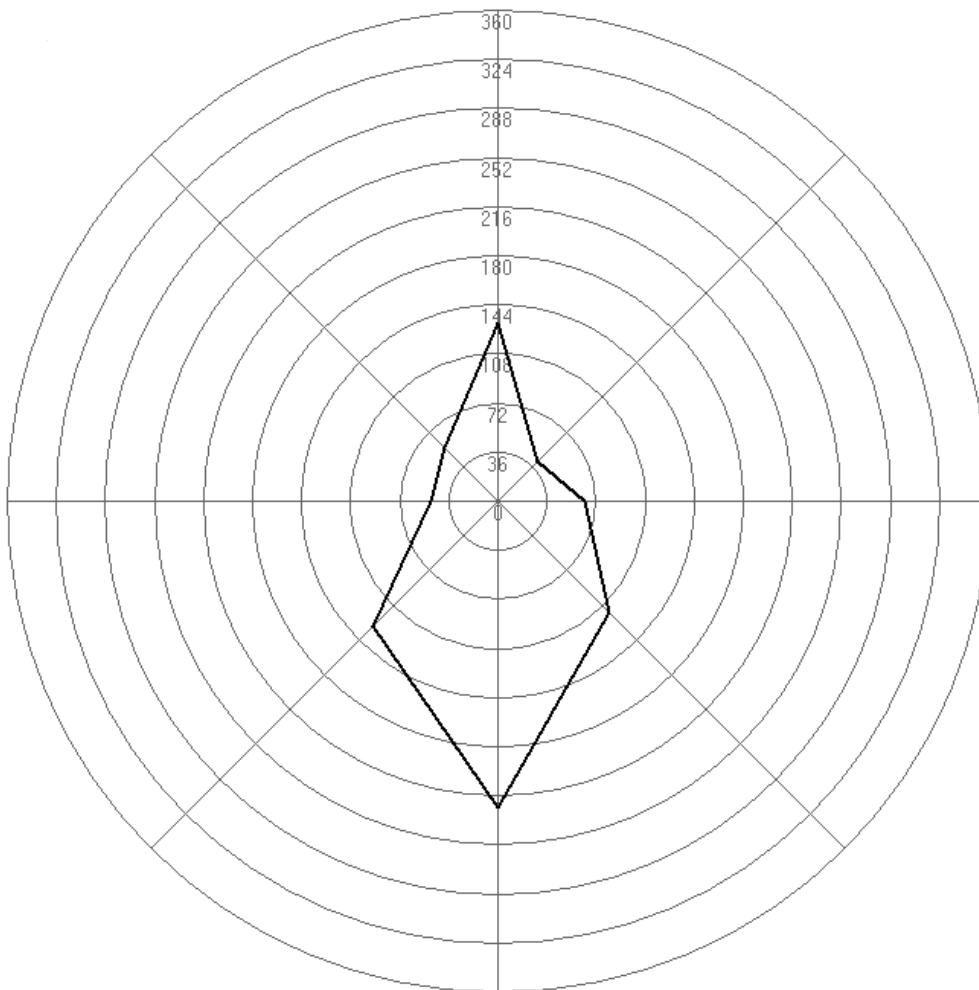


Figura 43 – Diagrama de *Offset* do modelo P1 otimizado com agrupamento de linhas por corner.

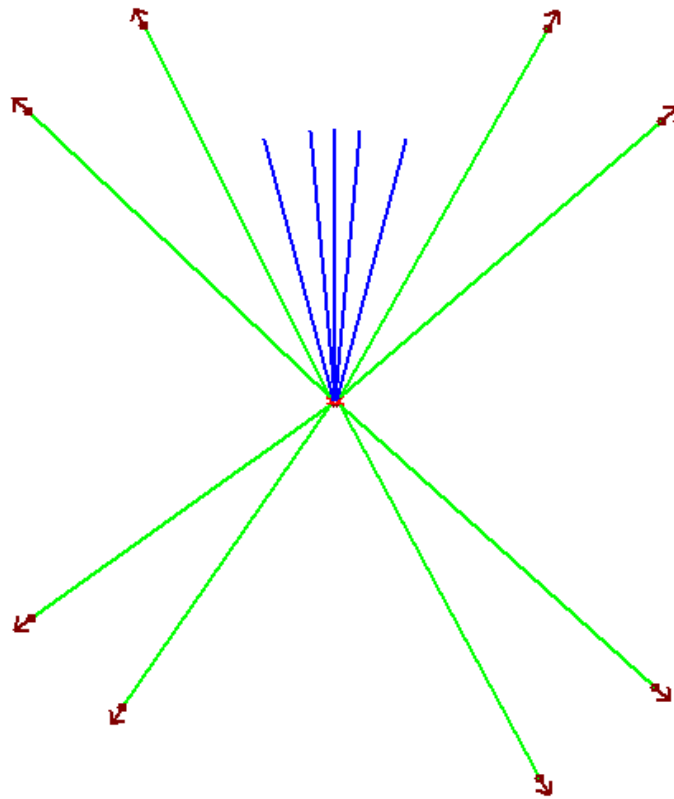


Figura 44 – Disposição das linhas do modelo P1 otimizado com agrupamento de linhas por corner.

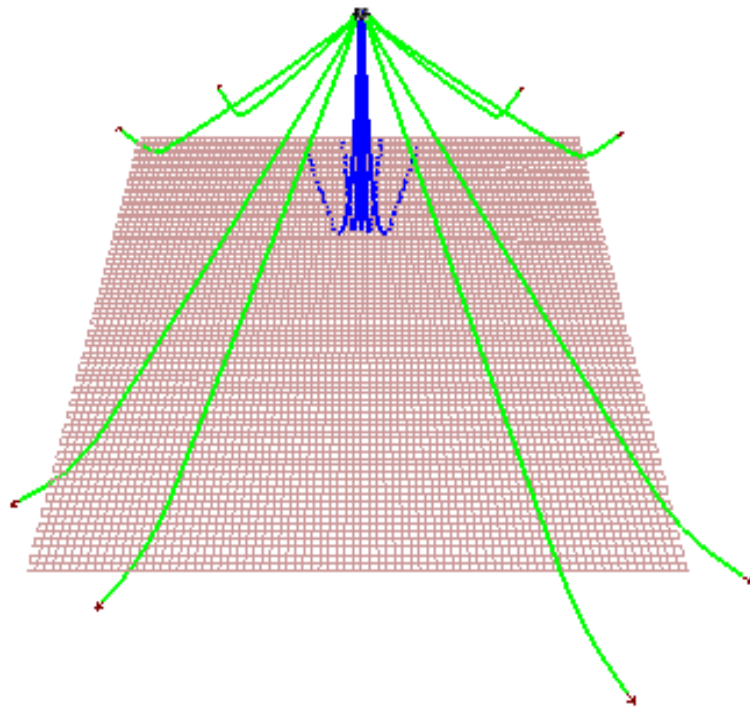


Figura 45 – Vista tridimensional do modelo P1 otimizado com agrupamento de linhas por corner.

7.3 MODELO P2

Modelo Original

O modelo P2 antes de ser otimizado apresenta um *offset* máximo de 262,8 m, o que representa 14,6% da lâmina d'água, e a linha mais tracionada está com 33,3% da MBL, i.e., dentro das condições operacionais das linhas. A figura 46 mostra o diagrama de *offset* original do modelo P2.

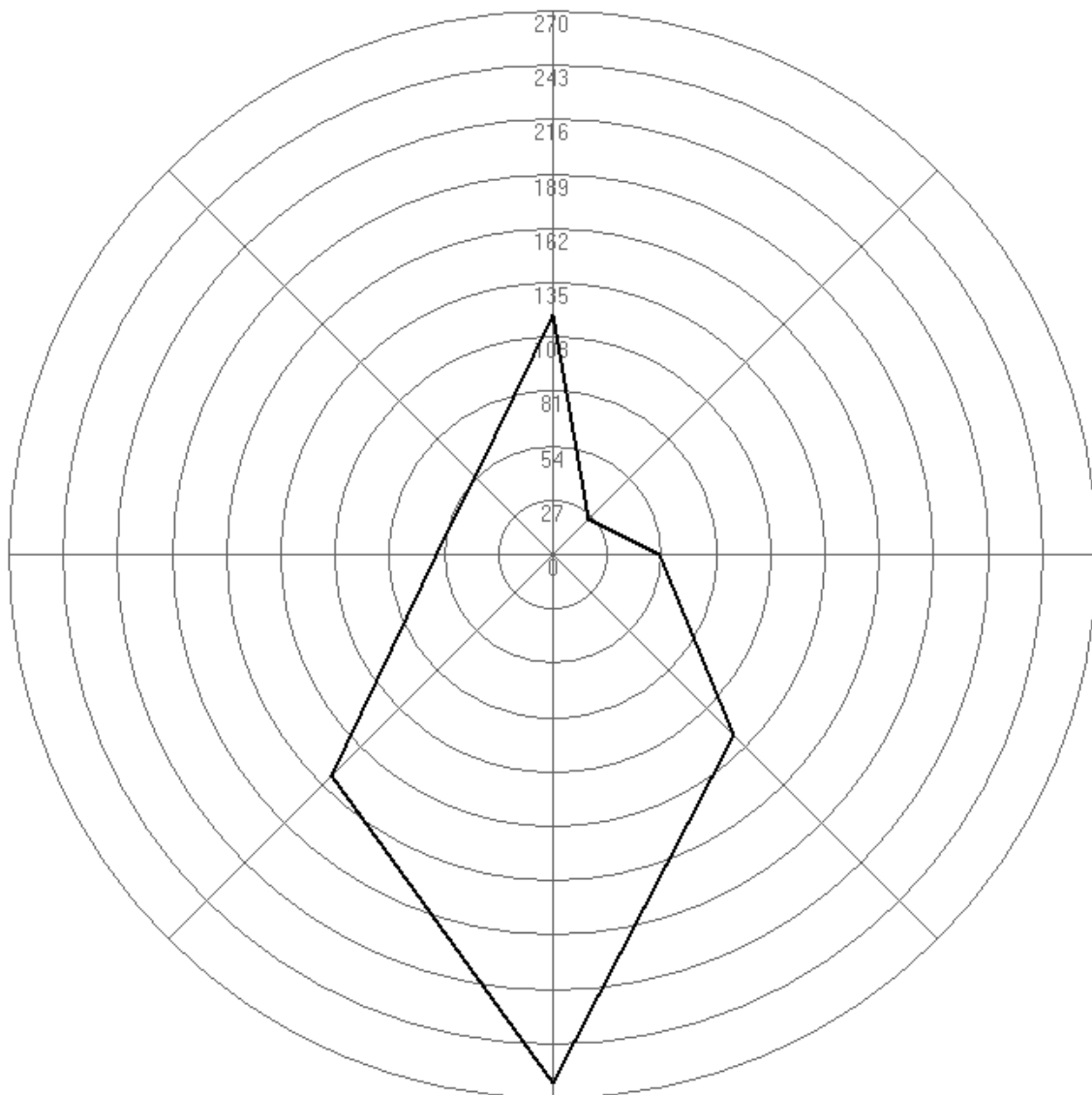


Figura 46 – Diagrama de *Offset* original do modelo P2

Resultados sem agrupamento de linhas de ancoragem por corner

A tabela 9 apresenta um resumo das execuções feitas utilizando o PSO com o modelo P2. Como se trata de um processo aleatório existem poucas chances de se obter um mesmo resultado, dados os mesmos parâmetros iniciais, assim foram feitas cinco execuções e são apresentados o melhor, a média e o desvio padrão entre as execuções. Os valores do melhor, pior e média são referentes ao *fitness* da função, o *offset* é dado em percentual da lâmina d'água e o fator é relativo ao percentual da tração de ruptura da linha mais tracionada (MBL).

Tabela 9: Resultados da Otimização do modelo P2 sem agrupamento das linhas de ancoragem por corner.

RESUMO DA OTIMIZAÇÃO					
	Melhor	Pior	Média	Offset(%)	Fator(%)
Melhor entre as cinco execuções	0,482	0,480	0,481	9,1	44,5
Média das cinco execuções	0,473	0,190	0,403	9,3	45,2
Desvio Padrão entre as cinco execuções	0,008	0,260	0,079	0,235	0,522

A figura 47 mostra a evolução do algoritmo na otimização deste modelo para a melhor solução apresentada na tabela 9.

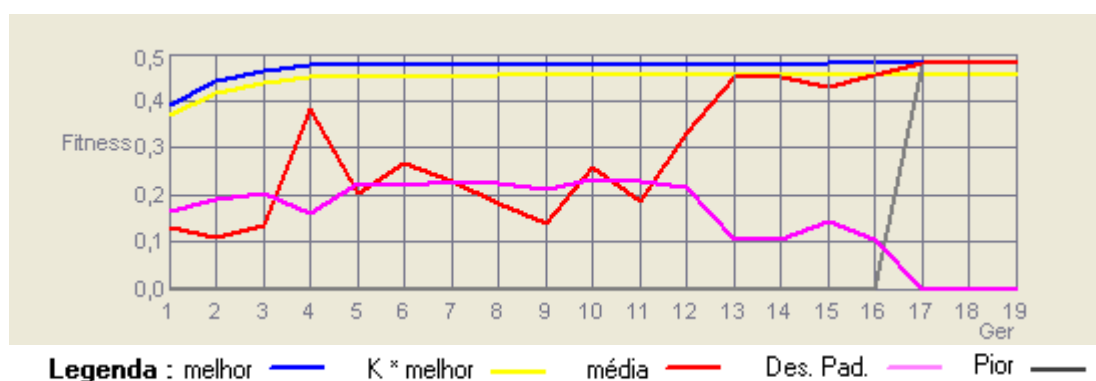


Figura 47 – Evolução do algoritmo na otimização do modelo P2.

A otimização do modelo P2, além de manter a tração das linhas dentro dos padrões operacionais, forneceu ainda um *offset* menor do que o apresentado inicialmente, de 14,6% para 9,1% da lâmina d'água. A figura 48 mostra o diagrama de

offset do modelo otimizado, onde se verifica a melhora, juntamente com a tabela 9, a figura 46 e a tabela 10 a seguir.

Tabela 10: Comparação entre o modelo P2 original e otimizado

	Original			Otimizado		
	Raio(m)	Azim(°)	Tração(kN)	Raio(m)	Azim(°)	Tração(kN)
Linha 1	3590	135	1158,8	3000	123,7	1605,8
Linha 2	3590	130	1147,3	2998	130,5	1605,8
Linha 3	3590	135	1136,1	2998	132,8	1605,8
Linha 4	3590	140	1125,4	3000	143,1	1605,8
Linha 5	3590	219	1058,0	2815	220,8	1525,4
Linha 6	3590	224	1061,2	2468	221,3	1533,2
Linha 7	3590	229	1065,1	2746	228,8	1527,8
Linha 8	3590	234	1069,9	2990	233,0	1530,0
Linha 9	3590	305	1205,9	3000	305,4	1682,3
Linha 10	3590	310	1215,7	3000	310,9	1676,6
Linha 11	3590	315	1225,6	3000	315,2	1682,3
Linha 12	3590	320	1235,5	3000	321,3	1682,3
Linha 13	3590	41	1328,6	2990	38,7	1775,2
Linha 14	3590	46	1326,2	3000	43,4	1775,5
Linha 15	3590	51	1322,5	3000	49,1	1775,5
Linha 16	3590	56	1317,6	3000	55,3	1775,5

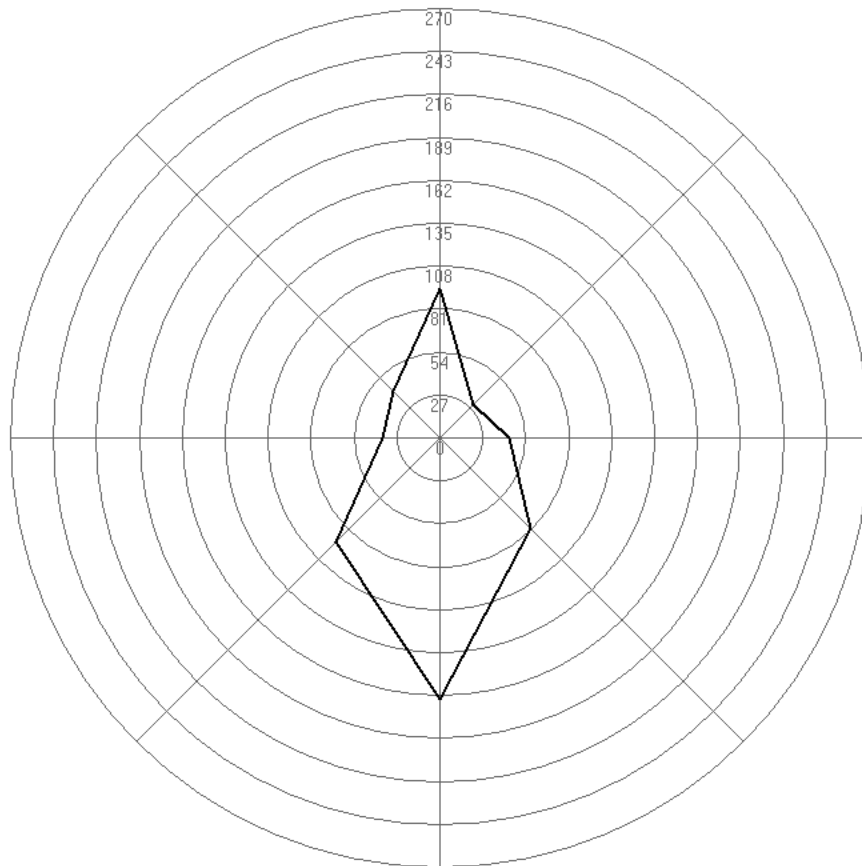


Figura 48 – Diagrama de *Offset* do modelo P2 otimizado sem agrupamento de linhas de ancoragem.

As figuras 49 e 50 mostram, respectivamente, a distribuição das linhas e a vista geral do modelo otimizado.

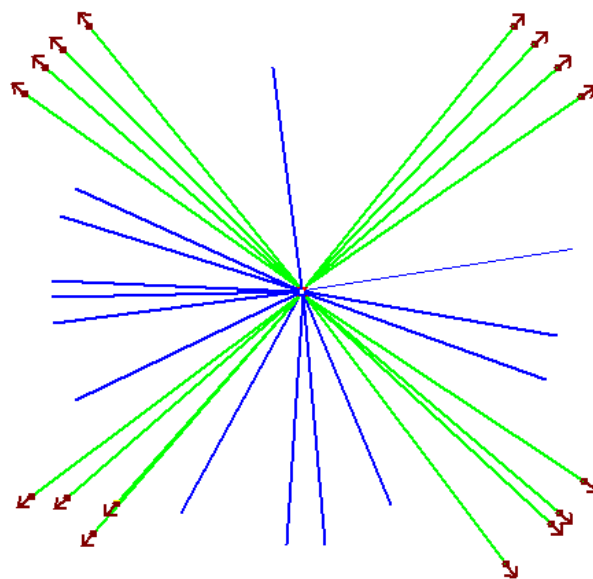


Figura 49 – Distribuição das linhas do modelo P2 otimizado sem agrupamento de linhas de ancoragem.

Percebe-se claramente a distribuição assimétrica das linhas de ancoragem em um mesmo corner, isto dificulta a instalação das âncoras e pode até impedir a instalação do sistema num caso real. A próxima seção mostra este mesmo modelo com a distribuição simétrica das linhas por corner.

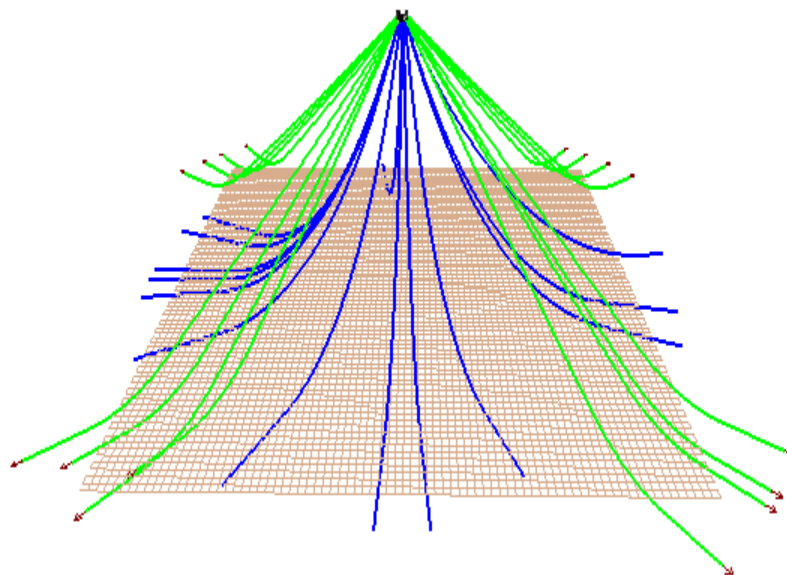


Figura 50 – Vista geral do modelo P2 Otimizado sem agrupamento de linhas de ancoragem.

Resultados com agrupamento das linhas de ancoragem por corner

A tabela 11 mostra um resumo das execuções realizadas utilizando o PSO com o modelo P2 empregando o agrupamento das linhas de ancoragem por corner. Os valores do melhor, pior e média são referentes ao *fitness* da função, o *offset* é dado em percentual da lâmina d’água e o fator é relativo ao percentual da tração de ruptura da linha mais tracionada (MBL).

Tabela 11: Resultados da Otimização do modelo P2 com agrupamento das linhas de ancoragem por corner.

RESUMO DA OTIMIZAÇÃO					
	Melhor	Pior	Média	Offset(%)	Fator(%)
Melhor entre as cinco execuções	0,518	0,513	0,515	8,2	50,0
Média das cinco execuções	0,500	0,263	0,366	8,68	47,62
Desvio Padrão entre as cinco execuções	0,019	0,249	0,169	0,476	3,282

A figura 51 mostra a evolução do algoritmo na otimização deste modelo para a melhor solução apresentada na tabela 11.

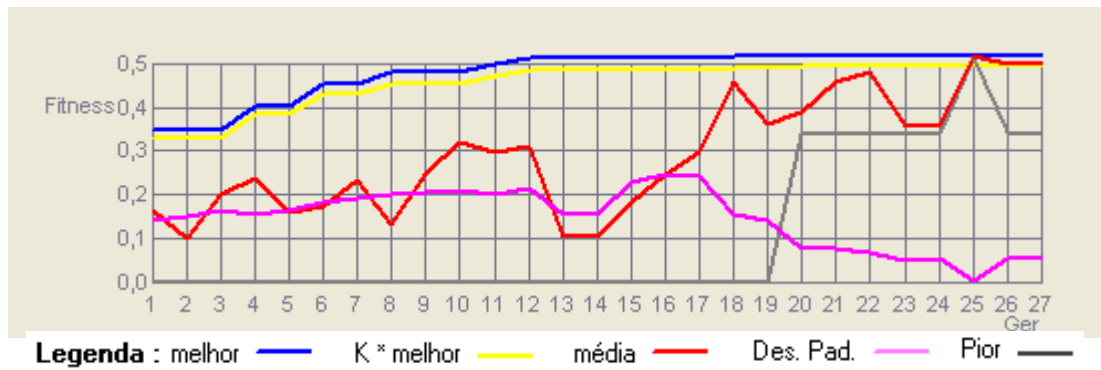


Figura 51 – Evolução do algoritmo na otimização do modelo P2.

A otimização do modelo P2 aplicando o agrupamento das linhas de ancoragem por corner além de manter a tração das linhas dentro dos padrões operacionais e fornecer um *offset* menor do que o apresentado inicialmente, de 14,6% para 8,2% da lâmina d'água, o que pode ser mais adequado para aplicação real por facilitar a instalação das âncoras por corner.

A figura 52 apresenta o diagrama de *offset* do modelo otimizado com o referido agrupamento das linhas de ancoragem por corner, onde pode-se verificar a melhora, relativamente a figura 48.

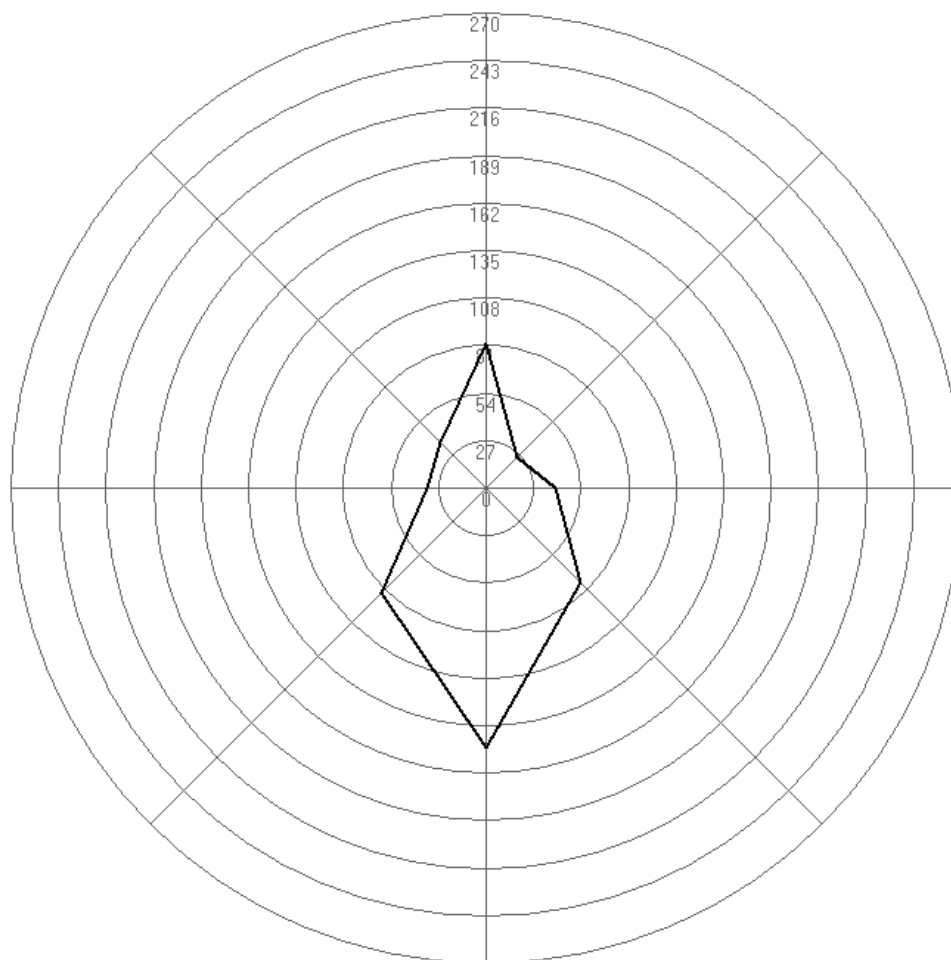


Figura 52 – Diagrama de *Offset* do modelo P2 otimizado com agrupamento de linhas de ancoragem.

A tabela 12 mostra um comparativo entre o modelo P2 original e o otimizado com o agrupamento das linhas de ancoragem por corner.

Tabela 12: Comparação entre o modelo P2 original e otimizado

	Original			Otimizado		
	Raio(m)	Azim(°)	Tração(kN)	Raio(m)	Azim(°)	Tração(kN)
Linha 1	3590	135	1558,8	3000,0	126,6	1911,3
Linha 2	3590	130	1147,3	3000,0	131,5	1911,3
Linha 3	3590	135	1136,1	3000,0	136,4	1669,5
Linha 4	3590	140	1125,4	3000,0	141,3	1671,0
Linha 5	3590	219	1058,0	2997,7	220,2	1671,0
Linha 6	3590	224	1061,2	2997,7	225,2	1671,0
Linha 7	3590	229	1065,1	2997,7	230,2	1677,2
Linha 8	3590	234	1069,9	2997,7	235,2	1677,2
Linha 9	3590	305	1205,9	2999,9	306,1	1669,5
Linha 10	3590	310	1215,7	2999,9	311,2	1669,5
Linha 11	3590	315	1225,6	2999,9	316,3	1911,3
Linha 12	3590	320	1235,5	2999,9	321,4	1913,1
Linha 13	3590	41	1328,6	3000,0	38,7	1913,1
Linha 14	3590	46	1326,2	3000,0	43,8	1913,1
Linha 15	3590	51	1322,5	3000,0	48,8	1911,3
Linha 16	3590	56	1317,6	3000,0	53,8	1911,3

As figuras 53 e 54 mostram, respectivamente, a disposição das linhas e a vista tridimensional do modelo P2 otimizado utilizando o agrupamento das linhas de ancoragem por corner, onde se vê a simetria das linhas num mesmo corner.

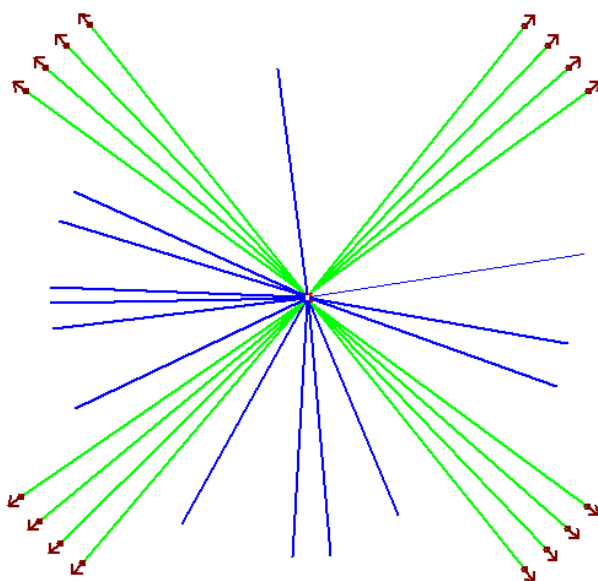


Figura 53 – Disposição das linhas do modelo P2 otimizado com agrupamento de linhas de ancoragem por corner.

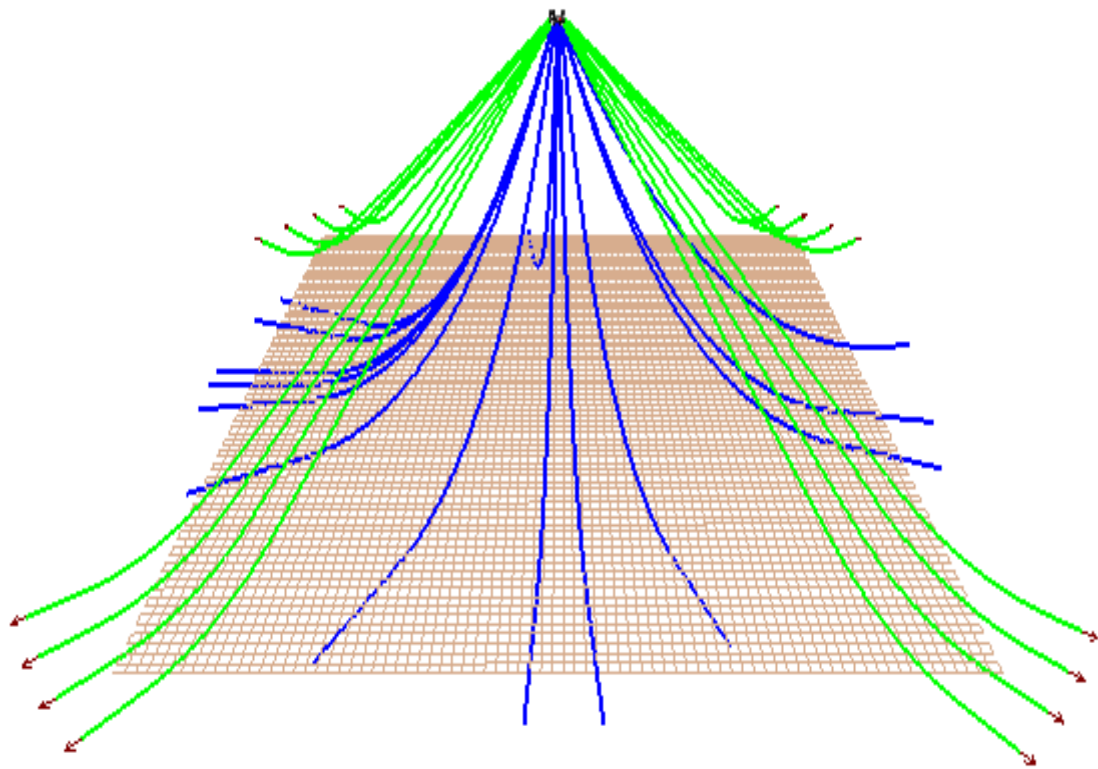


Figura 54 – Vista tridimensional do modelo P2 otimizado com agrupamento de linhas de ancoragem por corner.

7.4 MODELO P3

O modelo P3 original tem um *offset* máximo de 13,3% da lâmina d'água, o que representa um passeio de 239,4 m como pode ser observado na figura 55. A linha mais tracionada apresenta apenas 32,8% do MBL da linha

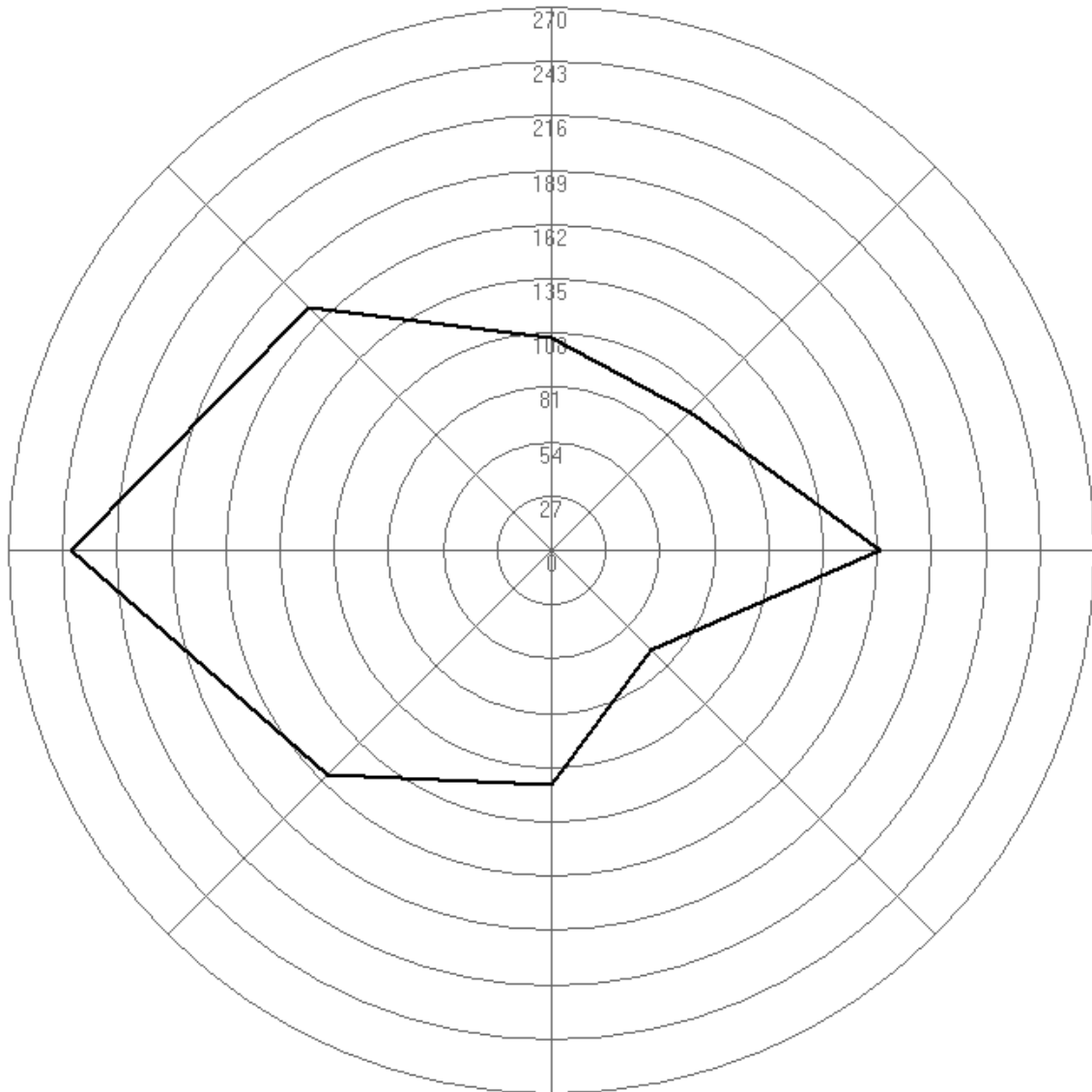


Figura 55 – Diagrama de *Offset* original do modelo P3

Resultados

O modelo P3 foi otimizado utilizando o agrupamento de linhas por corner. A tabela 13 apresenta um resumo das execuções feitas utilizando o PSO para este modelo. Os valores do melhor, pior e média são referentes ao *fitness* da função, o *offset* é dado em percentual da lâmina d'água e o fator é relativo ao percentual da tração de ruptura da linha mais tracionada (MBL).

Tabela 13: Resultados da Otimização do modelo P3.

RESUMO DA OTIMIZAÇÃO					
	Melhor	Pior	Média	Offset(%)	Fator(%)
Melhor entre as cinco execuções	0,653	0,651	0,651	5,3	50,0
Média das cinco execuções	0,634	0,368	0,477	5,58	45,32
Desvio Padrão entre as cinco execuções	0,024	0,338	0,201	0,268	6,914

A figura 56 mostra a evolução do algoritmo na otimização deste modelo para a melhor solução apresentada na tabela 13.

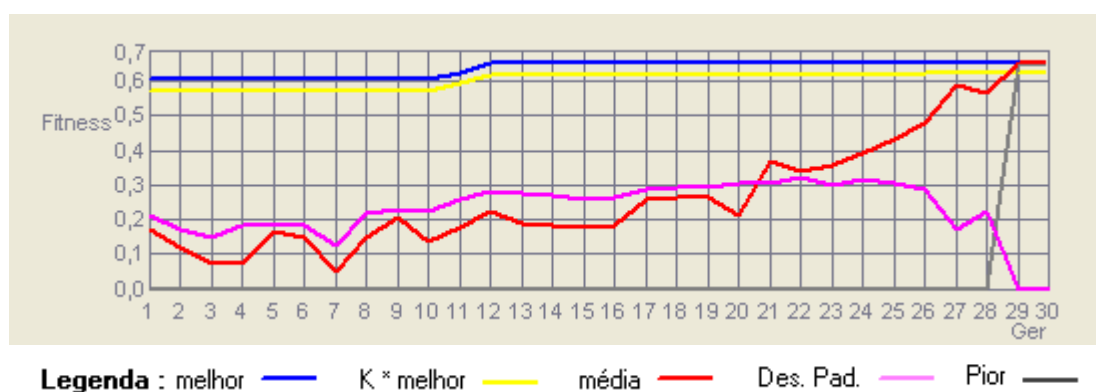


Figura 56 – Evolução do algoritmo na otimização do modelo P3

A otimização do modelo P3 apresentou bons resultados que além de colocar a tração das linhas dentro dos padrões de operação do sistema, forneceu um *offset* menor do que o apresentado inicialmente, de 13,3% para 5,3% da lâmina d'água. A figura 57 mostra o diagrama de *offset* do modelo otimizado, onde se verifica a melhora, juntamente com a tabela 13, a figura 55 e a tabela 14 a seguir.

Tabela 14: Comparação entre o modelo P3 original e otimizado.

	Original			Otimizado		
	Raio(m)	Azim(°)	Tração(kN)	Raio(m)	Azim(°)	Tração(kN)
Linha 1	1413,7	32,5	769,9	1514,5	29,5	1168,9
Linha 2	1413,7	37,5	769,8	1514,5	34,5	1168,9
Linha 3	1413,7	42,5	769,5	1514,5	39,5	1168,9
Linha 4	1413,7	47,5	769,0	1514,5	44,4	1168,9
Linha 5	1413,7	52,3	768,3	1514,5	49,3	1168,9
Linha 6	1413,7	126,9	739,2	1717,7	126,6	1168,8
Linha 7	1413,7	131,9	736,7	1717,7	131,6	1168,8
Linha 8	1413,7	136,9	734,3	1717,7	136,6	1168,8
Linha 9	1413,7	141,9	732,0	1717,7	141,6	1168,8
Linha 10	1413,7	146,9	729,7	1717,7	146,6	1168,8
Linha 11	1413,7	212,5	713,4	1591,0	214,5	1101,4
Linha 12	1413,7	217,5	713,4	1591,0	219,5	1101,4
Linha 13	1413,7	222,6	713,7	1591,0	224,5	1101,4
Linha 14	1413,7	227,7	714,2	1591,0	229,7	1101,4
Linha 15	1413,7	232,7	714,8	1591,0	234,7	1101,4
Linha 16	1413,7	308,2	742,9	1276,4	312,0	1101,4
Linha 17	1413,7	313,1	745,4	1276,4	316,9	1101,4
Linha 18	1413,7	318,1	747,8	1276,4	321,9	1101,4
Linha 19	1413,7	323,1	750,2	1276,4	326,9	1101,4
Linha 20	1413,7	328,1	752,5	1276,4	331,9	1101,4

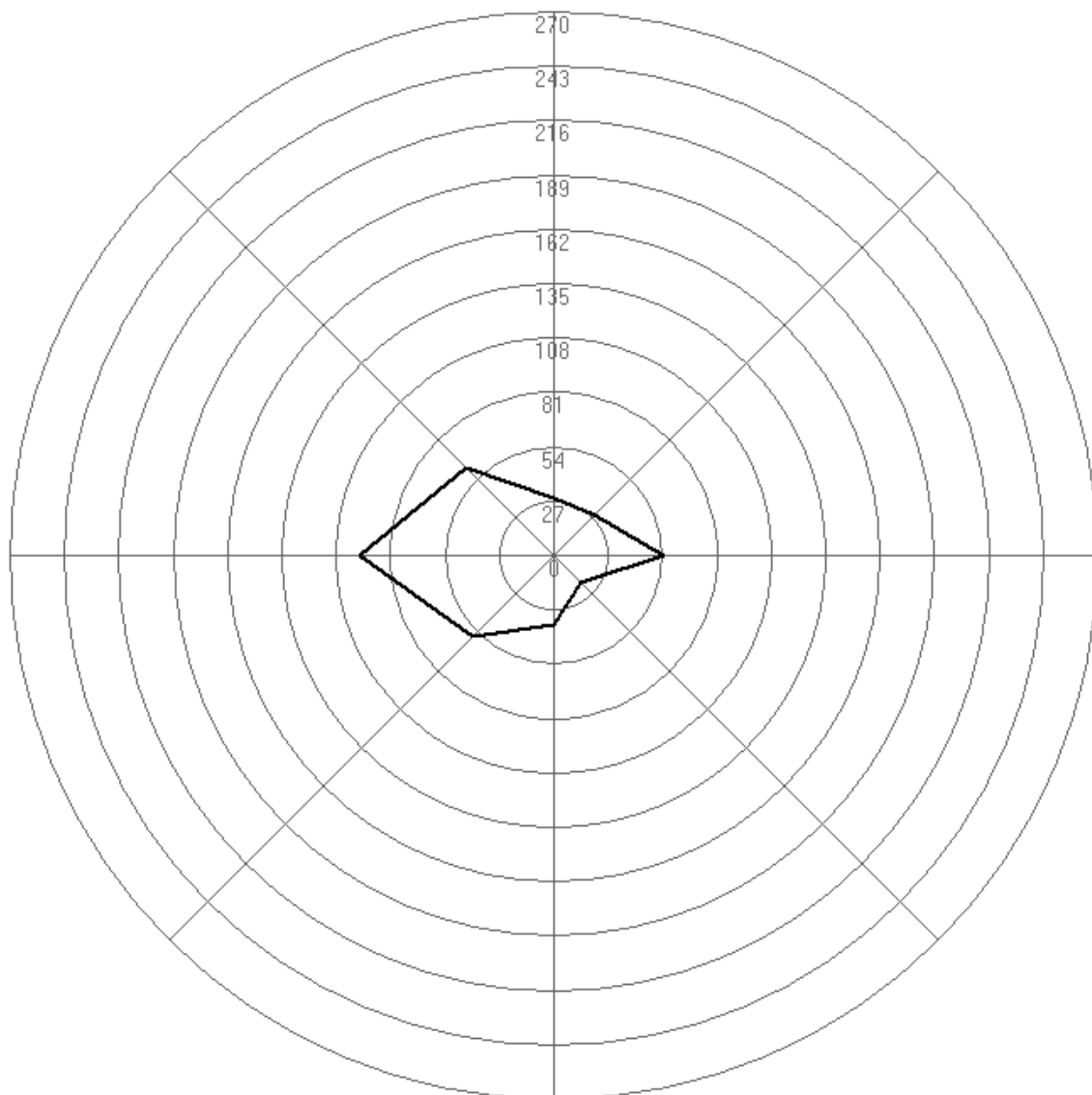


Figura 57 – Diagrama de *Offset* do modelo P3 otimizado.

As figuras 58 e 59 mostram, respectivamente, a distribuição das linhas e a vista tridimensional do modelo P3 otimizado, onde percebe-se claramente o agrupamento das linhas por corner sendo mais adequado para a utilização do sistema em caso real como já explicado no modelo P2 por facilitar a instalação das âncoras por corner.

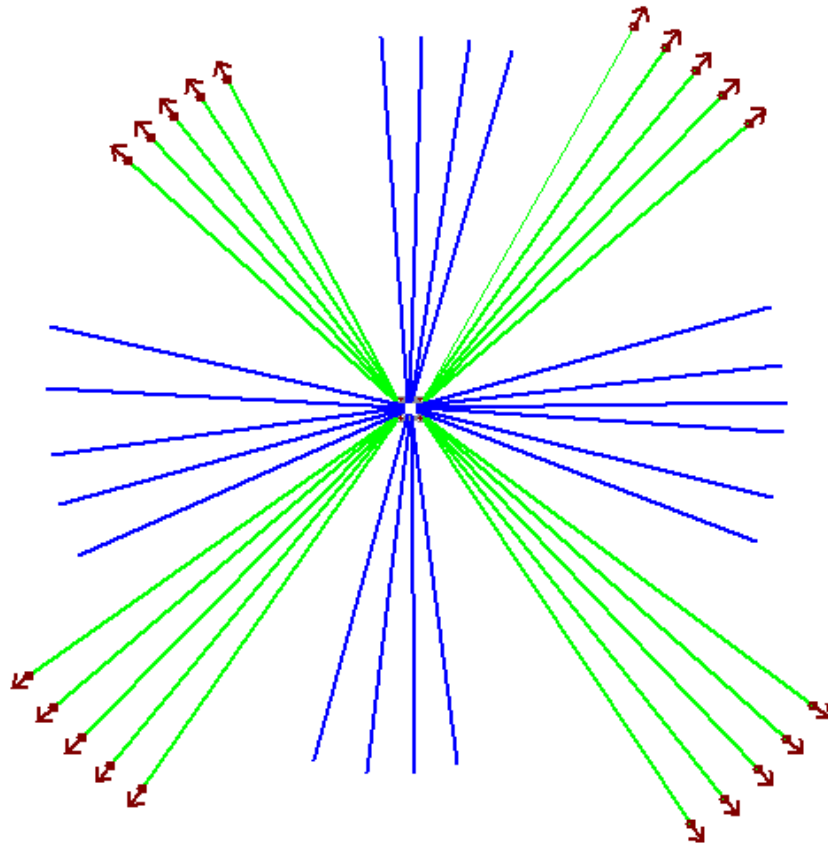


Figura 58 – Disposição das linhas do modelo P3 otimizado.

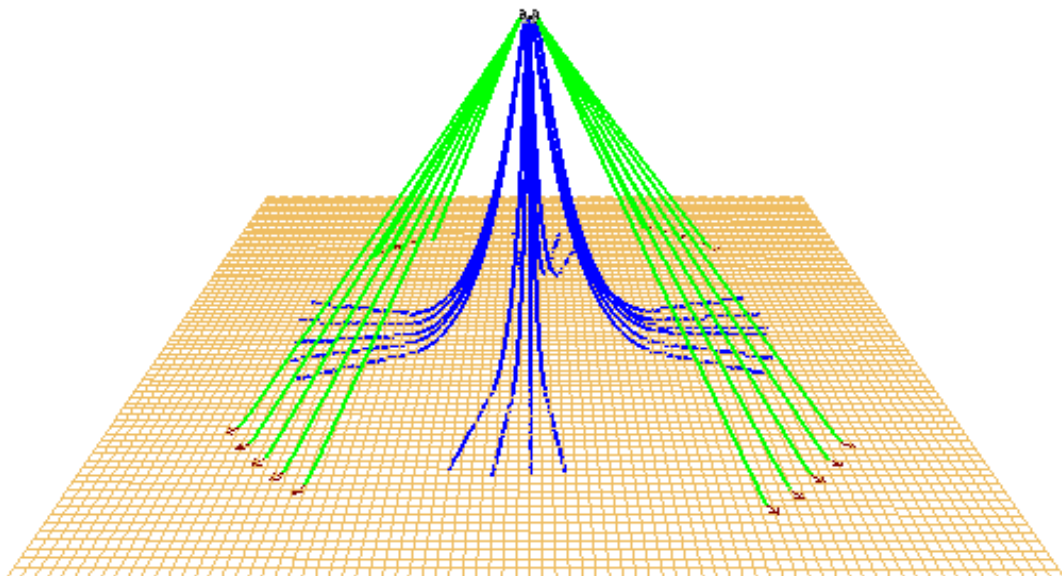


Figura 59 – Vista tridimensional do modelo P3 otimizado.

8 CONCLUSÕES

8.1 COMENTÁRIOS FINAIS

A partir dos resultados obtidos verifica-se que a aplicação da otimização por meio de algoritmos evolutivos, especialmente o método do Enxame de Partículas, em sistemas de ancoragem *offshore* pode trazer ao projetista uma maior segurança na obtenção de valores adequados para o passeio da embarcação e trações nas linhas de ancoragem. Sabe-se que projetos de ancoragem mais otimizados e eficientes podem colaborar também no desenvolvimento do projeto do sistema de risers, o qual pode ser beneficiado por passeios menores, podendo levar a uma redução significativa no custo de implantação do sistema.

O agrupamento das linhas de ancoragem por corner desenvolvido neste trabalho contribui para fazer com que o procedimento de otimização do sistema de ancoragem venha a se tornar uma ferramenta para aplicação prática no desenvolvimento de projetos de sistemas flutuantes, pois tal agrupamento pode se mostrar mais adequado para a implantação do sistema num caso real.

No entanto, sabe-se que, para obter uma ferramenta que possa ser aplicada em projetos reais, é necessário prosseguir com a inclusão, no processo de otimização, do tipo e propriedade dos segmentos das linhas. Atualmente os segmentos estão sendo mantidos fixos, a partir de dados fornecidos pelo usuário. Como será mencionado no próximo item, esta atividade está prevista como uma proposta de trabalho futuro. Mesmo assim, pode-se afirmar que os resultados apresentados nesta Dissertação são úteis para ilustrar a aplicabilidade do procedimento de otimização.

Quanto ao desempenho computacional e à facilidade de uso da interface, a associação do programa de otimização ProgOtim ao programa de análise acoplada Situa/Prosim mostrou-se um conjunto excepcional para projetos de otimização e análise de sistemas de ancoragem *offshore*, por sua grande facilidade de uso e eficácia na execução dos processos.

O método do Enxame de Partículas mostrou-se valioso, pois além de ser um método conceitualmente simples e fácil de implementar, requereu um número de avaliações que levou a resultados satisfatórios em um tempo de processamento dentro

de uma faixa exequível para projetos reais de engenharia. Os tempos de processamento foram relativamente baixos: o tempo médio de execução da otimização para os modelos P1, P2 e P3 foi de respectivamente 1h, 2h e 2h. No caso de convergência precoce o tempo médio foi de 30 min.

No entanto vale ressaltar que estes tempos foram obtidos através de análises estáticas apenas; como será comentado a seguir nas propostas de trabalhos futuros, a análise dinâmica deve ser incluída no processo de otimização, tanto para condições extremas quanto de fadiga, o que pode aumentar o custo computacional e dificultar a aplicação deste método, exigindo novos desenvolvimentos para tratar deste aspecto.

8.2 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Ao longo deste trabalho foram descritos alguns pontos que podem ser aplicados e/ou aprimorados.

Para a avaliação das configurações geradas no processo de otimização, empregaram-se apenas análises estáticas. Como já mencionado, projetos reais de sistemas de ancoragem requerem análises dinâmicas para verificação de condições extremas e de fadiga, o que torna o procedimento mais custoso computacionalmente. Além disso, para um estudo completo de projeto de sistemas de ancoragem é necessário considerar também situações transientes com linhas rompidas. O programa SITUA/PROSIM está preparado para estas análises, que devem passar a ser consideradas também no procedimento de otimização do ProgOtim.

Uma forma de considerar análises dinâmicas para essas situações seria, durante a otimização, submeter apenas indivíduos não penalizados e com bom *fitness* (determinado por uma análise estática preliminar) à análises dinâmicas. Outra possibilidade seria incluir recursos de processamento paralelo para viabilizar as análises dinâmicas.

Um recurso que também pode ser considerado para reduzir custos computacionais seria substituir análises dinâmicas por redes neurais adequadamente treinadas.

Também como já mencionado no item anterior, para permitir a aplicação da ferramenta de otimização a projetos reais, é indispensável incorporar, como variável livre a ser otimizado, o material que compõe os segmentos das linhas.

Além disso, novos desenvolvimentos no ProgOtim podem incluir também a consideração de obstáculos de fundo como restrições, bem como a determinação automática de outros elementos do sistema de ancoragem, como o tipo de âncora.

Finalmente, apesar do bom desempenho mostrado pelo método do Enxame de Partículas, outros métodos de otimização podem ser estudados, incluindo variantes de Algoritmos Genéticos e novos paradigmas como Sistemas Imunológicos Artificiais.

9 REFERÊNCIAS

- ALBRECHT, Carl Horst, 2004. *Algoritmos Evolutivos Aplicados à Síntese e Otimização de Sistemas de Ancoragem*, Tese de DSc. COPPE/UFRJ.
- AMERICAN BUREAU OF SHIPPING., 1996. "Guide for Building and Classing Floating Production, Storage and Offloading Systems".
- ANDERSSON, J., 2000. A Survey of Multiobjective Optimization in Engineering Design. Linköping: Linköping University, Department of Mechanical Engineering. Technical report LiTH-IKP-R-1097.
- ANFLEX, 1996. *Análise Não-Linear de Risers e Linhas de Ancoragem*. Versão 3.0 - Manual de Entrada de Dados, DIPREX/SEDEM/CENPES/PETROBRAS.
- API RP 2A, 1993. Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms. Working Stress Design, RP 2A, Twentieth Edition, American Petroleum Institute.
- API, 1997. Specification 17J, Specification for Unbonded Flexible Pipes. American Petroleum Institute, 1st Edition.
- API, 2001. Risk-based Methodologies or Evaluating Petroleum Hydrocarbons Impacts at Oil and Natural Gás E&P Sites. API Publication Number 4709.
- ARIANE-3Dynamic, 1999 – General & Time domain Simulation (Part 1) and Analytical Solution of a Mooring Line (Part 2). Version 5.0, Theory Manual, Bureau Veritas Software & System – MCS International.
- ASTRUP, O.C., NESTEGARD, A., RONOESS, M., SODAHL, N., 2001. “*Coupled Analysis Strategies for Deepwater Spar Platforms*” – ISOPE.
- AVRIEL, M., 1976. Nonlinear Programming – Analysis and Methods, Prentice-Hall. Englewood Clifs, New Jersey.

- BACCHIARETTI RA., 2007. Assessment of a Fully Coupled Implementation for the Analysis of Floating Systems in Offshore Oil Exploitation, M.Sc. Thesis, COPPE/UFRJ – Civil Eng. Dept., Rio de Janeiro.
- BATHE, K.J., 1996. Finite Element Procedures. New Jersey, Prentice-Hall.
- BELYTSCHKO, T., 1983. An Overview of Semidiscretization and Time Integration Procedures, Computational Methods for Transient Analysis. eds. Belytschko T, Hughes TJR, 1-65, Amsterdam: Elsevier Science Publishers.
- BRANDT, A. M., 1998. Optimization Methods for Material Design of Cement-Based Composites, E & FN, New York.
- BRAY, D., 1998. Dynamic Positioning, The Oilfield Seamanship Series, Volume 9, Oilfield Publications Ltd. (OPL).
- CASTRO, R. E., 1999. *Otimização: Programação Matemática e Algoritmos Genéticos*. Monografia para inscrição direta de DSc., Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ.
- CASTRO, R. E., 2001. *Otimização de Estruturas com Multi-objetivos via Algoritmo Genéticos*. Tese DSc., COPPE/UFRJ.
- CHAKRABARTI, S. K, *Hydrodynamics of Offshore Structures*, Computational Mechanics Publications Southampton Boston, 1987.
- CHATTERJEE, A.; SIARRY, P.; 2004, “*Nonlinear Inertia Weight Variation for Dynamic adaptation in Particle Swarm Optimization*”, Computers & Operations Research, Elsevier, Article in Press.
- COLLIAT, J.L., 2002. Total Fina ELF. Anchors for Deepwater and Ultradeepwater Moorings. OTC 14.306 – 2002. Houston – USA.
- DARWIN, C., 1996, A origem das Espécies, Esboço de 1842, Newton Compton Brasil, Rio de Janeiro.

- DEL VECCHIO, C.J.M., Piazza, M.R., Komura, T., Ferreira, C.G. and Palazzo, F.G., 1995, Taut Leg Mooring Systems for Deep Water, International Offshore Engineering, pp 433-440, Rio de Janeiro, Brasil.
- DNV POSMOOR, 1989 – Section 3 Mooring System Analysis.
- DYNASIM, 2001. Análise Dinâmica de Sistemas Ancorados. Manual do Sistema Dynasim, Versão 1.4, Petrobras/Cenpes.
- EBERHART, R.C.; SIMPSON, P.K.; DOBBINS, R.W., 1996. Computational Intelligence PC Tools. Boston, MA: Academic Press Professional.
- ELTAHER, A.; RAJAPAKSA, Y; CHANG, K; 2003. “*Industry Trends for Design of Anchoring Systems for Deepwater Offshore Structures*”, OTC 15265, Offshore Technology Conference.
- FOSSEN, T.I., 1994. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley and Sons, Ltd.
- FUCATU, C., Nishimoto, K., 2003. *Implementation of Hydrodynamic Models for Ships in the Prosim Program* (in Portuguese), Naval and Oceanic Eng. Dept, University of São Paulo, Report n. 3.
- GARZA-RIOS, L.O.; BERNITSAS, M.M.; NISHIMOTO, K.; MASETTI, I.Q.; 1997, “*Preliminary Design of a DICAS Mooring System 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.
- GOMES, A.; CREAÇÃO, D., 2004. Enxame de Partículas Evolucionários. In: MIRANDA, Vladimiro. *Computação Evolucionária Fenotípica*. Faculdade de Engenharia do Porto.
- HASSAN, R.; COHANIM, B. WECK, O. VENTER, G., 2004. A Comparison of article Swarm Optimization and the Genetic Algorithm. American Institute of Aeronautics and Astronautics.

- 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.
- HEURTIER, J.M., BUHAN, P. Le, FONTAINE, E., CUNFF, C. Le, BIOLLEY, F., BERHAULT, C., 2001. “*Coupled Dynamic Response of Moored FPSO with Risers*” – ISOPE.
- HOLLAND, J. H., 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor.
- HOOFT JP, 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., EBECKEN N. F. F., 1994. “An Optimized Implementation of the Newmark/Newton-Raphson Algorithm for the Time Integration of Nonlinear Problems”, *Communications in Numerical Methods in Engineering*, vol. 10 pp. 983-992, John Wiley & Sons, UK/USA.
- JACOB, B.P., MASETTI, I.Q., 1997. “*PROSIM – Coupled Numerical Simulation of the Behavior Of Moored Semisubmersible Units*” – COPPETEC-Petrobras Internal Report, Rio de Janeiro.
- 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., 2006. *Programa Prosim: Simulação Numérica do Comportamento de Unidades Flutuantes Ancoradas. Versão 3.0, Manual Teórico*, 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.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. C., 1995. Particle Swarm Optimization. In: *The 1995 IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, Australia, p. 1942–1948.

- KIM, M.H., WARD, E.G., HARING, R., 2001. “*Comparison of Numerical Models for the Capability of Hull/Mooring/Riser Coupled Dynamic Analysis for Spars and TLPs in Deep and Ultra-Deep Waters*” – ISOPE.
- KIRKPATRICK, S., GELATT, Jr. C. D., VECCHI, M. P., 1983. “Optimization by Simulated Annealing”, *Science*, v. 220, nº 4598, pp. 671-680.
- KLIR, G. J. AND YAN, B., 1995, *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic, Theory and Applications*, Prentice Hall PTR, USA.
- LACERDA, E. & CARVALHO, A., 1999. Introdução aos algoritmos genéticos, Anais do XIX Congresso Nacional da Sociedade Brasileira de Computação, Vol. 2, pp. 51.126.
- 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.
- LIMA, ALEX LEANDRO DE, 2006. *Avaliação de Metodologias de Análise de Unidades Estacionárias de Produção de Petróleo Offshore*, Dissertação MSc COPPE/UFRJ.
- LUENBERGER, D. G., 1984. *Linear and Nonlinear Programming*, 2ª ed, Addison-Wesley Publishing Company, London.
- MACULAN, N. & FERRAZ PEREIRA, M.V., 1980. Programação linear. Ed. Atlas S.A.
- MASETTI, I.Q.; 1997, *Análise Dinâmica de Navios Ancorados com Complacência Diferenciada*. Tese DSc., COPPE/UFRJ.
- MASETTI, I.Q., JACOB, B.P., 2002. Ancoragem com Complacência Diferenciada. Relatório Técnico RL-MC 35/2002, CENPES/PETROBRAS, Rio de Janeiro.
- MATEUS, G. R. e LUNA, H. P. L., 1986. *Programação Não-Linear*, V Escola de Computação, Belo Horizonte.

- MEDEIROS, C.J. Jr., 2002. Low Cost Anchor System For Flexible Risers in Deep Waters. OTC 14.309 – 2002. Houston – USA.
- METROPOLIS, N., ROSENBLUTH, A. W., ROSENBLUTH, M. N., TELLER, A H., TELLER, E., 1953. “Equation of State Calculations by Fast Computing Machines”, *The Journal of Chemical Physics*, v.21, pp. 1087-1092.
- MORISON, J.R., O’Brien, M.P., JOHNSON, J.W., et al, 1950. “The Force Exerted by Surfaces Waves on Piles”, *Petrol. Trans., AIME*, no 189.
- NEITTAANMÄKI, P.; RUDNICKI, M.; SAVINI, A., 1996. *Inverse problems and optimal design in electricity and magnetism*. New York: Oxford University Press, Inc., 367p.
- OLIVIERI, Bruno P., 2004. *Otimização do Projeto de Pontes Protendidas Pré-Moldadas pelo Método dos Algoritmos Genéticos, Dissertação*. Dissertação MSc COPPE/UFRJ.
- PARSOPOULOS, K.E; VRAHATIS, M.N., 2002. Particle Swarm Optimization Method in Multiobjective Problems. In: Proceedings of the 2002, University of Patras, Greece.
- PAULLING JR, 1992. *TDSIM6 - Time Domain Platform Motion Simulation with Six Degrees of Freedom: Theory and User Guide*.
- PETROBRAS, 1999, “*Metoccean Data – Technical Specification*”, ET-3000.00-1000-941-PPC-001.
- PETROBRAS, 2000. Catálogo de Materiais de Ancoragem, 1ª edição.
- PRADO, J.R.do; SARAMAGO, S.F.P., 2005. Otimização por Colônia de Partículas. *FAMAT em Revista*, n. 04.
- RIFLEX, 2005. *Theory Manual*. Version 3.4, Marintek.
- RODRIGUES, M. V., 1998. *Uma Estratégia Semi-Implícita para a Solução de problemas de Dinâmica Estrutural*, Tese de MSc., COPPE/UFRJ.

- RODRIGUES, M. V., 2004. *Algoritmos Otimizados para a Análise Acoplada de Sistemas Flutuantes na Exploração de Petróleo Offshore*. Tese de DSc., COPPE/UFRJ.
- ROSSI, R.R.; MESSINA, L. C. P.; AMARANTE, L. M. N.; KAISER, A. M.; AUGUSTO, O. B.; SILVA, J. R.; 2001, “*MODU’s Mooring Systems for Campos Basin Deep Water Water Fields*”. OMAE.
- SIMO, 2004. *Theory Manual*. Version 3.4, Marintek.
- SOARES, G. L., 1997. *Algoritmos genéticos: Estudo, Novas Técnicas e Aplicações*. Tese MSc. UFMG.
- TANNURI, Eduardo Aoun, 2001. *Desenvolvimento metodologia de projetos de sistemas de posicionamento dinâmico aplicado a operações em alto-mar*, Tese de doutorado Escola Politécnica, USP - São Paulo.
- VANDERPLAATS, G. N., 1984. *Numerical Optimization Technique for Engineering Design with Applications*, McGraw-Hill Book Company, New York.
- WADAM, 2005. *Wave Analysis by Diffraction and Morison theory*. Version 8.1, User Manual, Det Norske Veritas.
- WAH, B. W., WANG, T., SHANG, Y. e WU, Z., 2000. “Improving the Performance of Weighted Lagrange-Multiplier Methods for Nonlinear Constrained Optimization”, *Information Sciences*, v. 124, pp.241-272.
- WAMIT, 1995. *A Radiation-Diffraction Panel Program for Wave-Body Interactions*. Version 5.3, User Manual, Department of Ocean Engineering Massachusetts Institute of Technology, 1995.
- WEISE, T., 2007. *Global Optimizations Algorithms: theory and application*. Kassel, 846p. Disponível em <<http://www.it-weise.de/>>. Acesso em dez. 2007.
- WICHERS, J.E.W., DEVLIN, P.V., 2001. “*Effect of Coupling of Mooring Lines and Risers on the Design Values for a Turret Moored FPSO in Deep Water of the Gulf of Mexico*” – ISOPE.

APÊNDICE A

EQUAÇÕES DE MOVIMENTO DO CASCO DA UNIDADE FLUTUANTE

A.1 SISTEMA DE COORDENADAS

Sistema Global de Coordenadas

O sistema global de coordenadas (x, y, z) é o sistema principal e único que é a referência para todos os demais sistemas. Os eixos coordenados x e y deste sistema global estão em um plano horizontal, e o eixo z está na direção vertical, orientado de baixo para cima.

A profundidade da origem deste sistema é determinada através de uma variável h . É comum tomar $h = 0$ coincidindo com o plano médio da superfície da água.

As coordenadas dos nós da malha de elementos finitos, que representam as linhas no modelo acoplado, são expressas neste sistema global geral.

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 de movimento do corpo, apresentadas mais adiante, são escritas neste sistema e expressam a posição e os movimentos do sistema móvel (X, Y, Z) em relação ao sistema global (x, y, z) .

A origem deste sistema de referência estrutural do corpo está localizada no seu centro de gravidade (CG). Inicialmente, os eixos têm orientação semelhante à do sistema global geral (x, y, z) , ou seja, inicialmente o plano XY está contido em um plano horizontal e o eixo- Z é vertical, orientado de baixo para cima.

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 (o CG) até a origem do sistema de 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.

Observa-se que o programa trabalha internamente efetuando a montagem e solução das equações de movimento do casco neste sistema com origem no CG. No entanto, externamente o analista deve fornecer os dados que definem a geometria de cada unidade flutuante em outro sistema de coordenadas paralelo a este, com origem em um ponto de referência mais conveniente, por exemplo, a “quilha à meia nau” (no caso de navios) ou um ponto contido no plano horizontal que passa pela base dos *pontoons* (no caso de uma plataforma semi-submersível). A referência entre estes dois sistemas é definida pelas coordenadas do CG em relação ao ponto de referência escolhido.

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

Um sistema local de coordenadas (x' , y' , z') é fornecido para cada elemento da malha de elementos finitos das linhas e para cada membro reticulado da plataforma.

A origem deste sistema está localizada no nó 1 do membro. A direção local x' coincide com o eixo do membro, e é orientada do nó 1 para o nó 2; as direções locais y' e z' , ortogonais a x' , estão contidas na seção transversal do membro.

No caso de um membro com orientação geral no espaço, a direção local y' é horizontal, e a direção local z' é perpendicular às direções x' e y' . Para um elemento horizontal, a direção local z' é vertical, paralela ao eixo global z . Para um membro vertical, a direção local horizontal y' é paralela ao eixo global y . Por sua vez, a direção local z' , também horizontal, é paralela ao eixo global x com sentido oposto.

A.2 EQUAÇÕES DE MOVIMENTO DO CASCO: FORMULAÇÃO

No raciocínio que se segue, suponhamos que o aproamento da plataforma em relação ao sistema global (x,y,z) é zero, isto é, que o sistema estrutural da plataforma (X,Y,Z) e o sistema global (x,y,z) são originalmente paralelos. A extensão para casos mais gerais com aproamento diferente de zero é trivial.

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 $x_l(t)$ é expressa pela variação da origem do sistema estrutural da plataforma (X,Y,Z) , ou seja, a variação da posição do centro de gravidade (CG), medida em relação ao sistema global (x,y,z) . As componentes de x_l são $x_{l1}(t)$, $x_{l2}(t)$, $x_{l3}(t)$.

Deslocamento de Rotação

Analogamente, o movimento de rotação é a variação angular dos eixos do sistema estrutural em relação ao sistema global de coordenadas. Para expressar a posição relativa rotacional desses dois sistemas de referência, empregam-se os ângulos de Euler (figura A1), denominados γ , β , α . A seqüência de rotações que define estes ângulos é descrita abaixo.

- 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 .

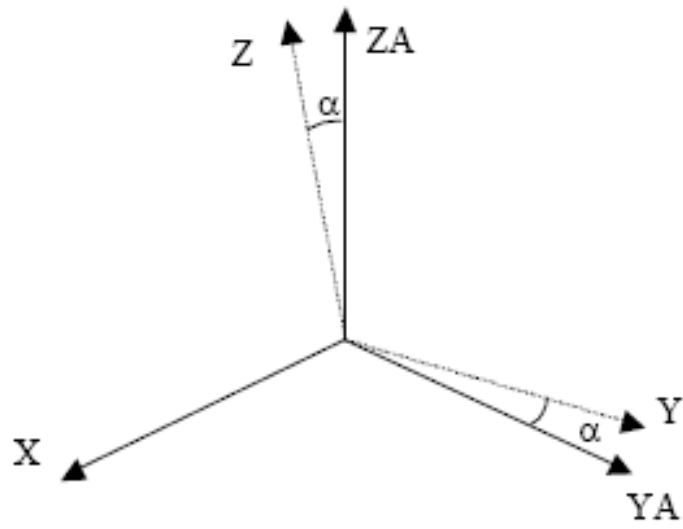
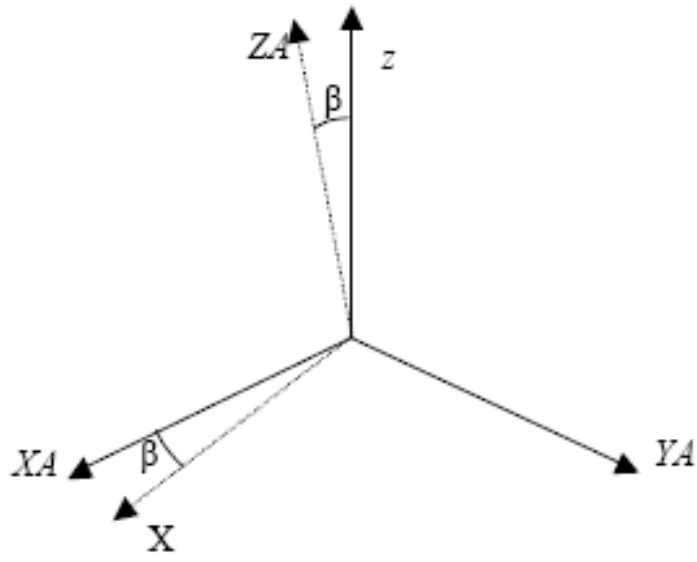
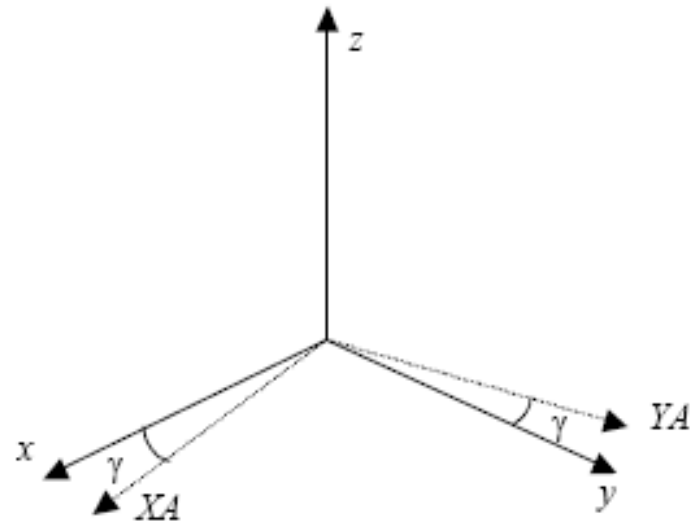


Figura A1 – Ângulos de Euler

Transformação de Coordenadas

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

$$X = A(x - x_l) \quad (A.1)$$

ou

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c\beta c\alpha & s\beta c\alpha & -s\alpha \\ -s\beta c\gamma + c\beta s\alpha s\gamma & c\beta c\gamma + s\beta s\alpha s\gamma & c\alpha s\gamma \\ s\beta s\gamma + c\beta s\alpha c\gamma & -c\beta s\gamma + s\beta s\alpha c\gamma & c\alpha c\gamma \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x - x_{l1} \\ y - x_{l2} \\ z - x_{l3} \end{Bmatrix} \quad (A.2)$$

Nesta expressão são usadas notações abreviadas: $s\beta = \text{sen } \beta$, $c\beta = \text{cos } \beta$, e assim por diante.

Esta expressão define a transformação de coordenadas que relaciona o sistema global (fixo no espaço) com o sistema estrutural (móvel) da plataforma.

A matriz 3x3 A é a matriz de rotação ou de transformação de coordenadas. Trata-se de uma matriz ortonormal, de modo que a sua inversa é igual à sua transposta e a transformação inversa (que exprime as coordenadas do ponto no sistema global como a soma das componentes de movimento translacional x_l e rotacional A) é dada por:

$$x = x_l + A^T X \quad (A.3)$$

Transformação de velocidades

Outra expressão de transformação pode ser definida, relacionando as velocidades angulares $w = (w_1, w_2, w_3)$, expressas no sistema global (x,y,z) , com as derivadas no tempo dos ângulos de Euler $\theta = (\gamma, \beta, \alpha)$ (entendidas como velocidades angulares expressas no sistema estrutural da plataforma). Esta expressão é dada por:

$$w = B \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{A.4})$$

onde B é dado por:

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

Em geral B é uma matriz quadrada e não singular, portanto a sua inversa existe e assim a transformação inversa de (A.4) pode ser escrita como:

$$\frac{d\theta}{dt} = B^{-1}w \quad (\text{A.6})$$

Equação de Movimentos

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

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

$$m = \frac{d}{dt}(Iw)$$

onde f e m são os vetores de forças externas e momentos; M e I são matrizes 3x3 compostas pela massa m do corpo e seus momentos e produtos de inércia I_{ii} e $J_{ij} = J_{ji}$ assim definidos:

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

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

onde:

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

$$J_{ij} = \int x_i x_j dm \quad i \neq j$$

Alternativamente, os momentos e produtos de inércia I_{ii} e J_{ij} podem ser relacionados aos valores dos raios de giração r_{ii} e r_{ij} pelas seguintes expressões:

$$r_{ii} = \sqrt{\frac{I_{ii}}{m}} \quad (\text{A.10})$$

$$r_{ij} = \text{senal}(J_{ij}) \sqrt{\frac{|J_{ij}|}{m}}$$

O lado direito das equações (A.7) representam as derivadas no tempo da quantidade de movimento translacional e angular, respectivamente. Considerando que a velocidade translacional v do centro de gravidade do corpo e o vetor de forças f são expressos no sistema global (xyz) e que a matriz de massa é constante a primeira das equações (A.7) torna-se:

$$f = M \frac{dv}{dt} \quad (\text{A.11})$$

e

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (\text{A.12})$$

Quanto à segunda das equações (A.7) relacionando momentos a quantidade de movimento angular, seria conveniente reescrevê-la de uma forma que a matriz de

inércia I também fosse constante. Para tanto, pode-se avaliar a equação não no sistema global, mas no sistema estrutural (móvel) da plataforma, no qual I é constante. A derivada no tempo da quantidade de movimento angular é, portanto, avaliada num sistema de coordenadas que está girando, de modo que a segunda das equações (A.7) torna-se:

$$m = I \frac{dw}{dt} + w \times (Iw) \quad (\text{A.13})$$

As equações (A.11), (A.12), (A.13) e (A.6) podem ser rearranjadas e reescritas como:

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= M^{-1} f \\ \frac{dx}{dt} &= v \end{aligned} \quad (\text{A.14})$$

$$\frac{dw}{dt} = I^{-1} [m - w \times (Iw)]$$

$$\frac{d\theta}{dt} = B^{-1} w$$

As equações (A.14) podem ser vistas como um sistema de doze equações de primeira ordem nas variáveis v , x , w e θ , que expressam as velocidades e posição do corpo em função do tempo.

É importante ressaltar dois tipos de não linearidades que ocorrem nas equações (A.14):

- 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 $w \times (Iw)$ 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.

O lado direito da equação (A.14) é composta por forças e momentos f e m que atuam sobre a plataforma, incluindo as resultantes das cargas ambientais (ondas, correntes, vento), e também, como será visto posteriormente, as forças exercidas pelas amarras e os *risers*. Por conseguinte, a fim de concluir a descrição da formulação das equações de movimento (A.14), será apresentada a formulação para o cálculo das forças e momentos f , m , e para o acoplamento com o modelo de elementos-finitos que representam as amarras e *risers*.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)