



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



MICHELE AGRA DE LEMOS MARTINS

OTIMIZAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DE RISERS VERTICAIS COMPLACENTES

**MACEIÓ
2011**

MICHELE AGRA DE LEMOS MARTINS

OTIMIZAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DE RISERS VERTICAIS COMPLACENTES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Setton Sampaio da Silveira

Co-orientador: Prof. Dr. Eduardo Nobre Lages

**MACEIÓ
2011**

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária Responsável: Fabiana Camargo dos Santos

M386o Martins, Michele Agra de Lemos.
Otimização da configuração de risers verticais complacentes / Michele Agra de Lemos Martins. -- 2011.
174 f. : il., tabs., graf.

Orientador: Eduardo Setton Sampaio da Silveira.
Co-Orientador: Eduardo Nobre Lages.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil : Estruturas) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2011.

Bibliografia: f. 163-174.

1. Otimização estrutural. 2. Risers - Projeto. 3. Risers verticais complacentes. I. Título.

CDU: 624.95



Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Unidade Acadêmica Centro de Tecnologia – CTEC
Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil – PPGEC



OTIMIZAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DE RISERS VERTICAIS COMPLACENTES

MICHELE AGRA DE LEMOS MARTINS

Dissertação submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas e aprovada no dia 09 do mês de dezembro do ano de 2011.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Eduardo Setton Sampaio da Silveira
Orientador – CTEC/UFAL

Prof. Dr. Eduardo Nobre Lages
Co-orientador – CTEC/UFAL

Prof. Dr. Adeildo Soares Ramos Júnior
CTEC/UFAL

Prof. Dr. Bernardo Horowitz
UFPE

Prof. Dr. Mauro Costa de Oliveira
CENPES/Petrobrás

Campus A. C. Simões, Av. Lourival de Melo Mota, S/N
Tabuleiro do Martins – CEP 57072-970 – Maceió – Alagoas
Tel/Fax: (82) 3214-1863
E-mail: ppgec@ctec.ufal.br
Homepage: www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgec

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

A Deus, sempre e por tudo.

À minha família pelo carinho e apoio na conquista de mais uma etapa; em especial à minha batalhadora e amada mãe, à minha querida irmã, que estão sempre ao meu lado, e ao meu pai, que tenho certeza que sempre olha por mim, me acompanha e guia meus passos.

Ao André pelo carinho, companheirismo, apoio e estímulo em todos os momentos.

Aos queridos professores Eduardo Setton e Eduardo Nobre pela amizade, oportunidades, orientação, motivação e sugestões valiosas.

Ao professor Fred Carvalho e ao Felipe Coelho pela ajuda e suporte.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC/UFAL, pela formação e conhecimentos transmitidos.

Aos amigos do LCCV pelo companheirismo, conhecimentos compartilhados e momentos de descontração. A toda equipe do LCCV pelo excelente ambiente de trabalho, apoio e eficiente assistência.

À Petrobras pela permissão de uso do programa Anflex, empregado nas simulações numéricas, e, em particular, ao Eng. Marcio Mourelle pelos conhecimentos transmitidos ao longo do projeto.

À Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP –, a Financiadora de estudos e projetos – FINEP – e ao Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT pela formação e financiamento da pesquisa por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o setor de Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCT.

À equipe da ESSS, em particular ao Eng. Guilherme Jenovencio, pelo eficiente suporte técnico durante as simulações no programa modeFRONTIER®.

Enfim, a todos que contribuíram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, meu sincero agradecimento.

"Em verdade, o que proporciona o máximo de prazer não é o conhecimento e sim a aprendizagem, não é a posse, mas a aquisição, não é a presença, mas o ato de atingir a meta."

Carl Friedrich Gauss

RESUMO

Dentro do contexto de exploração de petróleo em águas profundas e ultraprofundas, os *risers* verticais complacentes (CVAR) surgem como uma nova alternativa capaz de superar as barreiras das elevadas lâminas d'água de exploração de maneira eficiente, segura e econômica. A geometria diferenciada desse *riser* melhora o desempenho estrutural do sistema, atenuando a dinâmica da linha, e também proporciona diversas facilidades como utilização de completação seca e possibilidade de intervenção no poço direto da plataforma. Com o aumento da complexidade da configuração dos *risers* e com o constante desafio de minimizar custos e melhorar o desempenho das estruturas, o conceito de otimização ganha grande importância. Com base nessa motivação, o presente trabalho apresenta o estudo de *risers* verticais complacentes e uma abordagem do seu dimensionamento a partir da utilização de técnicas de otimização. São considerados como variáveis de projeto os parâmetros que definem a geometria do *riser* e como restrições consideram-se critérios operacionais e de integridade estrutural. O estudo engloba diferentes abordagens da função de mérito a ser otimizada, tanto mono-objetivo quanto multiobjetivo, considerando critérios geométricos e de desempenho estrutural. Apresenta-se também uma análise de sensibilidade do *riser* para melhor compreensão do seu comportamento estrutural, considerando tanto a estática quanto a dinâmica do problema. A solução ótima é obtida utilizando o método NSGA-II, algoritmo genético com elitismo. Assim, busca-se expor a importância e eficiência da utilização de técnicas de otimização para a elaboração do projeto preliminar de *risers*, destacando ainda a aplicabilidade desse conceito no dimensionamento específico de *risers* verticais complacentes, estruturas de caráter inovador no contexto de exploração de petróleo em alto mar.

Palavras-chave: Otimização Estrutural, Projeto de *Risers*, *Risers* Verticais Complacentes

ABSTRACT

The compliant vertical access risers (CVAR) is a new alternative to overcome the barriers imposed by deepwater fields for oil exploitation in an efficient, safe and economic way. The differentiated geometry of this relatively new riser configuration improves the structural performance of the system. The characteristic compliance of the CVAR system can also compensate for vessel motion. The CVAR, being vertical access to the wells, brings the advantage of using dry trees, and also allows the completion and workover operations to be performed from the FPU, offering significant economic and operational benefits to deepwater oil field development. With the increasing complexity of risers configuration and the constant challenge of minimizing costs and improving the performance of structures, the use of an optimization methodology is of great importance. Based on this motivation, this work presents the study of compliant vertical access risers design using optimization techniques. The parameters that define the geometry of the riser are taken as the design variables and the design constraints consider both structural integrity and operational criteria. Different approaches of the merit function are assessed, both mono-objective and multiobjective, taking into account the structural performance and geometric criteria. A sensitivity analysis of the riser is also presented to provide a better understanding of its structural behavior, considering both static and dynamic analysis. The optimal solution is obtained by the NSGA-II method, an elitist genetic algorithm. Thus, this work attempts to expose the importance and efficiency of the optimization techniques applied to preliminary design of risers, and also emphasizes the applicability of this concept in the design of compliant vertical access risers, that are innovative structures in the context of oil exploitation in deepwaters.

Keywords: *Structural Optimization, Riser Design, Compliant Vertical Access Risers*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema <i>offshore</i> para exploração de petróleo.....	17
Figura 2 – Fluxograma ilustrativo da metodologia adotada.....	29
Figura 3 – Configurações de <i>risers</i> : (a) catenária; (b) <i>lazy-wave</i> ; (c) <i>lazy-S</i> ; (d) <i>pliant-wave</i> ; (e) <i>steep-wave</i> ; (f) <i>steep-S</i>	33
Figura 4 – <i>Riser</i> rígido vertical.....	35
Figura 5 – <i>Riser</i> Vertical Complacente.....	36
Figura 6 – Fluxograma de projeto.	42
Figura 7 – Comparação entre as metodologias de projeto convencional (a) e otimizado (b).....	43
Figura 8 – Experimentos definidos aleatoriamente.	51
Figura 9 – Experimentos definidos por meio do método fatorial.....	52
Figura 10 – Exemplo do método um fator por vez com (a) dois fatores e três níveis e (b) três fatores e três níveis.	56
Figura 11 – Exemplo do método fatorial completo com (a) dois fatores e três níveis e (b) três fatores e dois níveis.....	57
Figura 12 – Esquema sequencial do método científico estatisticamente planejado..	62
Figura 13 – Etapas da estratégia adotada para análise estatística.....	64
Figura 14 – Esquema ilustrativo da região crítica do teste de hipóteses.....	67
Figura 15 – Distribuição das soluções ótimas encontradas.	74
Figura 16 – Mapeamento do espaço das variáveis de decisão no espaço objetivo. .	74
Figura 17 – Esquema ilustrativo das relações de dominância de Pareto no espaço objetivo.	76
Figura 18 – Analogia entre termos da genética populacional e dos algoritmos genéticos.....	84
Figura 19 – Esquema ilustrativo da analogia do método AG com a genética.	85
Figura 20 – Exemplo de operação de mutação de um ponto escolhido aleatoriamente.....	86
Figura 21 – Exemplo de cruzamento de um único ponto.	87
Figura 22 – Exemplo de cruzamento multi-pontos.	87
Figura 23 – Exemplo ilustrativo da classificação realizada pelo MOGA.....	90
Figura 24 – Fluxograma geral do MOGA.	92

Figura 25 – Representação da classificação dos indivíduos no NSGA (fronteiras)...	93
Figura 26 – Fluxograma do método NSGA.	94
Figura 27 – Esquema do procedimento evolutivo do NSGA-II.	96
Figura 28 – Configuração CVAR com destaque nas variáveis de cálculo do <i>overlength fraction</i>	99
Figura 29 – Acesso vertical por meio de (a) <i>risers</i> verticais rígidos e (b) <i>risers</i> verticais complacentes.	101
Figura 30 – Seções características do CVAR.	101
Figura 31 – Segmento de <i>riser</i> com flutuador.	102
Figura 32 – Componentes característicos da configuração CVAR.	103
Figura 33 – Seções transversais dos trechos que compõem o CVAR: (a) <i>riser</i> com revestimento térmico, (b) com flutuadores e (c) com revestimento pesado.	103
Figura 34 – Composição do <i>riser</i> em segmentos.	105
Figura 35 – Esquema simplificado do fluxo de otimização.	118
Figura 36 – Magnitude de efeito em relação ao fator de utilização de tensão.	122
Figura 37 – Magnitude de efeito em relação ao fator de volume.	123
Figura 38 – Magnitude de efeito em relação ao raio de curvatura.	124
Figura 39 – Contribuição das variáveis de projeto em relação aos parâmetros de resposta.	125
Figura 40 – Interações de maior efeito para o fator de utilização de tensão.	129
Figura 41 – Interações de maior efeito para o fator de utilização de tensão.	129
Figura 42 – Interações de maior efeito para o fator de volume.	130
Figura 43 – Interações de maior efeito para o fator de volume.	131
Figura 44 – Interações de maior efeito para o raio de curvatura.	131
Figura 45 – Interações de maior efeito para o raio de curvatura.	132
Figura 46 – Interações de maior efeito para tensão combinada de von Mises.	133
Figura 47 – Interações de maior efeito para tensão combinada de von Mises.	133
Figura 48 – Interações de maior efeito para a tração efetiva.	134
Figura 49 – Interações de maior efeito para a tração efetiva.	135
Figura 50 – Gráfico de probabilidade meia-normal dos efeitos em relação ao fator de utilização de tensão.	136
Figura 51 – Gráfico de probabilidade meia-normal dos efeitos em relação ao fator de volume.	136

Figura 52 – Gráfico de probabilidade meia-normal dos efeitos em relação a tensão combinada de von Mises.	137
Figura 53 – Gráfico de probabilidade meia-normal dos efeitos em relação a tração efetiva.	137
Figura 54 – Gráfico de probabilidade meia-normal dos efeitos em relação ao raio de curvatura.	138
Figura 55 – Resumo das simulações realizadas.	140
Figura 56 – Proporção das quebras de restrição.	141
Figura 57 – Correlação entre as variáveis de projeto.	142
Figura 58 – Histórico do processo de busca da otimização.	143
Figura 59 – Configuração ótima encontrada: (a) posição neutra; (b) <i>near</i> anual; (c) <i>near</i> centenário; (d) <i>far</i> anual; (e) <i>far</i> centenário.	143
Figura 60 – Resumo das simulações realizadas.	144
Figura 61 – Proporção das quebras de restrição.	145
Figura 62 – Correlação entre as variáveis de projeto.	146
Figura 63 – Histórico do processo na busca pelo ponto ótimo.	147
Figura 64 – Configuração ótima encontrada: (a) posição neutra; (b) <i>near</i> anual; (c) <i>near</i> centenário; (d) <i>far</i> anual; (e) <i>far</i> centenário.	147
Figura 65 – Resumo das simulações realizadas.	148
Figura 66 – Proporção das quebras de restrição.	149
Figura 67 – Histórico do processo na busca pelo ponto ótimo.	150
Figura 68 – Histórico do processo na busca pelo ponto ótimo.	151
Figura 69 – Espaço objetivo do problema multiobjetivo analisado.	151
Figura 70 – Configuração ótima encontrada: (a) posição neutra; (b) <i>near</i> anual; (c) <i>near</i> centenário; (d) <i>far</i> anual; (e) <i>far</i> centenário.	152

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Coordenadas dos fatores definidos aleatoriamente.	51
Tabela 3.2 – Correlação linear entre as variáveis para o caso de seleção aleatória.	52
Tabela 3.3 – Coordenadas dos fatores definidos pelo método fatorial.....	53
Tabela 3.4 – Correlação entre as variáveis para o exemplo do método fatorial.....	53
Tabela 6.1 – Trechos que compõem o riser.....	115
Tabela 6.2 – Propriedades do riser.	116
Tabela 6.3 – Dados do teste de hipótese para o efeito das variáveis no fator de utilização de tensão.....	126
Tabela 6.4 – Dados do teste de hipótese para o efeito das variáveis no fator de volume.....	126
Tabela 6.5 – Dados do teste de hipótese para o efeito das variáveis no raio de curvatura.	127
Tabela 6.6 – Dados do teste de hipótese para o efeito das variáveis na tensão combinada de von Mises.....	127
Tabela 6.7 – Dados do teste de hipótese para o efeito das variáveis na tração efetiva.....	127
Tabela 6.8 – Dados da configuração ótima encontrada.	152
Tabela 6.9 – Valores da restrições e da função objetivo para a configuração ótima encontrada.	153

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Significância estatística
d	Distância diagonal entre o topo e a base do <i>riser</i>
d_{flut}	Diâmetro do flutuador
d_{ext}	Diâmetro externo do <i>riser</i>
d_{int}	Diâmetro interno do <i>riser</i>
d_{flut1}	Diâmetro do maior flutuador
e_{peso}	Espessura do revestimento pesado
e_{term}	Espessura do revestimento térmico
ε	Componente de erro aleatório
$facVM$	Fator de utilização de tensão
$facVol$	Fator de volume
$flut_{tot}$	Proporção do trecho total com flutuadores
f_{obj}	Função objetivo
f_{obj_I}	Primeira função objetivo avaliada
$f_{obj_{II}}$	Segunda função objetivo avaliada
$f_{obj_{III}}$	Terceira função objetivo avaliada
FX	Tração efetiva
g_i	i-ésima restrição de desigualdade
h_j	j-ésima restrição de igualdade
H_0	Hipótese nula
H_1	Hipótese alternativa
lb_k	Limite inferior da variável de projeto k
L_{inf}	Comprimento do trecho de <i>riser</i> inferior
L_{int}	Comprimento do trecho de <i>riser</i> intermediário
L_{flut}	Comprimento total de flutuador
L_m	Comprimento de cada módulo de flutuador
L_{peso}	Comprimento do revestimento pesado
L_{riser}	Comprimento total do <i>riser</i>
L_{sup}	Comprimento do trecho de <i>riser</i> superior

L_{inf}	Proporção do trecho de <i>riser</i> inferior
L_{sup}	Proporção do trecho de <i>riser</i> superior
L_{TSJ_topo}	Comprimento da <i>stress-joint</i> de topo
L_{TSJ_base}	Comprimento da <i>stress-joint</i> de base
μ	Média da população
n	Quantidade de experimentos planejados
n_i	Quantidade de níveis considerada para o fator i
n_h	Número de restrições de igualdade
n_g	Número de restrições de desigualdade
n_x	Número de variáveis de projeto
$offset$	<i>Offset</i> horizontal entre o topo e a base do <i>riser</i>
OF	<i>Overlength fraction</i>
$peso$	Proporção do trecho de revestimento pesado
$pOffset$	Proporção do <i>offset</i> horizontal em relação a lâmina d'água
RC	Raio de curvatura
S^2	Variância da amostra
S_p^2	Estimador combinado da variância da população
σ^2	Variância da população
σ_{adm}	Tensão admissível do aço
σ_{serv}	Tensão em serviço do <i>riser</i>
t	Parâmetro calculado do teste de <i>Student</i>
t_{cr}	Parâmetro crítico do teste de <i>Student</i>
ub_k	Limite superior da variável de projeto k
V_{flut}	Volume total de flutuador
V_{riser}	Volume total do <i>riser</i>
V_{peso}	Volume total de revestimento pesado
VME	Tensão de von Mises na parede externa do <i>riser</i>
VMI	Tensão de von Mises na parede interna do <i>riser</i>
x	Vetor de variáveis de projeto
\bar{X}	Média da amostra

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	<i>American Bureau of Shipping</i>
AG	Algoritmos Genéticos
API	<i>American Petroleum Institute</i>
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
CVAR	<i>Compliant Vertical Access Riser</i>
DDCV	<i>Deep Draft Caisson Vessel</i>
DNV	<i>Det Norske Veritas</i>
DOE	<i>Design of Experiments</i>
DOT	<i>Deep Offshore Technology</i>
ELA	Estado Limite Acidental
ELF	Estado Limite de Fadiga
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
FPSO	<i>Floating Production Storage and Offloading</i>
FPU	<i>Floating Production Unit</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
LCCV	Laboratório de Computação Científica e Visualização
MEF	Método dos Elementos Finitos
MGA	Micro Algoritmo Genético
MMS	<i>Minerals Management Service</i>
MOGA	<i>Multi-Objective Genetic Algorithm</i>
MOOP	<i>Multi-Objective Optimization Problem</i>
MSR	Metodologia de Superfície de Resposta
NPGA	<i>Niched Pareto Genetic Algorithm</i>
NSGA	<i>Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm</i>
NSGA-II	<i>Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i> (Enxame de Partículas)
PUC	Pontifícia Universidade Católica
SCR	<i>Steel Catenary Riser</i>
SIA	Sistema Imunológico Artificial
SOOP	<i>Single-Objective Optimization Problem</i>
SPEA	<i>Strength Pareto Evolutionary Algorithm</i>
SQP	<i>Sequential Quadratic Programming</i>

TDP	<i>Touch Down Point</i>
TLP	<i>Tension Leg Platform</i>
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
USP	Universidade de São Paulo
VEGA	<i>Vector Evaluated Genetic Algorithm</i>
VIV	<i>Vortex Induced Vibration</i>

SUMÁRIO

1	Introdução	17
1.1	Motivação e relevância do tema	18
1.2	Técnicas de otimização aplicadas à Engenharia	21
1.2.1	Otimização aplicada a projetos de estruturas <i>offshore</i>	22
1.3	Objetivo	27
1.3.1	Objetivos específicos	27
1.4	Metodologia.....	27
1.5	Escopo do trabalho.....	29
2	Aspectos do projeto de <i>risers</i>	31
2.1	<i>Risers</i>.....	31
2.2	Considerações de carregamento.....	37
2.3	Análise estrutural.....	38
2.4	Verificações estruturais	40
2.5	Metodologia de projeto	41
2.5.1	Metodologia tradicional de projeto.....	44
2.5.2	Metodologia de projeto otimizado	44
3	Planejamento de experimentos	46
3.1	Planejamento de experimentos com vários fatores	50
3.1.1	Experimentos fatoriais	55
3.1.1.1	Projeto simples – Um fator por vez	55
3.1.1.2	Fatorial completo	56
3.1.1.3	Fatorial fracionado	58
3.1.2	Metodologia de superfície de resposta (MSR).....	59
3.2	Análise dos resultados: inferência estatística	60
3.2.1	Teste de hipóteses.....	61
4	Otimização	69

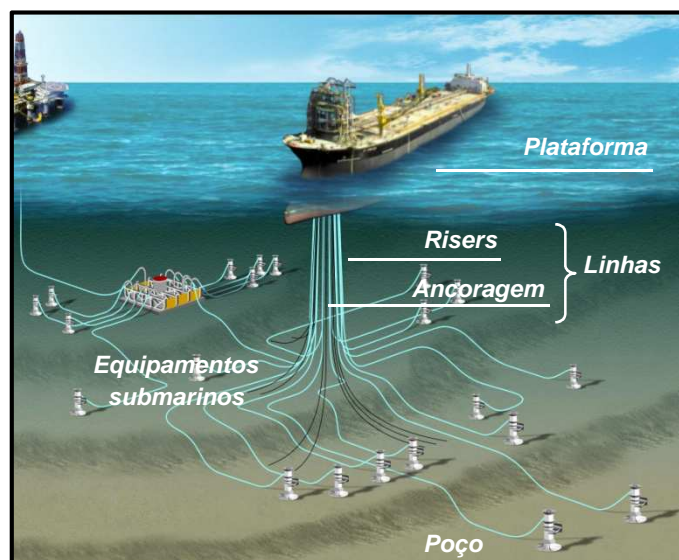
4.1	Conceitos básicos	70
4.1.1	Função objetivo.....	70
4.1.2	Variáveis de projeto.....	70
4.1.3	Restrições.....	71
4.1.4	Espaço de busca.....	71
4.1.5	Ponto ótimo.....	72
4.2	Otimização multiobjetivo	72
4.2.1	Dominância de Pareto.....	75
4.2.2	Abordagens da otimização multiobjetivo.....	78
4.3	Métodos clássicos multiobjetivo	79
4.4	Algoritmos evolutivos multiobjetivo	80
4.4.1	Algoritmos genéticos.....	82
4.4.1.1	Definições gerais.....	83
4.4.1.2	Operadores genéticos.....	85
4.4.1.3	Parâmetros dos algoritmos genéticos.....	88
4.4.1.4	MOGA (<i>Multiobjective Genetic Algorithm</i>).....	90
4.4.1.5	NSGA (<i>Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm</i>).....	92
4.4.1.6	NSGA-II (<i>Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm</i>).....	94
5	Riser Vertical Complacente (CVAR)	97
5.1	Descrição geral	98
5.2	Componentes do riser	100
5.3	Definição do problema de otimização	104
5.3.1	Variáveis de projeto.....	104
5.3.2	Função Objetivo.....	107
5.3.3	Restrições.....	110
5.3.3.1	Máxima tensão de von Mises.....	111
5.3.3.2	Tração efetiva.....	111
5.3.3.3	Raio de curvatura.....	111
5.4	Comentários gerais	111
6	Exemplo de aplicação	113

6.1	Descrição do modelo	114
6.2	Descrição do cenário ambiental.....	116
6.3	Modelagem do problema de otimização	117
6.3.1	Fluxo de otimização (<i>workflow</i>).....	117
6.3.2	Dados de entrada.....	118
6.3.3	Fluxo de processos.....	119
6.3.4	Variáveis de saídas	119
6.3.5	Objetivos e restrições	120
6.4	Planejamento de experimentos e análise de sensibilidade.....	120
6.5	Análise de otimização.....	138
6.5.1	Análise mono-objetivo: minimização do fator de volume.....	139
6.5.2	Análise mono-objetivo: maximização do fator de utilização de tensão	144
6.5.3	Análise multiobjetivo: maximização do fator de utilização de tensão e minimização do volume.....	148
6.5.4	Comparação das abordagens avaliadas	152
7	Conclusões	155
7.1	Sugestões de trabalhos futuros	158
	Referências.....	160

1 INTRODUÇÃO

A exploração de petróleo no mar demanda o projeto de um conjunto de equipamentos e estruturas complexas que se dividem basicamente em quatro grupos: plataforma, linhas, poços e equipamentos submarinos. Cada elemento desse sistema estrutural *offshore* requer um projeto específico e deve atender a requisitos particulares, o que exige bastante tempo e recursos no seu desenvolvimento e execução. A Figura 1 ilustra a complexidade de um sistema *offshore* de produção de petróleo, que fica em operação durante, em média, 20 anos em grandes profundidades.

Figura 1 – Sistema *offshore* para exploração de petróleo.



Fonte: Adaptada de Total (2010)

No âmbito desse sistema estrutural, as linhas são divididas em dois tipos: *risers* e linhas de ancoragem. As linhas de ancoragem são responsáveis por manter a posição da plataforma, limitando seus movimentos. Os *risers* de produção, elemento estrutural foco do presente trabalho, são as estruturas responsáveis pela condução do óleo e gás produzidos do poço até a plataforma.

Atualmente, no Brasil, as maiores reservas de petróleo estão localizadas na plataforma continental, em águas profundas (300 m a 1500 m) e ultraprofundas (acima de 1500 m). A revista Valor Econômico (2010) relata que a produção de petróleo brasileiro em águas profundas quase duplicou nos últimos cinco anos, para

cerca de dois milhões de barris de óleo equivalente diários, e deve dobrar outra vez até 2020.

Grande parte desse crescimento previsto para a produção é baseado nas recentes descobertas das reservas encontradas na camada pré-sal do litoral brasileiro, que se estendem do litoral do Estado do Espírito Santo ao de Santa Catarina e chegam a atingir até 200 quilômetros de largura. Essas reservas, estimadas em grandes volumes, são consideradas de média a alta qualidade, segundo a escala API, sendo de grande valor econômico.

Entretanto, para extrair o óleo e o gás da camada pré-sal, é necessário ultrapassar uma lâmina d'água de mais de 2000 m, uma camada de cerca de 2000 m de sedimentos e outra de aproximadamente 2000 m de sal. É um processo complexo e que demanda inovação tecnológica, tempo e dinheiro. São inúmeros os desafios tecnológicos da exploração do petróleo do pré-sal, e.g. instabilidade da camada de sal, altas temperaturas e pressões, elevadas profundidades, entre outros. A superação desses desafios proporciona um elevado crescimento e desenvolvimento tecnológico, econômico e social ao Brasil.

No que tange ao desafio imposto pelas elevadas profundidades de exploração, que impõem condições severas de operação, torna-se cada vez mais complexa a implantação de sistemas estruturais para produção de petróleo *offshore*. Um dos desafios enfrentados é a busca por configurações de *risers* capazes de suportar os esforços impostos à estrutura e que sejam ainda viáveis economicamente. Em campos situados em grandes profundidades, a utilização de configurações tradicionais de *risers*, tais como os *risers* em catenária, pode se apresentar inviável, tornando-se necessário o estudo e desenvolvimento de novas alternativas, aumentando a complexidade e o custo de tais estruturas. Uma das mais recentes alternativas de *riser* em estudo é o *riser* vertical complacente, CVAR (do inglês *Compliant Vertical Access Riser*), objeto de estudo do presente trabalho, que possui uma geometria e composição diferenciadas capazes de superar os desafios impostos pelas elevadas profundidades de exploração.

1.1 MOTIVAÇÃO E RELEVÂNCIA DO TEMA

Em geral, os projetos em engenharia devem atender a dois princípios fundamentais: viabilidade técnica e viabilidade econômica, ou seja, busca-se o

dimensionamento de sistemas estruturais que atendam com segurança aos critérios de operação e, ao mesmo tempo, satisfaçam os requisitos econômicos. No projeto de estruturas para exploração de petróleo em alto mar esses dois aspectos ganham uma dimensão ainda maior. Dada à complexidade das operações executadas para a extração do petróleo aliada às condições ambientais muitas vezes severas, a exploração de petróleo caracteriza uma operação de alto risco, ressaltando a importância da adequada avaliação da viabilidade técnica do sistema estrutural.

A avaliação da viabilidade econômica é também de fundamental importância em função do elevado custo do projeto dos sistemas marítimos. A título de exemplificação, Morooka em entrevista a Exame (2008) faz uma estimativa simplificada do custo da implantação de *risers*. Segundo Morooka, cada metro de *riser* custa aproximadamente 1000 dólares. No caso da utilização de *risers* com 3000 m de comprimento para exploração de petróleo em águas profundas, cada *riser* custa 3 milhões de dólares. Cada plataforma pode ser conectada a algo em torno de 20 a 50 *risers*, ou seja, o custo apenas dos *risers* de um sistema marítimo está em torno de 150 milhões de dólares. A partir dessa estimativa é possível perceber a importância da avaliação da viabilidade econômica no projeto de sistemas *offshore* para exploração de petróleo, bem como a necessidade do desenvolvimento de estudos e técnicas capazes de aliar eficiência, segurança e economia no desenvolvimento de projetos.

No contexto da engenharia *offshore*, para um dado campo e determinada condição de operação, existe um grande número de possibilidades de configurações de *risers*, sendo algumas delas viáveis tanto técnica quanto economicamente e outras não atendendo a nenhum desses dois critérios. A avaliação de todas essas possíveis configurações na busca pela melhor opção demanda um elevado tempo e um alto custo computacional.

Essas dificuldades foram enfrentadas durante o projeto de estudo de viabilidade de *risers* verticais complacentes, desenvolvido pelo Laboratório de Computação Científica e Visualização (LCCV/UFAL) em parceria com a Petrobras. O estudo da configuração CVAR foi motivado pela viabilização da exploração de petróleo em águas profundas, em condições de mar severas, agregando as vantagens proporcionadas por esse tipo de configuração, entre elas: atenuação da dinâmica do *riser*, acesso vertical a poços distantes, viabilização de operações de

workover diretamente da plataforma de produção e viabilização de completação seca.

Inicialmente, para tal estudo de viabilidade foi utilizado o processo tradicional de projeto, via tentativa e erro, no qual a cada tentativa as variáveis de projeto eram ajustadas com base na intuição quanto ao comportamento da estrutura, e a configuração obtida era então avaliada quanto as suas condições operacionais e de integridade estrutural. Seguindo essa metodologia, o tempo necessário e a qualidade do projeto final tornam-se extremamente dependentes da experiência do projetista e facilmente passível a erros. Dada a não linearidade do comportamento de um *riser*, a experiência do projetista é fundamental na definição de mudanças adequadas na configuração, visto que uma alteração que melhore o desempenho em um caso pode vir a piorá-lo em outro.

Além disso, a definição da geometria dos *risers* verticais complacentes é dependente de nove variáveis de projeto, o que aumenta a complexidade do problema, uma vez que cresce o número de possíveis configurações, ou seja, aumenta o domínio de busca do problema. Essa complexidade está diretamente relacionada ao tempo e custo computacional demandados. Em função desse aspecto, aliado à dificuldade de obtenção de uma configuração com desempenho estrutural e operacional favoráveis, verificou-se a ineficiência da metodologia tradicional adotada, o que motivou fortemente o desenvolvimento do presente estudo.

Dessa forma, para minimizar as dificuldades apresentadas, o presente trabalho aborda a aplicação de técnicas de otimização no projeto de *risers* verticais complacentes, permitindo a obtenção de configurações que, além de viáveis, são as melhores de acordo com uma determinada medida objetiva de eficiência, em pouco tempo e de forma automática. Neste sentido, a utilização de técnicas de otimização simplifica e acelera o projeto desse tipo de estrutura.

Em resumo, destacam-se os seguintes aspectos motivadores do estudo aqui apresentado:

- Viabilizar exploração de petróleo em águas profundas, agregando os benefícios proporcionados pela configuração CVAR;
- Obter configurações de *riser* em compromisso simultâneo com viabilidade técnica e viabilidade econômica;

- Obter uma metodologia eficaz de projeto, que garanta resultados ótimos no menor tempo possível.

Para tanto, destacam-se dois focos principais do trabalho aqui desenvolvido: o estudo de *risers* verticais complacentes e a aplicação de técnicas de otimização para o dimensionamento desse tipo inovador de configuração geométrica de *risers*.

1.2 TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO APLICADAS À ENGENHARIA

Na literatura é possível encontrar diversos estudos e aplicações de técnicas de otimização na solução de uma gama de problemas nas mais diferentes áreas. Tais aplicações demonstram que a otimização é uma ferramenta essencial na redução de custos e no aumento da eficiência dos sistemas, tendo larga aplicação tanto em estudos acadêmicos quanto na prática industrial.

Como exemplo da aplicação da otimização em logística, Rosa (2006) descreve uma metodologia para a solução do problema do *layout* submarino, buscando otimizar a localização de plataformas de produção e dos traçados de linhas que conectam os poços às plataformas. Para cada possível posição da plataforma, são calculadas as vazões médias anuais e os custos das linhas correspondentes. Em seguida, é feita uma comparação entre a otimização pela maximização das vazões e a minimização de custos de investimento.

Matta (2007) estuda a otimização do processo de canhoneio de um poço de produção. Nesse processo, um canhão especial desce pelo interior do revestimento e, quando acionado da superfície, provoca perfurações no aço e no cimento, abrindo furos nas zonas portadoras de óleo ou gás, e permitindo o escoamento desses fluidos para o interior do poço. Quanto aos aspectos dessa operação, busca-se otimizar a vazão de produção.

Souza (2010) propõe diretrizes para a modelagem e simulação de escoamento multifásico em dutos de produção de óleo e gás natural. É apresentada uma função objetivo que considera os custos de capital anualizado sobre os equipamentos, custos operacionais e as receitas provenientes do petróleo produzido levando em conta as restrições na disponibilidade de gás.

Na área de estruturas civis, as técnicas de otimização encontram uma forte tendência de aplicação. Carvalho (2002) apresenta um sistema computacional para análise e otimização do pré-projeto de pontes estaiadas via programação

multiobjetivo. Cortês (2002) realiza uma análise de otimização de treliças planas. Em seu trabalho, o autor trata da otimização do peso de treliças planas com geometria e topologia fixadas. Nesse caso, a minimização do peso da treliça resultará em uma estrutura leve, de fácil e rápida execução, garantindo ainda o menor custo.

1.2.1 OTIMIZAÇÃO APLICADA A PROJETOS DE ESTRUTURAS *OFFSHORE*

Aplicações importantes, relacionadas à otimização, também são encontradas na área naval. Oliveira (2008), Aubault *et al.* (2007), Brogan e Wasserman (2003) Burgos (2008) e Maisonneuve *et al.* (2003), por exemplo, desenvolvem estudos envolvendo o dimensionamento de plataformas para exploração de petróleo em alto mar. Como foco no dimensionamento de plataformas, a forma e a disposição de elementos estruturais constituintes são objetos de otimização, na busca do melhor desempenho possível, em termos de minimização dos custos, dos movimentos da plataforma, do peso total da estrutura, da maximização da eficiência, entre outros aspectos.

A aplicação de técnicas de otimização também se estende ao projeto de linhas de ancoragem e *risers*. Albrecht (2005) aplica o método dos algoritmos evolutivos na otimização de sistemas de ancoragem. Nesse sentido, a função objetivo utilizada consiste na minimização do máximo *offset* da plataforma entre os diversos casos ambientais, sendo respeitadas as restrições dos limites de tração na linha. No estudo são utilizados os métodos de otimização Micro Algoritmo Genético (MGA) e Enxame de Partículas (PSO). Com os resultados obtidos, o autor chega à conclusão de que os métodos de otimização baseados em algoritmos evolutivos, principalmente o PSO, são altamente recomendados para a utilização em otimização de sistemas de ancoragem, conseguindo uma melhora sensível no nível de tração a que o sistema trabalha. Nas análises realizadas apenas simulações estáticas foram consideradas. O autor justifica tal simplificação pelo fato de que o custo computacional da análise dinâmica é bastante elevado.

Shafieefar e Rezvani (2007) realizam o estudo e aplicação da otimização com o objetivo de utilizar uma metodologia eficiente para encontrar o melhor sistema de ancoragem de plataformas flutuantes no menor tempo possível, tendo como medida de eficiência a redução dos movimentos da plataforma. No problema avaliado pelos referidos autores, são definidas como variáveis de projeto o tipo de material

utilizado, padrão do sistema de ancoragem, posicionamento da plataforma e o comprimento da linha de ancoragem. As restrições consideradas consistem nos fatores de segurança das linhas e limites geométricos das mesmas. Para solução do problema de otimização proposto os autores utilizam o método dos algoritmos genéticos e demonstram por meio de exemplos que esse método é capaz de fornecer a solução ótima desejada de forma eficaz.

Monteiro (2008) também se dedica ao estudo da aplicação do PSO na otimização de sistemas de ancoragem de unidades flutuantes para exploração de petróleo *offshore*. As variáveis livres escolhidas para a otimização do sistema de ancoragem são três: o raio de ancoragem, a tração média e o azimute das linhas. A função objetivo utilizada é o *offset* da plataforma, que deve ser minimizado. Para poupar custos computacionais, tendo em vista que a análise dinâmica é muito onerosa, apenas a análise estática é realizada nesse estudo. Com base nos resultados obtidos, o autor comenta que a aplicação da otimização por meio de algoritmos evolutivos, especialmente o PSO, 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. Ressalta ainda 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.

Larsen e Hanson (1999) apresentam um estudo da otimização de um *riser* rígido em catenária, tomando como função objetivo o custo do material e tendo como única variável de projeto o diâmetro externo do duto. Dessa forma, busca-se o valor da espessura mínima, que resultará no custo mínimo, capaz de manter a tensão combinada abaixo do limite admissível e ainda evitar o colapso por flambagem da estrutura. Para solução os autores utilizam o algoritmo SQP (do inglês *Sequential Quadratic Programming*), no qual o problema de otimização é dividido em uma série de problemas quadráticos. Nos estudos realizados por esses autores a otimização é feita com base apenas na análise estática.

Rodrigues (2004) apresenta um estudo do desenvolvimento de ferramentas computacionais para otimização da configuração do equilíbrio estático tridimensional de linhas em sistemas híbridos de *risers*. Nesse sistema, o *riser* assume uma configuração na qual é dividido em dois diferentes segmentos, onde do topo até uma

bóia de superfície intermediária é utilizado um *riser* flexível, denominado *jumper*; e da bóia até a cabeça do poço é utilizado um trecho de *riser* rígido e há um tendão ligado à bóia. A função objetivo utilizada é o custo dos elementos do sistema, respeitadas as restrições físicas determinantes na viabilidade técnica de utilização do sistema. A otimização estrutural é feita através de algoritmos genéticos.

Vieira (2008) apresenta um estudo de otimização de sistemas de *risers* em *lazy-wave* através de uma metodologia utilizando algoritmos genéticos integrada com estratégias de computação paralela, de forma a reduzir o alto custo computacional das análises necessárias à avaliação do comportamento dos *risers*. Nas simulações realizadas foram consideradas tanto a estática quanto a dinâmica do sistema. Também nesse estudo, considera-se o custo total do *riser* como função objetivo. Ao final do estudo, os resultados obtidos são comparados com aqueles resultantes da análise paramétrica, constatando-se que as soluções obtidas por ambos os métodos são semelhantes, com uma grande vantagem de tempo para o método de otimização, uma vez que este não envolve a simulação de todas as possibilidades de solução.

Com aplicação no dimensionamento de *risers* em configuração *lazy-wave*, Vieira (2009) utiliza os métodos de algoritmos genéticos (AG), sistema imunológico artificial (SIA) e PSO para o desenvolvimento de uma ferramenta de otimização desse tipo de estrutura. Avaliando o problema a partir desses três métodos, o autor busca identificar qual a metodologia capaz de encontrar a solução mais econômica, que melhor atenda aos requisitos de projeto, e que também execute o menor número de avaliações da função objetivo, que no caso consistiu no custo total do *riser*. No desenvolvimento do estudo simplificações são assumidas, de modo que as simulações para avaliar o comportamento estrutural do *riser* são feitas pela equação da catenária ao invés de se utilizar simulações dinâmicas no domínio do tempo. Em seus resultados, o autor mostra que o SIA é o método que melhor consegue alcançar os objetivos propostos.

Tanaka (2009) também se dedica ao estudo e aplicação de otimização na configuração de *risers* em catenária complexa *lazy-wave*. Em seu estudo, o autor faz a utilização de diferentes métodos de otimização (algoritmos genéticos, método do recozimento simulado e métodos de programação matemática), comparando o desempenho de cada um para a solução do problema analisado e ainda compara a avaliação da otimização para diferentes funções objetivo: custo, máxima tensão

estática e máxima amplitude de tensão combinada calculada ao longo do *riser*, dentre todos os casos dinâmicos. Com o objetivo de reduzir o tempo total de análise do problema, o autor propõe um estudo utilizando três diferentes abordagens: técnicas de otimização, análise dinâmica no domínio da frequência e o uso de computação paralela. A partir dos resultados obtidos o autor mostra que a função objetivo com base na máxima amplitude de tensão combinada é a mais adequada para o problema estudado e que a partir da utilização dos métodos probabilísticos de algoritmos genéticos e recozimento simulado é possível conseguir em pouco tempo e de maneira automática uma configuração ótima.

A otimização de *risers* rígidos em configuração *lazy-wave* também é abordada por Andrade *et al.* (2010). Os autores comentam que a aplicação de técnicas de otimização no dimensionamento de *riser* em *lazy-wave* é importante, pois, ainda que o comportamento estrutural desse tipo de configuração já seja bastante conhecido e apresente bons resultados em termos de fadiga e carga extrema, a busca pela melhor configuração é bastante demorada e possui um custo computacional elevado associado. Adicionalmente, qualquer mudança nos parâmetros geométricos que definem o *riser* afeta diretamente seu comportamento dinâmico, dificultando ainda mais o processo de dimensionamento desse tipo de estrutura. Com o intuito de minimizar esses problemas, os autores formulam o dimensionamento de um *riser* em *lazy-wave* em termos de um problema de otimização, considerando como variáveis de entrada o ângulo de topo, o comprimento do segmento do *riser* com flutuador e o comprimento dos segmentos sem flutuadores. Os parâmetros de resposta de interesse ao problema são a máxima projeção horizontal, a projeção vertical, comprimento do trecho de *riser* apoiado no solo, comprimento de *riser* suspenso, comprimento total do *riser*, o número de flutuadores e a força resultante nos flutuadores. Como medida objetiva de eficiência são consideradas a minimização do volume dos flutuadores, a minimização da tensão no topo do *riser* e do fator de utilização do *riser* estabelecido como critério pela norma. As simulações das configurações de *riser* são feitas no programa Anflex (Anflex, 2009) considerando análises estáticas e dinâmicas. As análises de otimização são feitas por meio do programa modeFRONTIER® (ModeFRONTIER, 2011) utilizando o método NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*). Uma vez que se trata de um problema multiobjetivo, ao final das análises são encontradas várias soluções ótimas, dentre as quais, utilizando critérios adicionais, uma solução é selecionada.

Com base na revisão bibliográfica apresentada nesta seção, observa-se que diversas aplicações de técnicas de otimização no projeto de estruturas *offshore* já foram realizadas com sucesso e resultaram em grande ganho de eficiência nos projetos. Embora tenham obtido resultados interessantes, alguns estudos, por simplificação, limitaram-se às análises estáticas de seus elementos estruturais. Nesses casos os próprios autores reconhecem a necessidade de utilização de condições dinâmicas na otimização, especialmente levando-se em conta a alta sensibilidade a movimentos verticais da plataforma apresentada por *risers* rígidos instalados em catenária.

Como contribuição a essa literatura específica de otimização de *risers*, o presente trabalho apresenta o estudo e aplicação da otimização no dimensionamento de uma nova configuração desse tipo de estrutura, o *riser* vertical complacente, englobando a avaliação tanto estática quanto dinâmica do *riser*. A incorporação da análise dinâmica no processo de otimização demanda um elevado tempo de simulação e custo computacional, sendo essa a razão pela qual apenas três autores citados nesta revisão bibliográfica (Vieira, 2008; Tanaka, 2009; Andrade *et al.*, 2010) tenham englobado tal consideração em seus respectivos projetos. Com o objetivo de minimizar os problemas relacionados ao custo computacional demandado pelos processos de otimização que envolvem simulação numérica, o presente trabalho faz uso de um cluster computacional, o que permite que simulações de diferentes configurações sejam realizadas paralelamente.

Seguindo a linha do estudo realizado por Tanaka (2009), o presente trabalho aborda a avaliação do problema a partir de diferentes funções objetivo, uma baseada na minimização do volume dos materiais utilizados e outra baseada em critérios estruturais, avaliando o fator de utilização de tensão dinâmica. Como diferencial, no estudo aqui proposto é também avaliada uma função multiobjetivo, combinando as funções minimização de volume e maximização do fator de utilização de tensão dinâmica.

Uma contribuição adicional do presente trabalho é a análise de sensibilidade quanto ao comportamento do CVAR em termos de suas variáveis de dimensionamento. Essa análise é realizada por meio de técnicas estatísticas de planejamento de experimentos e análise de significância. Por meio dessa abordagem é possível compreender melhor o comportamento estrutural do CVAR

bem como identificar as variáveis de projeto mais relevantes ao dimensionamento desse tipo de estrutura.

1.3 OBJETIVO

Dada à motivação apresentada, o presente trabalho tem dois principais objetivos: o estudo do comportamento de *riser* verticais complacentes e a aplicação da metodologia de otimização ao processo de projeto desse tipo de configuração de *riser*.

1.3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar o comportamento e as características determinantes no dimensionamento de *risers* verticais complacentes;
- Formular o dimensionamento de *risers* verticais complacentes em termos de um problema de otimização;
- Contribuir com a abordagem do dimensionamento de *risers* em geral por meio de uma metodologia de projeto eficiente, com aplicação específica no dimensionamento de *risers* verticais complacentes;
- Contribuir com informações e indicações relevantes em relação ao dimensionamento da configuração CVAR.

1.4 METODOLOGIA

A partir do problema real aqui estudado, que consiste no dimensionamento de *risers* para produção de petróleo em águas profundas, hipóteses simplificadoras são assumidas de modo a obter um modelo físico idealizado do problema.

Na sequência, o projeto de um *riser* é então formulado em termos de um problema de otimização, obtendo-se o modelo matemático a ser avaliado e solucionado. Para tanto, faz-se necessária a definição adequada das variáveis de projeto envolvidas, das restrições impostas por normas ou condições de operação previstas, e da medida objetiva de eficiência, caracterizada por uma ou mais funções objetivo. A obtenção da formulação mais adequada é feita por meio do estudo das características e do comportamento estático e dinâmico da estrutura analisada.

A etapa subsequente consiste na implementação do modelo formulado. Nessa etapa é necessário estudar os métodos de otimização aplicáveis e mais adequados para a resolução do problema de otimização específico em estudo. Com a formulação do problema e método de solução definidos, os mesmos são modelados com o auxílio de ferramentas computacionais. No presente trabalho a solução do problema de otimização é feita por meio do programa modeFRONTIER® (modeFRONTIER, 2011), que consiste em um programa comercial de otimização multiobjetivo com larga aplicação em diversas áreas e que disponibiliza uma grande variedade de métodos de otimização. Neste programa é possível detalhar e modelar o fluxo de otimização já formulado e obter a solução desejada utilizando o método de otimização estabelecido previamente em estudo. Durante a solução do problema de otimização, para avaliação da função objetivo se faz necessária a simulação estática e dinâmica do *riser*. Para tanto, utiliza-se neste trabalho o programa Anflex (Anflex, 2009), programa desenvolvido pela Petrobras e utilizado nos cálculos estruturais de linhas de ancoragem e *risers*. Na modelagem do problema, o Anflex é acoplado ao modeFRONTIER® automatizando o processo de otimização via simulação.

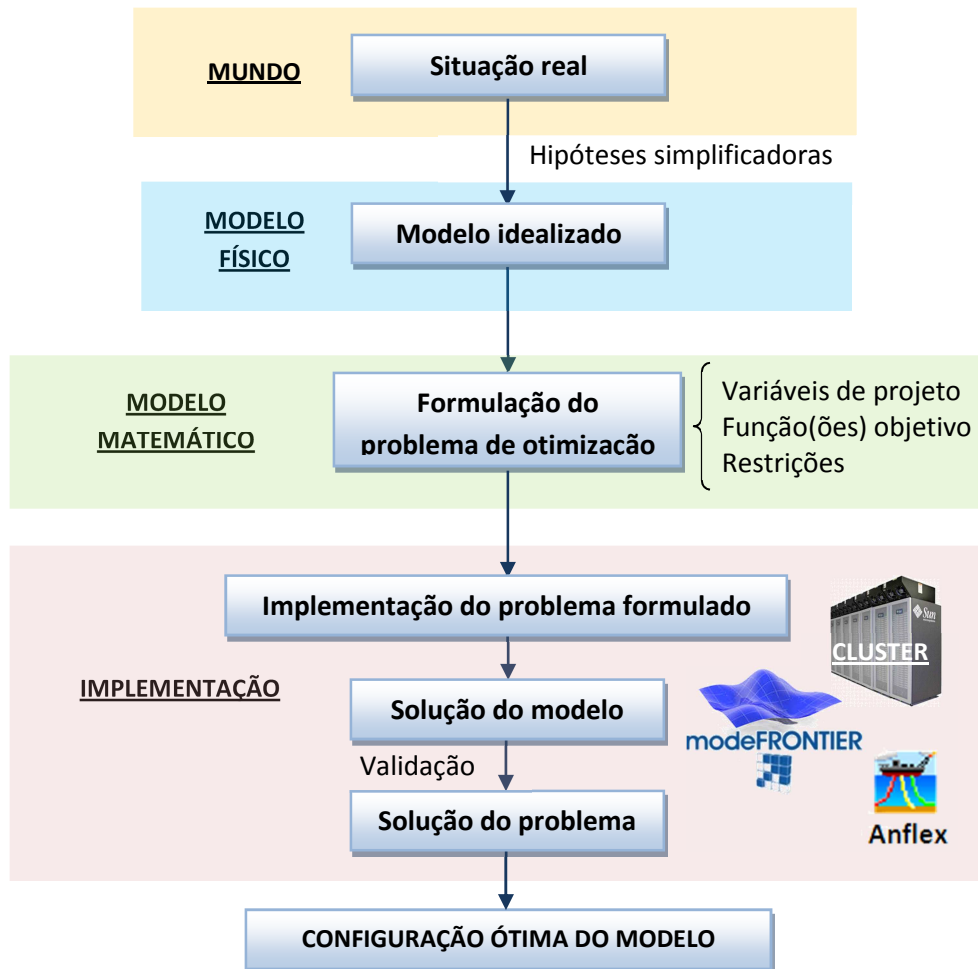
Uma vez que o problema aqui abordado envolve simulações computacionais que demandam elevado tempo e custo computacional, uma alternativa adicional para melhorar o desempenho da solução é o uso de um *cluster* computacional, que permite dividir a tarefa executada entre vários processadores que trabalham em paralelo.

Previamente às análises de otimização é feito um estudo de sensibilidade quanto aos parâmetros relevantes no dimensionamento do CVAR. Essa análise é também realizado no ambiente do modeFRONTIER® por meio de técnicas de planejamento de experimentos associadas a análise estatística de significância. Com base nos resultados obtidos da análise de sensibilidade é possível melhor adequar o problema formulado, retirando do mesmo as variáveis que tenham se revelado pouco significativas ao dimensionamento desse tipo de estrutura. Essa avaliação preliminar pode conduzir a uma simplificação do problema inicialmente formulado.

Na sequência, definida a modelagem do problema, são analisados alguns estudos de casos com base em dados de mar, características do *riser* e da locação em que o mesmo se encontra. Os resultados obtidos são apresentados, levantando

considerações relevantes quanto ao dimensionamento do *riser* em estudo. Apresenta-se na Figura 2 um fluxograma ilustrativo da metodologia descrita.

Figura 2 – Fluxograma ilustrativo da metodologia adotada.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

1.5 ESCOPO DO TRABALHO

O presente trabalho é composto por oito capítulos, iniciando com esta introdução que apresenta alguns conceitos iniciais do trabalho, o estado da arte, com a descrição de alguns trabalhos correlatos já desenvolvidos, bem como os objetivos almejados e a metodologia utilizada para alcançar tais objetivos. A motivação do estudo e a relevância do tema também são levantadas neste capítulo introdutório.

O Capítulo 2 apresenta uma visão geral do projeto estrutural de *risers* rígidos, destacando os principais aspectos envolvidos no dimensionamento de tais

estruturas. O objetivo é proporcionar o entendimento global do projeto de *risers* utilizados para exploração de petróleo, auxiliando nas duas primeiras etapas da metodologia, quando da compreensão da situação real e idealização do modelo físico.

Os Capítulos 3 e 4 apresentam uma revisão teórica acerca de aspectos da otimização, auxiliando e fundamentando as considerações assumidas na etapa de implementação e solução do problema. Apresentam-se no Capítulo 3 alguns conceitos sobre a metodologia de Planejamento de Experimentos, utilizada no presente trabalho como etapa preliminar à otimização. São apresentadas definições de alguns métodos existentes, com destaque aos métodos fatoriais, utilizados neste trabalho, bem como os conceitos de inferência estatística aqui aplicados para generalização das conclusões obtidas por meio dos experimentos planejados.

Na sequência, o Capítulo 4 aborda os principais conceitos sobre otimização. Também são citados e caracterizados de maneira geral os principais métodos de otimização existentes. Ressalta-se a importância desse capítulo, que fundamenta as considerações e hipóteses assumidas no desenvolvimento do trabalho.

O Capítulo 5 apresenta e caracteriza os *risers* verticais complacentes. Apresenta-se o estado da arte no que tange ao conceito estrutural dessa configuração, citando os principais trabalhos já desenvolvidos. Com base nas características dessa configuração estrutural, é feita também a caracterização e modelagem do problema de otimização a ser tratado, definindo as variáveis de projeto pertinentes, restrições e função(ões) objetivo, etapa essa referente à formulação do modelo matemático descrita na metodologia.

O Capítulo 6 é dedicado à apresentação de um exemplo de aplicação, no qual a metodologia de otimização é aplicada no dimensionamento de *risers* verticais complacentes. Os resultados obtidos são apresentados e considerações pertinentes acerca destes são levantadas.

São apresentadas no Capítulo 7 as conclusões do trabalho desenvolvido e, com base nas deficiências e dificuldades encontradas ao longo do trabalho, sugestões e direcionamentos para trabalhos futuros.

2 ASPECTOS DO PROJETO DE *RISERS*

O comportamento estrutural dos sistemas de *riser* já é bastante conhecido e difundido na literatura (Sparks, 2007; Bai, 2001). O dimensionamento de tais estruturas deve ser realizado de modo a atender os requisitos funcionais devidos aos carregamentos correspondentes ao fluido interno, ao meio externo, às ações ambientais e aos movimentos da unidade flutuante durante toda a sua vida útil. Os procedimentos recomendados para a adequada realização desse dimensionamento encontram-se regulamentados por normas certificadoras internacionais, sendo as principais a API-RP-2RD (1998) e a DNV-OS-F201 (2001).

De um modo geral, os conceitos e etapas de projeto apresentados nessas normas são bastante semelhantes. Entretanto, cada norma apresenta metodologias e formulações diferentes para o dimensionamento de *risers* rígidos. Froufe (2006) faz uma análise comparativa de critérios de dimensionamento de *risers* com base nas recomendações apresentadas pelas normas ABS (*American Bureau of Shipping*, 2005), DNV (DNV-OS-F201, 2001) e API (API-RP-1111, 1999) e conclui que cada norma apresenta suas considerações de carregamento de forma diferente, mas são basicamente equivalentes, levando-se em consideração cargas estáticas e dinâmicas no projeto dos *risers*.

Neste capítulo são apresentados alguns aspectos e conceitos relevantes em relação ao projeto de *risers*. Para maiores detalhes e formulação específica as normas e referências citadas devem ser consultadas.

2.1 *RISERS*

Os *risers* são estruturas tubulares que podem ser considerados elementos esbeltos, devido à baixa relação entre seu diâmetro e seu comprimento total. Ao longo de sua vida útil são submetidos a elevados carregamentos estáticos e dinâmicos devido à atuação das correntes marinhas, ondas e movimentos da plataforma.

Em geral, existem dois tipos de *risers*: os rígidos e os flexíveis; e a opção de escolha entre um ou outro depende do tipo e das condições da operação a ser realizada: lâmina d'água, pressão interna, carregamentos ambientais característicos,

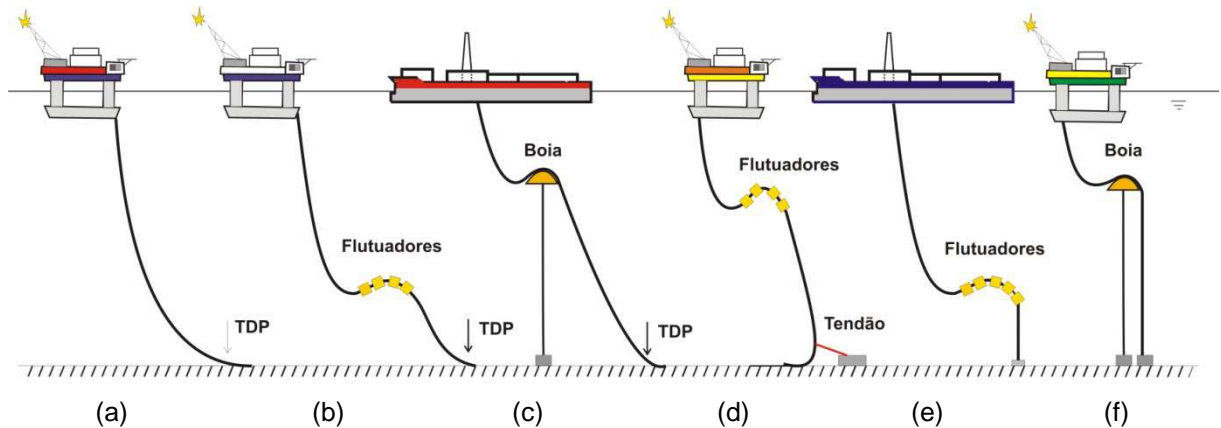
entre outros fatores. Os *risers* flexíveis são dutos especiais pré-fabricados usados em operações de produção, compostos por uma superposição de camadas plásticas, que fornecem estanqueidade interna e externa, e de camadas de material metálico espiralado, responsáveis por resistir aos esforços solicitantes. Esse arranjo complexo de camadas proporciona ao *riser* maior leveza, resistência e flexibilidade, embora torne seu custo mais elevado. Essa flexibilidade facilita o transporte e instalação desse tipo de duto, podendo o mesmo ser facilmente enrolado e transportado. Devido a essas propriedades, os *risers* flexíveis são muito utilizados na exploração de petróleo *offshore*. Entretanto, com o aumento da lâmina d'água, esta solução pode alcançar ou exceder seus limites de viabilidade técnica e econômica, devido ao alto custo de fabricação e às limitações quanto ao diâmetro de fabricação, o que motiva a busca por alternativas mais econômicas, como o *riser* rígido.

Os *risers* rígidos são formados por sequências de tubos de aproximadamente 12 m de comprimento, geralmente unidos por solda. Geralmente os *risers* rígidos são constituídos de aço. Para elevadas profundidades de exploração, situações nas quais o *riser* encontra-se submetido a elevados esforços de tração no topo devido ao peso próprio da estrutura, uma outra alternativa é o uso de titânio ou de material compósito na constituição do duto. Esses novos materiais tornam o *riser* mais leve e aumentam sua resistência estrutural.

Tanto os *risers* rígidos quanto os flexíveis podem ser instalados em diferentes configurações geométricas, a depender das condições de operação, características da locação e da unidade flutuante utilizada, bem como da disposição dos poços de exploração. Uma alternativa comum é a utilização de *risers* em catenária (Figura 3a). Nessa configuração, o *riser* fica preso à plataforma e se estende livremente até o solo. A configuração geométrica assumida é devida exclusivamente à ação do peso próprio. Esse tipo convencional de configuração consiste em uma alternativa mais econômica comparada à opção de linha flexível, e também possibilita o uso para uma grande série de diâmetros. Apesar de sua maior simplicidade de instalação e manutenção, com o aumento na lâmina d'água surgem alguns limitantes à utilização da catenária livre: excesso de tração no topo, uma vez que todo o comprimento suspenso é sustentado pelo ponto de conexão com a plataforma; compressão dinâmica, que deve ser evitada por estar relacionada à ocorrência de flambagem; baixa vida útil devido à fadiga, principalmente no ponto de contato com o solo, TDP

(do inglês *Touch Down Point*), onde ocorrem grandes amplitudes de tensão de flexão e no topo, onde ocorrem grandes amplitudes de tensão causadas pela variação de tração.

Figura 3 – Configurações de risers: (a) catenária; (b) *lazy-wave*; (c) *lazy-S*; (d) *pliant-wave*; (e) *steep-wave*; (f) *steep-S*.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Para contornar esses problemas, é comum a utilização de catenárias complexas tais como: *lazy-wave* (Figura 3b), *lazy-S* (Figura 3c), *pliant-wave* (Figura 3d), *steep-wave* (Figura 3e) e *steep-S* (Figura 3f). Essas configurações são descritas na DNV (2001) como alternativas complacentes capazes de absorver os acentuados movimentos da plataforma apenas a partir de sua geometria, sem a necessidade de utilização de elementos estruturais ou conexões adicionais específicas. Entende-se por estruturas complacentes aquelas capazes de permitir grandes deslocamentos quando submetidas às ações ambientais de onda, vento e corrente, sem que sua integridade física seja comprometida. Logo, por permitirem maiores deslocamentos, tais estruturas podem ser utilizadas em águas mais profundas e com condição ambiental mais severa.

A configuração *lazy-wave* promove o alívio do peso suspenso a partir da utilização de módulos de flutuadores distribuídos ao longo de determinada região do duto, diminuindo, conseqüentemente, a tração no topo. É também capaz de reduzir a movimentação do TDP, minimizando o efeito de fadiga e aumentando a vida útil do riser. Seu uso é indicado para grandes profundidades, onde o comprimento necessário de riser é maior, sendo o peso próprio da estrutura elevado; bem como

para locações com o comportamento característico de mar agitado, com grandes ondas.

Na configuração *lazy-S* os flutuadores são substituídos por uma bóia de subsuperfície e um tensionador sustentando a bóia no leito do mar. Dessa forma, aplica-se uma carga de maneira quase concentrada na região da bóia. De acordo com a ISO 13628-11 (2004), *risers* dispostos dessa maneira são menos adaptáveis aos movimentos da plataforma levando a maiores esforços. A vantagem na utilização desse tipo de configuração consiste na limitação dos movimentos laterais do *riser*, sendo o mesmo, dessa forma, indicado para sistemas de exploração com espaço limitado, onde há o perigo de contato entre as linhas.

Na configuração em *pliant-wave* um tendão fixa o *riser* próximo ao solo com a função de diminuir o movimento lateral por ação da corrente e evitar que os esforços sejam transferidos à extremidade. Adicionalmente, a movimentação no TDP é reduzida, aumentando a vida útil à fadiga nessa região da estrutura. Essa configuração é normalmente utilizada quando o espaço disponível no campo é pequeno ou existe o risco de ocorrência de choque entre os *risers*.

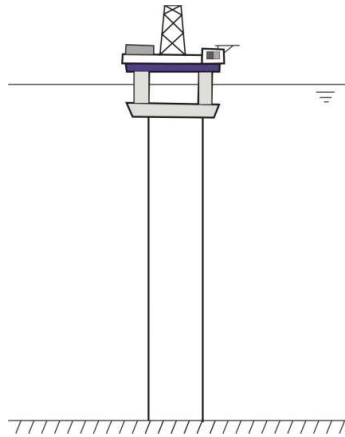
As configurações *steep-wave* e *steep-S* são semelhantes às configurações *lazy-wave* e *lazy-S* diferenciando-se dessas por apresentarem o trecho inferior sempre reto e tracionado. Em relação à configuração *wave*, o *steep* possui a vantagem de não apresentar problemas de fadiga no TDP, uma vez que o *riser*, nesse tipo de configuração, não tem contato com o solo. Essas configurações são geralmente recomendadas para situações em que exista um espaço muito pequeno para o segmento apoiado (ISO 13628-11, 2004).

As configurações mais comuns para linhas flexíveis são a catenária livre, a *lazy-wave*, a *pliant wave*, a *lazy-S*, a *steep-S* e a *steep-wave*. Entre tais configurações apenas a catenária livre e a *lazy-wave* se mostram viáveis para a utilização de *risers* rígidos.

Outra possível configuração é o *riser* rígido vertical (Figura 4). Esse tipo de configuração é utilizado em plataformas de pernas atirantadas (*Tension Leg Platform* - TLP), que tem como principal característica uma alta rigidez no plano vertical do sistema e, conseqüentemente, possuem amplitude de movimentos extremamente reduzida nessa direção. Devido a essa característica, a adoção desse tipo de sistema estrutural permite a utilização de completação seca, no qual o sistema de cabeça do poço fica posicionado na plataforma e não no fundo do mar,

como é feito tradicionalmente. Com a adoção desse sistema de completação, o conjunto de válvulas que controla a produção do poço é simples e de fácil manutenção, assim como o acesso ao poço.

Figura 4 – Riser rígido vertical.



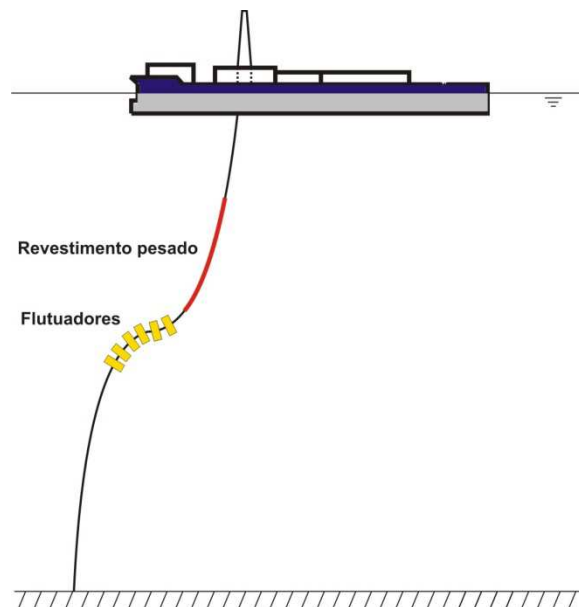
Fonte: Autor desta dissertação (2011)

A utilização de *risers* verticais impõe algumas limitações operacionais para garantir que a integridade estrutural do *riser* e as condições de operação não sejam comprometidas. O *riser* não pode sofrer grandes deslocamentos e deve estar sempre tracionado para evitar efeitos de flambagem, sendo para isso necessária a utilização de tensionadores ou compensadores de *heave* (movimento da unidade flutuante na direção vertical). Além disso, a adoção desse tipo de configuração de *riser* requer que os poços estejam próximos ou que sejam utilizados poços direcionais, agregando maior complexidade e custo na implantação do sistema de exploração.

Outra alternativa relativamente recente de configuração de *riser* para exploração de petróleo em águas profundas e ultraprofundas é o *riser* vertical complacente (Figura 5). Essa nova configuração possui uma geometria predominantemente vertical com as conexões extremas de topo e base afastadas horizontalmente a uma determinada distância denominada *offset* horizontal. Sua configuração geométrica característica é obtida a partir da utilização de um trecho com revestimento de peso adicional e outro trecho com módulos de flutuadores distribuídos ao longo de uma determinada região do *riser*. A disposição desses trechos proporciona o aumento da tração ao longo do *riser*, mantendo os trechos extremos próximos da vertical e atenuando a dinâmica da linha. O *offset* horizontal

entre o topo e a base bem como a diferença de flutuação na região de transição do *riser*, onde estão dispostos os módulos de flutuadores, geram uma leve curvatura nessa região e proporcionam uma considerável complacência ao sistema. Como vantagem em relação à configuração de *riser* rígido vertical, devido a sua complacência característica, a configuração CVAR dispensa a utilização de mecanismos de compensação do movimento e de tensionadores, já que a geometria diferenciada da configuração é capaz de absorver os movimentos da plataforma sem comprometer a integridade estrutural do *riser*. Dessa forma, o sistema estrutural é simplificando e seu custo é reduzido.

Figura 5 – Riser Vertical Complacente.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Reforçando a competitividade desse novo conceito, a geometria proposta, com os segmentos extremos do *riser* predominantemente verticais e proporcionando acesso direto ao poço, permite que as operações de completação e *workover* sejam realizadas diretamente da plataforma a partir do CVAR. A completação de poços consiste em uma etapa no processo de construção de um poço de petróleo. Precedida pela perfuração do poço, a etapa de completação é constituída por um conjunto de operações destinadas a equipar o poço para produzir o óleo ou gás ou, ainda, injetar fluidos no reservatório quando necessário. Tal operação permite que o reservatório de hidrocarbonetos seja conectado de maneira segura e controlada à

plataforma de produção, e por meio dos equipamentos instalados viabiliza o controle da vazão dos fluidos e funções auxiliares, tais como elevação artificial e aquisição de dados. O *workover* refere-se às operações de intervenção e manutenção do poço. Para a realização das atividades tanto de completação quanto de *workover* é necessária uma unidade flutuante específica. Dessa forma, ressalta-se a redução de custos proporcionada pela utilização da configuração CVAR como *riser* de produção, uma vez que dispensa a contratação de unidades específicas para as operações em questão. Tendo em vista as altas taxas diárias das unidades de completação e *workover*, bem como a carência de equipamentos, essa facilidade simplifica as operações de intervenção, o que se traduz em economia de gastos e ganho de tempo.

Mais informações sobre as diferentes configurações de *risers* existentes e ainda em estudo podem ser encontradas em Bell *et al.* (2005), que apresenta uma revisão das tecnologias de produção em águas profundas.

2.2 CONSIDERAÇÕES DE CARREGAMENTO

De um modo geral, os *risers* são submetidos a três tipos de carregamento: funcional, acidental e ambiental. As cargas funcionais são consequência da existência do sistema, ou seja, são basicamente as cargas de peso e as sobrecargas que podem variar durante a operação. As cargas acidentais estão relacionadas às condições anormais de operação, falhas técnicas ou falhas humanas, a exemplo de terremotos, explosões, tsunamis, rompimento de uma linha de ancoragem, colisão entre *risers*, entre outros. Os carregamentos ambientais são aqueles impostos pelo ambiente oceânico. Em geral, são cargas variáveis com o tempo e incluem componentes dinâmicas e estáticas. Os fenômenos ambientais mais relevantes em estruturas *offshore* são o vento, as ondas, e a corrente, sendo os dois últimos os mais importantes na análise de *risers*. Em alguns casos, tais como na análise de plataformas fixas e *risers* verticais, a avaliação da variação da maré também pode ser importante.

Em um projeto completo de um *riser* o mesmo deve ser avaliado para um conjunto mínimo de casos de carregamento, casos esses definidos a partir da combinação dos carregamentos funcionais, ambientais e acidentais. Dessa forma é possível obter a correta análise da resposta estrutural do sistema. Usualmente, essa

resposta é comparada com os limites admissíveis para condições de tensão máxima, tração efetiva mínima, deflexão e curvatura máximas, fadiga, colapso hidrostático e limites de carregamento máximo para componentes específicos. Neste trabalho são avaliadas apenas as três primeiras condições.

Geralmente, a ação direta das ondas sobre o *riser* é pequena e se restringe à região próxima à superfície do mar. No entanto, o efeito da onda sobre a plataforma é bastante significativo e esse movimento é transmitido ao topo do *riser*. A corrente é caracterizada por um perfil de velocidades que é variável em direção e intensidade ao longo da profundidade. Assim, o efeito da corrente sobre o *riser* é extremamente importante, uma vez que ela atua sobre todo o comprimento do *riser* de modo a alterar sua linha elástica e, conseqüentemente, seus modos e frequências de vibração. Há ainda o efeito indireto da ação da corrente marinha sobre a plataforma, em forma de um deslocamento no plano horizontal, conhecido como *offset* estático, da posição média desta.

As diversas ações ambientais são classificadas de acordo com seu período de retorno em centenárias, decenárias e anuais, de modo que quanto maior esse período de retorno, mais rigorosa é a condição ambiental associada. A definição do período de retorno das ações ambientais a serem consideradas no projeto depende da verificação a ser efetuada. No caso da avaliação do estado limite último, na condição de sobrevivência, são utilizados os eventos extremos, normalmente centenários. No caso da avaliação de operação e estado limite de serviço costuma-se utilizar ações ambientais com período de retorno menor, a exemplo do anual.

Uma das dificuldades encontradas no projeto de *risers* é o grande número de condições ambientais a serem avaliadas, englobando as condições de operação, eventos extremos e fadiga. Considerando-se que cada avaliação consiste em uma simulação estática e uma dinâmica, revela-se então o elevado gasto de tempo e custo computacional associados.

2.3 ANÁLISE ESTRUTURAL

Devido às características do ambiente marinho e do próprio sistema estrutural, observa-se que o comportamento dos *risers* apresenta características acentuadamente não lineares em função, entre outros fatores, dos grandes

deslocamentos verificados, da possibilidade de interação solo-linha, navio-linha e linha-linha, bem como das forças hidrodinâmicas.

Dada as características específicas dos diferentes tipos de carregamentos impostos ao sistema em estudo, as análises estruturais necessárias devem contemplar tanto efeitos estáticos quanto dinâmicos. A análise estática considera apenas os carregamentos permanentes, que não variam com o tempo, tais como as cargas funcionais e de pressão, a corrente e a parcela estática do movimento da unidade flutuante imposto no topo do *riser* (*offset*).

A avaliação do comportamento da estrutura quando submetida aos carregamentos variáveis é realizada por meio da análise dinâmica, que sucede a análise estática, tendo como ponto de partida o sistema em equilíbrio então encontrado. A análise dinâmica engloba o efeito da onda e as parcelas dinâmicas do movimento da unidade flutuante.

A solução da análise dinâmica é obtida a partir da solução das equações diferenciais do movimento, podendo ser avaliadas tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência. Vaillant (2007) faz um estudo comparativo de análises no domínio do tempo e da frequência em *risers* flexíveis. Segundo o autor o procedimento mais realista para se efetuar as análises dinâmicas é o uso de análises no domínio do tempo, uma vez que tais análises permitem melhor considerar as não linearidades inerentes ao sistema. Entretanto, as análises no domínio do tempo são bastante dispendiosas computacionalmente, e o tempo de simulação é elevado. Por outro lado, as análises no domínio da frequência são menos dispendiosas, mas tratam as não linearidades envolvidas no problema através de técnicas aproximadas de linearização.

Nos exemplos avaliados neste trabalho, a análise global do *riser* é realizada por meio do programa Anflex (Anflex, 2009). O Anflex é uma ferramenta computacional que realiza as análises estáticas e dinâmicas levando em consideração o comportamento não linear de *risers* e de linhas de ancoragem, por meio do MEF. No presente trabalho as análises dinâmicas são realizadas no domínio do tempo, considerando-se o efeito das ações de onda e corrente.

2.4 VERIFICAÇÕES ESTRUTURAIS

Após a solução das análises estática e dinâmica do *riser* obtém-se um histórico dos deslocamentos, esforços e tensões observados ao longo de toda a estrutura. Para tais respostas obtidas, faz-se necessário realizar uma verificação em relação aos valores admissíveis pré-estabelecidos em função do material constituinte da estrutura e das condições de operação previstas.

A avaliação da segurança de um projeto de *riser* rígido deve contemplar a verificação de vários mecanismos de falha, entre eles os limites de tensões combinadas, deflexões excessivas, colapso hidrostático, fadiga e flambagem. No caso de sistemas de *riser*, assim como para diversas outras estruturas convencionais, a verificação desses modos de falha é feita por meio da análise dos estados limites último (ELU), de serviço (ELS), acidental (ELA) e de fadiga (ELF), onde:

- estado limite último: reúne os critérios relacionados à integridade da estrutura, não garantindo seu funcionamento adequado;
- estado limite de serviço: garante que os *risers* permaneçam em serviço e operem adequadamente, respeitando os limites e restrições exigidos para as condições de operação previstas. Esse estado limite corresponde a critérios de limitação de deflexões, curvaturas, deslocamentos e rotações em *risers* quando em operação;
- estado limite acidental: referente a carregamentos acidentais ou danos locais que submetem a estrutura a situações anormais de operação ou falhas técnicas, tais como: explosões, colisão ou interferência entre *risers*, falha na ancoragem, entre outras;
- estado limite de fadiga: avalia o acúmulo de dano devido a carregamentos cíclicos. A partir do dano acumulado calculado é possível determinar a vida útil da estrutura e prever se a mesma atenderá às condições exigidas durante o tempo previsto de operação.

Apenas os estados limites último e de serviço serão considerados neste trabalho, servindo como restrições e critérios de viabilidade nas análises de otimização a serem realizadas. Como verificação extrema avaliam-se as tensões combinadas de von Mises nas paredes interna e externa e a tração efetiva mínima ao longo do *riser*; como verificação das condições de serviço e operação avalia-se a

curvatura máxima. Maiores detalhes sobre os critérios de verificação considerados encontram-se descritos no Capítulo 5.

2.5 METODOLOGIA DE PROJETO

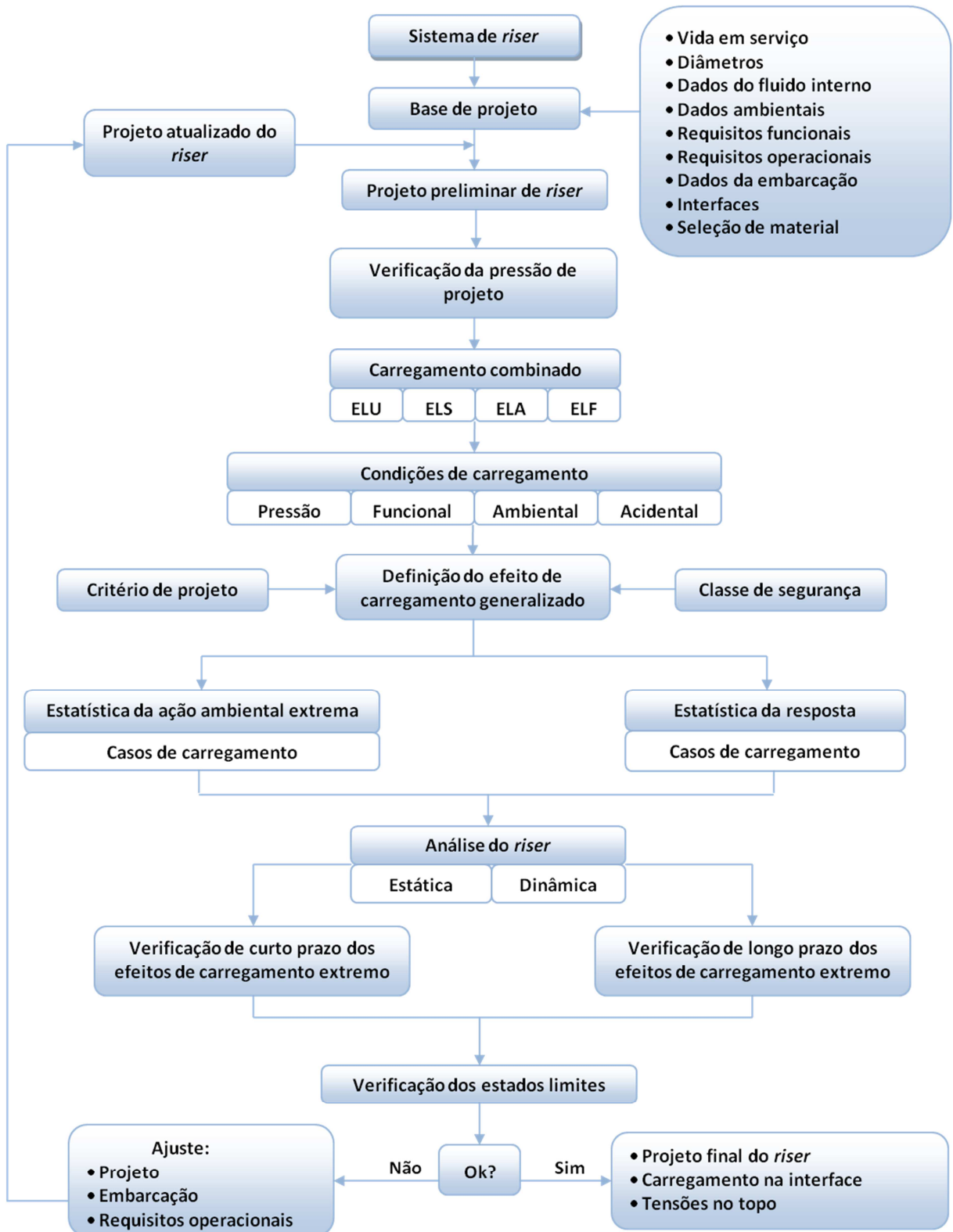
A metodologia de projeto de *risers* segue a mesma filosofia de desenvolvimento utilizada para as estruturas em geral, obedecendo as seguintes etapas:

- criação do esquema estrutural;
- definição dos carregamentos que atuam na estrutura;
- análise estrutural;
- verificação dos estados limites;
- verificações finais e detalhamento.

Martins (2008) detalha algumas características relevantes a cada uma dessas etapas de projeto aplicadas a *risers* rígidos seguindo as recomendações da DNV-OS-F201 (2001) e ilustra um esquema geral de projeto por meio do fluxograma apresentado na Figura 6.

Esse fluxograma representa uma metodologia convencional de projeto e visa obter uma configuração de projeto aceitável e adequada aos requisitos funcionais, regidos pelas normas técnicas e pelos requisitos de operação impostos. Entretanto, por se caracterizar em um processo de tentativa e erro, possui grande dependência da experiência e intuição do projetista. Esse procedimento pode conduzir a uma infinidade de soluções possíveis e não garante que a solução obtida seja a melhor do ponto de vista econômico e técnico.

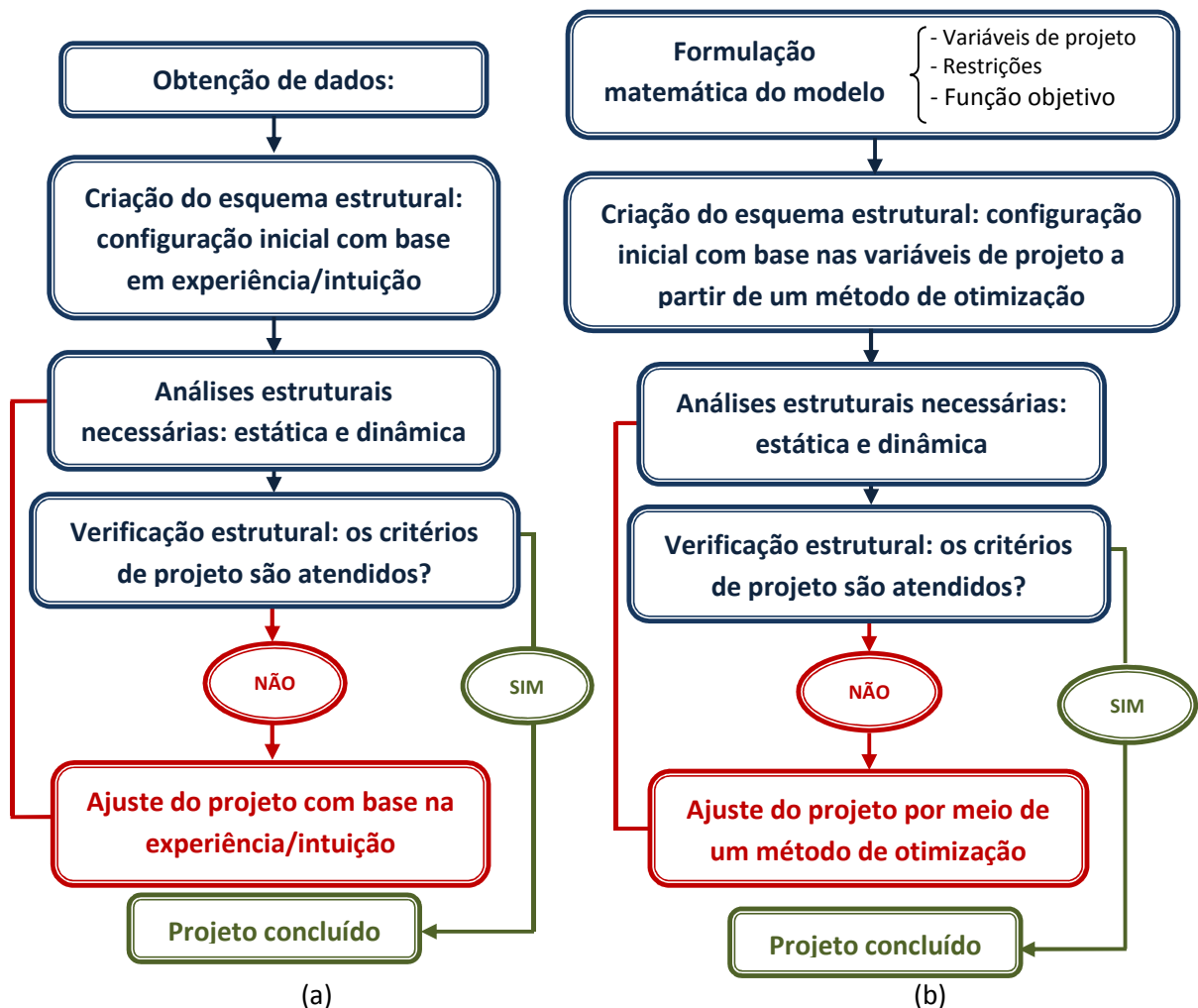
Figura 6 – Fluxograma de projeto.



Fonte: Martins (2008)

O emprego de técnicas de otimização na elaboração do projeto possibilita um melhor direcionamento na busca da configuração a ser adotada por meio da formulação de funções objetivo, garantindo ainda a viabilidade do projeto final por meio de restrições baseadas em regulamentações técnicas. Dessa forma, é possível obter uma solução ótima em um tempo menor, comparado ao projeto tradicional. A Figura 7 ilustra uma comparação entre as metodologias de projeto convencional e otimizado apresentando as etapas inerentes a cada um.

Figura 7 – Comparação entre as metodologias de projeto convencional (a) e otimizado (b).



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

2.5.1 METODOLOGIA TRADICIONAL DE PROJETO

Seguindo a metodologia tradicional de projeto, o projetista utiliza sua experiência prévia em projetos semelhantes e por meio de passos sequenciais de cálculo e com base em um conjunto de requisitos a serem atendidos, refina seu modelo estrutural em busca de um projeto final considerado aceitável. Percebe-se então o aspecto intuitivo do processo, onde a tomada de decisões se caracteriza pela tentativa e erro. Nessa metodologia o modelo vai sendo melhorado gradativamente até se atingir um projeto mais elaborado e que atenda aos requisitos e critérios estabelecidos.

A metodologia utilizada neste trabalho automatiza essa fase inicial do projeto do *riser*, que é difícil analiticamente e computacionalmente exigente, tornando-a mais rápida e diminuindo significativamente a possibilidade de obtenção de configurações inadequadas e inviáveis de projeto. Essa abordagem, aliada a intuição e experiência do projetista, conduzem a um projeto robusto, seguro e mais eficiente.

2.5.2 METODOLOGIA DE PROJETO OTIMIZADO

Como visto na seção anterior, o processo tradicional de elaboração de um projeto estrutural, assim como o de *risers*, envolve a realização de um ciclo de tarefas que são repetidas até que se alcance uma configuração viável. O número de vezes em que esse ciclo é repetido é extremamente dependente da experiência e da intuição do engenheiro projetista. Como alternativa à metodologia tradicional de projeto é possível adotar técnicas de otimização capazes de minimizar essa dependência. Essa estratégia permite ao projetista avaliar diversas configurações de modelos de forma automática e direcionada, auxiliando-o na análise e no entendimento do comportamento estrutural, e permitindo ainda verificar a influência das diversas variáveis envolvidas no comportamento da estrutura.

Vale ressaltar que essa automatização do projeto fornece apenas um pré-projeto que agrega algumas condições ótimas pré-estabelecidas, devendo este ainda ser avaliado quanto à vida útil, efeito de vibrações induzidas por vórtices (VIV), efeito do escoamento interno na dinâmica, interferência, instalação e outras verificações finais mais específicas. Caso durante tais verificações seja constatado

que o *riser* não atende a algum critério específico pré-estabelecido, alterações no projeto devem ser feitas diretamente pelo projetista. Alternativamente, podem ser feitas as alterações devidas nas restrições, no intervalo de valores das variáveis de projeto ou ainda a retirada ou o acréscimo de variáveis e restrições, e em seguida dar prosseguimento a uma nova análise de otimização.

O problema da otimização incorpora às restrições tradicionais, as restrições técnicas estabelecidas em normas e as restrições de operação na busca pela configuração ótima definida por uma ou mais funções objetivo. Tais considerações garantem que as respostas do problema estejam mais próximas à realidade do projeto, permitindo a aplicabilidade desse procedimento em projetos reais.

Apesar da significativa eficiência agregada por meio do processo de otimização, cabe ressaltar que os resultados ótimos almejados só são obtidos quando há uma integração entre o processo de otimização, a análise estatística adequada dos resultados e o bom senso e conhecimento do projetista. A simples utilização de *softwares* comerciais de análise e de otimização sem o prévio conhecimento da metodologia utilizada e sem a análise crítica dos resultados por um profissional capacitado pode conduzir a interpretações equivocadas e conseqüentemente gerar resultados incoerentes e não representativos.

3 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

A análise de um determinado problema por meio de uma metodologia de otimização deve ser iniciada pela adequada caracterização do mesmo, etapa na qual devem ser determinadas as variáveis que o definem, bem como os parâmetros de resposta de interesse. Um dos fatores determinantes da complexidade do problema é o número de variáveis de projeto identificadas. Sabe-se que quanto maior o número de variáveis, mais complexo se torna o problema, envolvendo espaços de soluções de dimensões elevadas, ampliando o espaço de busca e demandando um número maior de simulações para cobrir todo o domínio na busca pelo ponto ótimo.

Diante dessa dificuldade, a utilização de estratégias capazes de identificar as variáveis mais significativas do problema surge como uma boa alternativa para reduzir a complexidade do estudo analisado. Com base nessa avaliação, parâmetros variáveis com pouco efeito sobre as respostas de interesse podem ser assumidos constantes sem perda de representatividade no problema de otimização avaliado. Nesse sentido, esta seção fornece uma introdução para o uso de planejamento estatístico de experimentos para adequada avaliação inicial do comportamento do problema de otimização formulado.

Rodrigues e Lemma (2009) destacam que a metodologia do planejamento experimental para otimização de processos é uma ferramenta fundamentada na teoria estatística e é capaz de fornecer informações importantes e seguras sobre o modelo em análise, proporcionando a minimização do caráter empírico que envolve a metodologia clássica de tentativa e erro. No contexto do presente trabalho os experimentos consistem em simulações estáticas e dinâmicas de diferentes composições geométricas de *risers* verticais complacentes.

Segundo Montgomery (2001), o planejamento estatístico de experimentos refere-se ao processo de planejar o experimento tal que dados apropriados que possam ser analisados por métodos estatísticos sejam coletados, resultando em conclusões válidas e objetivas. Assim, destaca-se a importância de dois aspectos em qualquer problema experimental: o planejamento do experimento e a análise estatística dos dados, estando esses aspectos intimamente relacionados, uma vez

que o método de análise estatística depende diretamente do planejamento empregado.

A técnica de planejamento de experimentos foi estudada e proposta por volta do ano de 1920 pelo cientista britânico Ronald A. Fisher (Fisher, 1971) e consiste em uma sistematização de experimentos com o intuito de maximizar o conhecimento obtido por meio de dados experimentais. De modo geral, o planejamento de experimentos, DOE (do inglês *Design of Experiments*), é uma técnica utilizada para se planejar os experimentos a serem executados. No caso particular do presente trabalho, essa metodologia orienta a definição de quais configurações geométricas do *riser* em estudo serão inicialmente avaliadas, de modo a satisfazer basicamente dois objetivos: obter a maior precisão e confiabilidade estatística possível nas conclusões acerca das respostas obtidas destes experimentos e o menor custo, ou seja, a definição da menor quantidade de experimentos necessária para efetuar as análises estatísticas iniciais desejadas. Logo, esta é uma técnica de extrema importância para todos os setores da indústria, pois seu emprego é capaz de proporcionar resultados mais confiáveis e com redução de custos.

Dentro do contexto do planejamento de experimentos, faz-se necessário definir alguns conceitos importantes para auxiliar no entendimento dos tópicos que se seguem.

- **Fatores:** são as variáveis de projeto identificadas das quais dependem as respostas de interesse. Durante os experimentos os fatores são alterados e as respostas de interesse são observadas possibilitando a inferência de considerações acerca do modelo estudado.

- **Respostas:** consistem nos parâmetros de saída de interesse do modelo em estudo, que descrevem como o sistema responde em função dos fatores definidos.

- **Efeito:** impacto ou mudança na resposta produzida pela mudança do nível do fator. O termo efeito principal é frequentemente utilizado ao se referir aos efeitos dos fatores primários do experimento (Montgomery e Runger, 2009), é o efeito individual que cada fator tem sobre a resposta, sem considerar os possíveis efeitos de interação entre os fatores. O efeito referente às interações mede o diferencial de um fator quando o outro fator muda de nível.

- **Interação:** consiste no fato de um fator não produzir o mesmo efeito na resposta a diferentes níveis de outro fator. Quando isso ocorre, pode-se constatar que há interação entre os fatores, ou seja, dois ou mais fatores experimentais

influenciam o parâmetro de resposta juntos e separadamente os efeitos não podem ter seu fator de causa identificado. Montgomery e Ruger (2009) ressaltam que quando a interação entre os fatores é grande, os efeitos principais correspondentes apresentam pouco significado prático, pois podem estar mascarados, sendo, desta forma, mais importante identificar e estudar a interação entre os fatores.

• **Análise de sensibilidade:** consiste na investigação sistemática do efeito causado na resposta em função da variação das variáveis de entrada do modelo. Os resultados desta análise podem ser utilizados como base da seleção das variáveis a serem consideradas na continuidade do estudo de otimização. Assim, o objetivo da análise sensibilidade é identificar para quais variáveis o sistema em estudo é mais sensível, possibilitando desta forma a eliminação das variáveis que não produzem efeitos significativos.

Para um adequado planejamento de experimentos, Montgomery (2001) sugere que sejam seguidas as seguintes etapas:

1. Caracterização do problema: nesta etapa deve ser feito um adequado delineamento do problema real estudado de modo a caracterizá-lo e melhor compreendê-lo para possibilitar sua modelagem.

2. Definição dos objetivos: a medida objetiva de eficiência desejada deve ser não tendenciosa, específica, mensurável e de resultado prático.

3. Escolha dos fatores de influência e níveis: nesta etapa devem-se escolher os fatores variáveis do modelo, os intervalos viáveis de variação desses fatores e os níveis específicos nos quais cada experimento será realizado. É importante investigar todos os fatores que possam ser importantes. Segundo Montgomery (2001), quando o objetivo é a varredura dos fatores ou caracterização do processo, é mais adequado manter baixo o número de níveis de fatores (em geral, são usados dois níveis).

4. Seleção das variáveis de resposta: os parâmetros de respostas a serem avaliados devem necessariamente fornecer informações relevantes acerca dos experimentos realizados, de modo a permitir uma caracterização adequada do problema.

5. Determinação de um modelo de planejamento de experimento: define-se o método a ser utilizado para definição dos experimentos a serem realizados em função das características já definidas nas etapas anteriores.

6. Condução do experimento: execução da simulação de cada experimento definido.

7. Análise dos dados: métodos estatísticos devem ser usados para a análise dos resultados obtidos dos experimentos executados, conduzindo a conclusões objetivas e confiáveis.

8. Conclusões e recomendações: com base na análise estatística dos dados é possível obter conclusões práticas sobre a influência dos fatores nas respostas de interesse, bem como a correlação e interação entre fatores. A partir dessas conclusões algumas ações podem ser recomendadas, como a não consideração de determinados fatores, a inclusão de novos parâmetros de resposta, entre outras.

O planejamento de experimentos realizado com base na sequência sugerida acima proporciona uma série de vantagens, tais como: bom entendimento estatístico do problema, viabilizando a identificação das principais causas de variação na resposta de interesse; fornece dados que, a depender do problema, podem ser utilizados para geração de metamodelos, ou superfícies de resposta, possibilitando uma exploração inteligente e de baixo custo do domínio do problema; fornece um ponto de partida para análises de otimização.

Experimentos planejados são geralmente empregados sequencialmente. Em princípio, tendo como base o sistema inicialmente modelado, em geral mais complexo e com muitas variáveis controláveis, a realização dos experimentos planejados tem um caráter exploratório. Nesta etapa tem-se como objetivo identificar quais variáveis são mais importantes. Experimentos subsequentes são utilizados no intuito de refinar essa informação e determinar possíveis ajustes nas variáveis críticas e, dessa forma, melhorar o processo. Após todos os ajustes realizados com base nos dados obtidos por meio dos experimentos inicialmente realizados, a etapa final consiste na aplicação de métodos de otimização na busca pela configuração ótima desejada, ou seja, dos valores das variáveis que resultam no melhor desempenho do processo em estudo. Logo, experimentos estatisticamente bem planejados aplicados previamente ao processo de otimização propriamente dito proporcionam eficiência e economia à análise como um todo.

3.1 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS COM VÁRIOS FATORES

A metodologia de planejamento de experimentos consiste em uma poderosa ferramenta que maximiza o conhecimento obtido por meio de dados amostrais através de uma sistematização dos experimentos realizados. Existem diversos métodos de planejamento de experimentos, com diferentes estratégias de delineamento e recomendados para diferentes abordagens. Cabe ao projetista, com base nas características do problema que deseja analisar, definir qual o método mais apropriado para aplicação.

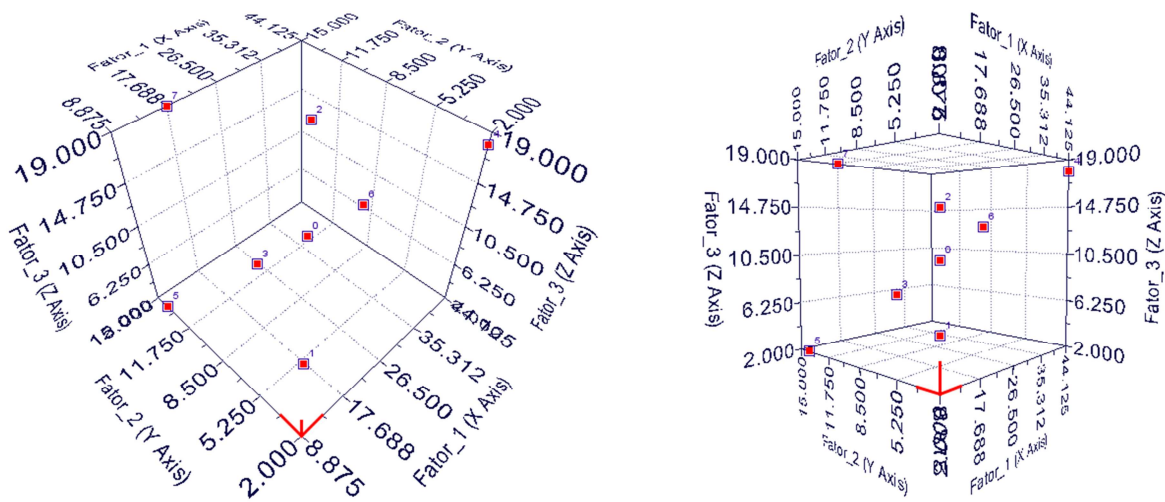
Tendo como foco uma análise estatística dos dados experimentais para posterior inferência acerca da significância do efeito dos fatores nas respostas de interesse, alguns aspectos devem ser considerados. Os experimentos devem ser representativos das variações dos fatores envolvidos, possibilitando a análise da magnitude do efeito causado na resposta pela variação dos fatores dentro de seus respectivos intervalos de variação. Além disso, para possibilitar uma adequada análise estatística, é recomendado que os experimentos sejam definidos de modo a garantir uma baixa correlação entre os fatores envolvidos, evitando-se obter resultados tendenciosos.

A título de exemplificação, a Figura 8 ilustra um exemplo, com três fatores, da definição de oito experimentos utilizando um o método aleatório de seleção. Para esse exemplo, a Tabela 1 apresenta as coordenadas dos experimentos definidos e a Tabela 2 apresenta as correlações lineares obtidas entre os fatores. Para comparação, apresenta-se na Figura 9 um exemplo de definição dos experimentos utilizando o método de planejamento fatorial. As coordenadas dos experimentos definidos por esse método são apresentadas na Tabela 3 e as correlações obtidas entre os fatores são apresentadas na Tabela 4.

Os dados apresentados na Tabela 2 e na Tabela 4 são referentes ao coeficiente de correlação de Pearson das variáveis de entrada consideradas nesse exemplo ilustrativo. Também chamado de coeficiente de correlação produto-momento, esse parâmetro mede o grau da correlação linear, bem como a direção dessa correlação, entre duas variáveis. Esse coeficiente, normalmente representado por ρ assume apenas valores entre -1 e 1. Quando $\rho = 1$, é possível afirmar que há uma correlação linear perfeita positiva entre as variáveis. Por outro lado, quando $\rho = -1$, afirma-se que há uma correlação linear negativa perfeita entre as variáveis.

Quando $\rho = 0$, constata-se que as variáveis não dependem linearmente uma da outra, mas ainda é possível que haja uma dependência não linear entre as mesmas. Para as correlações onde $0 < \rho < 1$ ou $-1 < \rho < 0$, cabe ao avaliador interpretar se o grau de correlação obtido é significativo ou não. Em geral, correlações são consideradas significativas quando $\rho \geq |0,7|$.

Figura 8 – Experimentos definidos aleatoriamente.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Tabela 1 – Coordenadas dos fatores definidos aleatoriamente.

Id	Fator_1	Fator_2	Fator_3
0	26,5	8	10
1	14,75	4	5
2	38,25	12	15
3	20,625	10	7
4	44,125	2	18
5	8,875	14	2
6	32,375	6	13
7	17,6875	15	19

Fonte: Autor desta dissertação (2011)

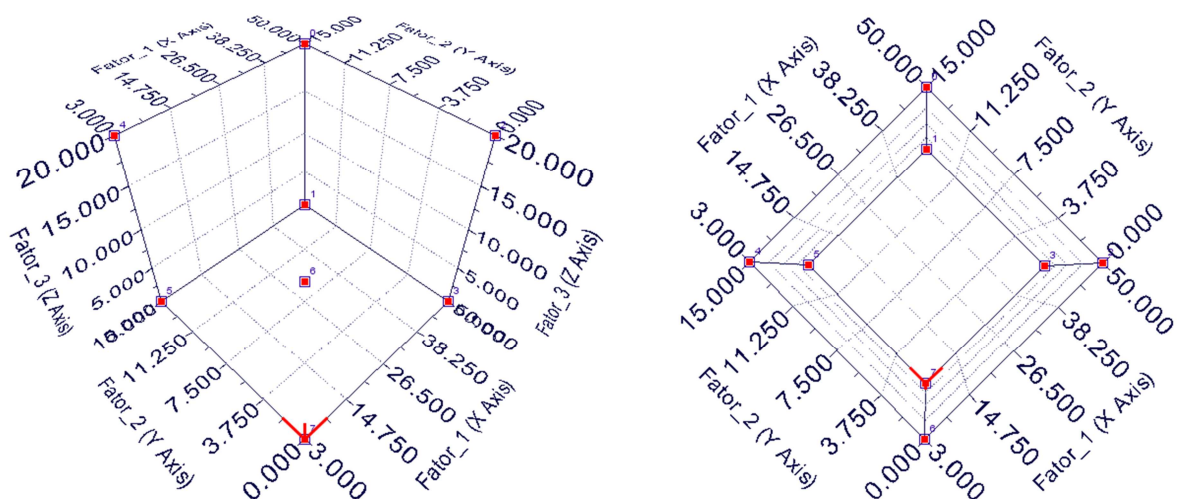
Tabela 2 – Correlação linear entre as variáveis para o caso de seleção aleatória.

	Fator_1	Fator_2	Fator_3
Fator_1	1	-0,5	0,7
Fator_2	-0,5	1	-0,06
Fator_3	0,7	-0,06	1

Fonte: Autor (2011)

Na Figura 8, os oito pontos destacados representam os experimentos definidos aleatoriamente por meio da combinação de valores para os três fatores que definem esse exemplo, dentro do domínio definido. Dado o caráter aleatório, esse método não segue uma regra de delineamento. Os experimentos são então definidos de modo a cobrir ao máximo o domínio do problema, mas podem fatalmente privilegiar regiões específicas do espaço e resultar em uma correlação significativa dos fatores, não sendo adequados para inferência estatística, uma vez que podem gerar conclusões equivocadas. Por outro lado, essa abordagem proporciona uma boa avaliação exploratória do domínio do problema, possibilitando o conhecimento do comportamento do problema analisado nos pontos de análise e inclusive a identificação de regiões de interesse dentro do domínio.

Figura 9 – Experimentos definidos por meio do método fatorial.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Tabela 3 – Coordenadas dos fatores definidos pelo método fatorial.

Id	Fator_1	Fator_2	Fator_3
0	50	15	20
1	50	15	0
2	50	0	20
3	50	0	0
4	3	15	20
5	3	15	0
6	3	0	20
7	3	0	0

Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Tabela 4 – Correlação entre as variáveis para o exemplo do método fatorial.

	Fator_1	Fator_2	Fator_3
Fator_1	0,0	0,0	0,0
Fator_2	0,0	0,0	0,0
Fator_3	0,0	0,0	0,0

Fonte: Autor desta dissertação (2011)

No segundo exemplo, com a definição dos experimentos por meio do método fatorial (Figura 9) observa-se que os experimentos são distribuídos uniformemente no domínio do problema e resultam em uma correlação nula dos fatores. Nesse exemplo específico, foram considerados apenas dois níveis e os experimentos delineados representam os valores extremos dos fatores conforme pode ser observado na Figura 9 e na Tabela 3.

Por meio desses exemplos, observando a distribuição dos experimentos no domínio do problema, é possível constatar que se os mesmos estiverem concentrados em determinada parte do domínio, a correlação entre essas variáveis será alta, situação ilustrada na Figura 8 e na Tabela 2. Com essa abordagem o conhecimento do comportamento do modelo em estudo pode ficar limitado a uma determinada região do domínio do problema e não gerar resultados representativos do comportamento global do sistema em relação aos fatores que o definem. Existem técnicas de planejamento de experimentos, a exemplo do fatorial, onde se obtém uma distribuição mais adequada e com correlação nula entre os fatores, proporcionando o conhecimento do comportamento global do sistema em estudo.

A escolha pela técnica de planejamento a ser utilizada depende fortemente da quantidade de experimentos que se deseja, ou que se tenha disponibilidade de realizar. A depender do custo de cada análise individual, seja financeiro ou em termos de demanda computacional, a quantidade de experimentos a ser executada fica limitada. Esse é um fator que deve ser considerado no momento da escolha do método de planejamento a ser executado, tendo em mente a definição de uma amostra representativa do domínio com o menor custo associado possível.

O modeFRONTIER® (modeFRONTIER, 2011), programa comercial especializado em otimização multidisciplinar e integração de processos, utilizado no desenvolvimento deste trabalho, disponibiliza diferentes tipos de planejamento de experimentos ao usuário, e a opção por determinado método depende do tipo de análise que se deseja realizar com os dados obtidos. Alguns dos métodos disponibilizados e suas respectivas categorias são descritos abaixo:

- Definição pelo usuário: baseado em experiência prévia do projetista, o qual define quais parâmetros serão avaliados nos experimentos. Essa técnica é adequada apenas quando o projetista, ou experimentalista, possui bastante experiência e um bom conhecimento técnico sobre o sistema avaliado e seu comportamento. Essa técnica possui duas desvantagens: uma é quando a suposição inicial não possui resultados desejados, sendo necessário nesse caso a definição de uma nova suposição que por sua vez pode também não levar a resultados desejados e esse processo continuar por um período muito longo sem garantia de sucesso. A segunda desvantagem é quando as suposições iniciais produzem um bom resultado, porém não há garantias de que a melhor solução foi encontrada e de que os dados obtidos são suficientes para possíveis inferências sobre o comportamento do sistema (Montgomery, 2001).

- Métodos exploratórios: utilizados para conhecimento do comportamento global do modelo em estudo. Esses métodos eliminam conclusões subjetivas e permitem uma boa amostragem do espaço de busca e podem ainda auxiliar na identificação de um melhor ponto de partida para uma subsequente análise de otimização ou como base para criação de uma superfície de resposta. Nessa categoria estão inclusos os métodos: *Random Sequence* (sequência aleatória), *Sobol* (sequência uniforme pseudo aleatória), *Latin Hypercube* (Hiper cubo Latino), *Cross Validation* (Validação Cruzada).

- Métodos para análise estatística: categoria de técnicas mais indicadas para realizar análises estatísticas confiáveis dos dados obtidos por meio dos experimentos. Por meio desses métodos é possível avaliar os efeitos principais dos fatores na resposta de interesse bem como as interações entre fatores, possibilitando a identificação das variáveis de projeto mais significativas para o problema. O comportamento global do modelo também é conhecido por meio desses métodos. Fazem parte dessa categoria os métodos: *Full Factorial* (Fatorial Completo), *Reduced Factorial* (Fatorial Fracionado), *Cubic Face Centered* (Cubo de Face Centrada), *Box-Behnken*, *Plackett Burman* e *Latin Square* (Quadrado Latino).

3.1.1 EXPERIMENTOS FATORIAIS

Entre os planejamentos com foco em análise estatística para posterior inferência dos resultados, os métodos fatoriais são os mais utilizados quando vários fatores são de interesse em um experimento, como no caso do estudo desenvolvido neste trabalho. Em função dessa justificativa, apenas os métodos fatoriais serão detalhados nesta seção. Para informações mais detalhadas sobre outros planejamentos experimentais recomenda-se consultar Fisher (1971), Montgomery (2001), Rodrigues e lemma (2009).

3.1.1.1 PROJETO SIMPLES – UM FATOR POR VEZ

A estratégia de avaliação de um fator por vez consiste em selecionar uma configuração de referência como ponto de partida e a partir dessa configuração inicial variar um fator por vez, mantendo-se os demais fatores com valores constantes. Para cada experimento realizado observa-se o comportamento da resposta de interesse em função da variação de cada fator

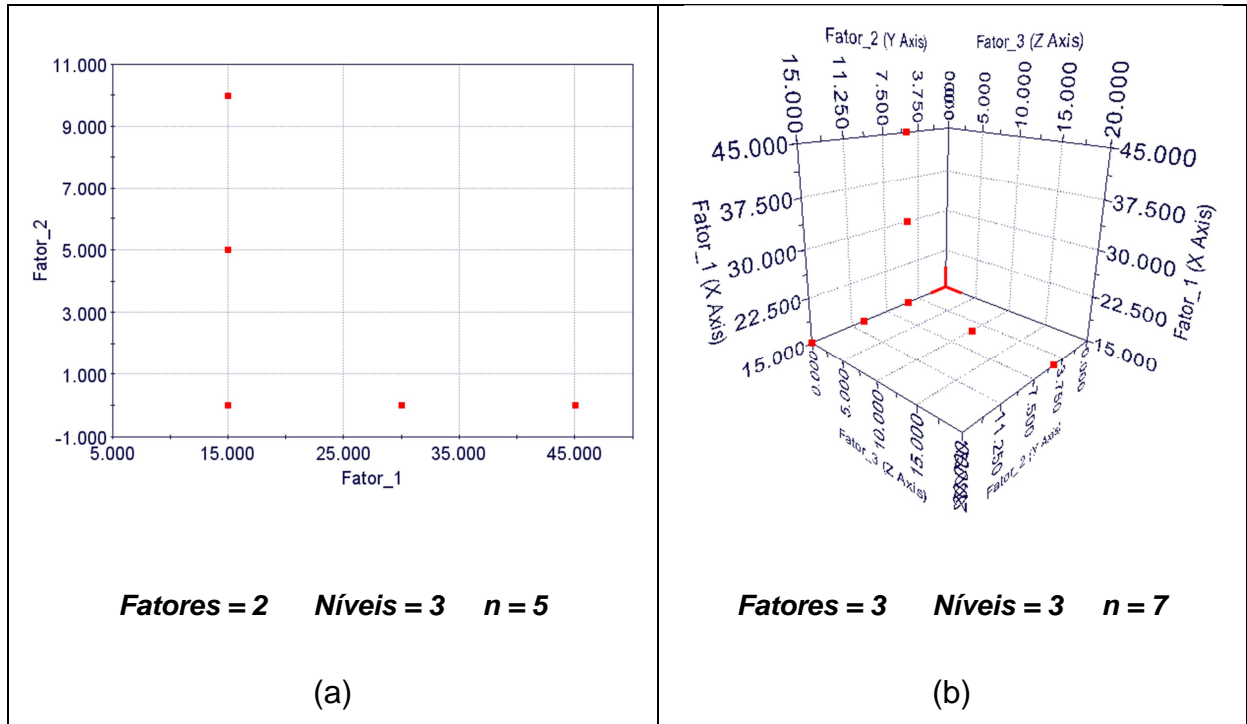
Observa-se que este é um método de fácil implementação, entretanto estatisticamente ineficiente, uma vez que não permite identificar possíveis interações entre os fatores, podendo fatalmente gerar conclusões equivocadas.

A quantidade de experimentos necessários quando da utilização da estratégia de um fator por vez é dada por

$$n = 1 + \sum_{i=1}^k (n_i - 1) \quad (1)$$

onde k é a quantidade de fatores considerados, e n_i é a quantidade de níveis considerados para o fator i . A Figura 10 ilustra esquematicamente dois exemplos de definição dos experimentos utilizando o método um fator por vez.

Figura 10 – Exemplo do método um fator por vez com (a) dois fatores e três níveis e (b) três fatores e três níveis.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

3.1.1.2 FATORIAL COMPLETO

Por experimento fatorial entende-se que em cada tentativa completa ou réplica do experimento todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores são investigadas (Montgomery e Runger, 2009). A partir dessa abordagem as variáveis sofrem variações conjuntas, ao invés de uma por vez.

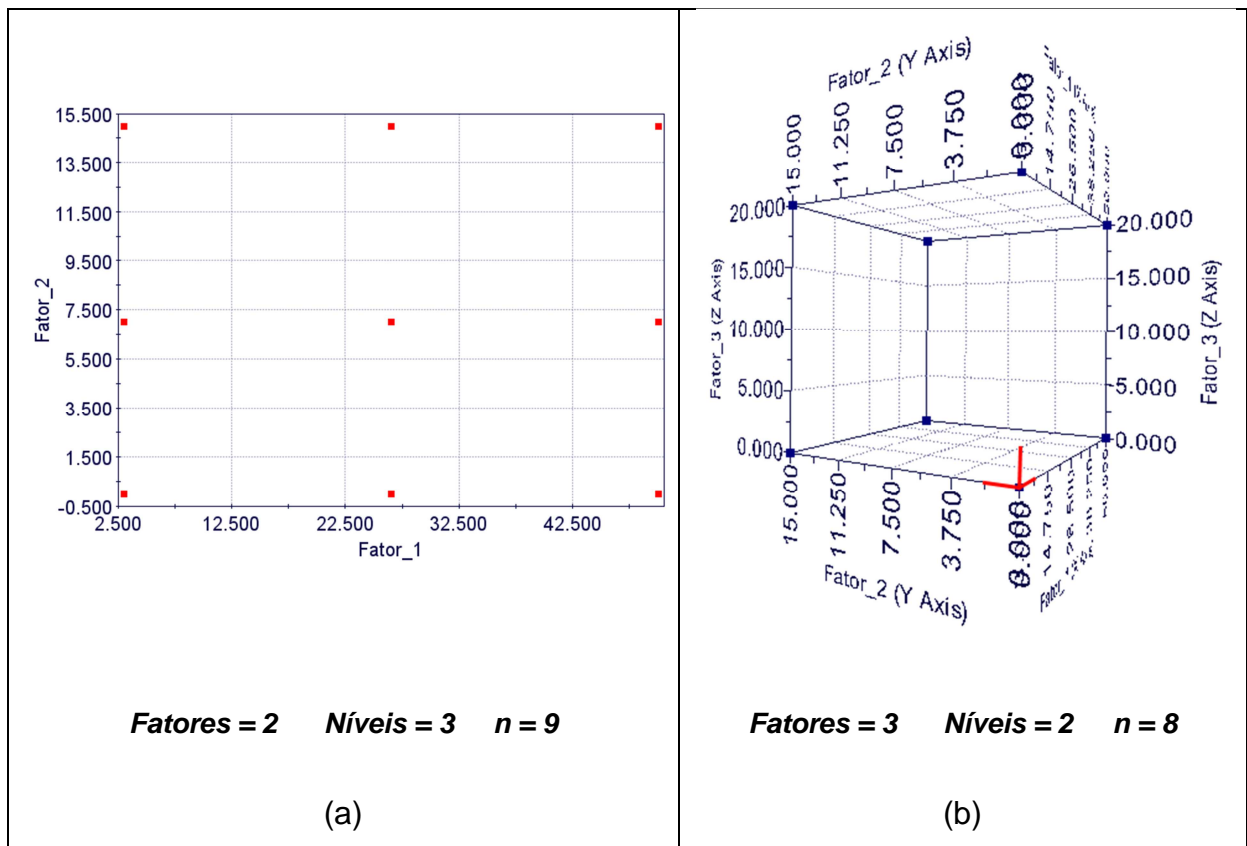
Esta estratégia é mais eficiente que a abordagem um fator por vez, já que permite que os efeitos de um fator sejam avaliados nos diversos níveis dos outros fatores, conduzindo a conclusões que são válidas dentro da abrangência das condições experimentais (Montgomery, 2001) e é a única forma de descobrir interações entre os fatores. Por outro lado, o fatorial completo apresenta como desvantagem o crescimento exponencial das combinações de níveis com o aumento do número de fatores.

Neste método o número de experimentos é definido por

$$n = \prod_{i=1}^k n_i \quad (2)$$

A Figura 11 ilustra esquematicamente dois exemplos de definição dos experimentos utilizando o método fatorial completo.

Figura 11 – Exemplo do método fatorial completo com (a) dois fatores e três níveis e (b) três fatores e dois níveis.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Uma estratégia comumente utilizada para redução de custos é a diminuição dos níveis considerados para cada fator. O planejamento fatorial completo de dois níveis, por exemplo, denominado fatorial 2^k define para cada fator dois níveis de valores – alto (+) e baixo (-) – gerando 2^k experimentos, sendo k o número de fatores considerados. Segundo Montgomery e Runger (2009) o planejamento fatorial 2^k é um dos mais importantes tipos de planejamento fatorial, particularmente útil nos estágios iniciais de um trabalho experimental quando muitos fatores definem o sistema analisado. Nesta primeira abordagem são identificados os fatores mais

significativos ao sistema analisado, podendo-se posteriormente eliminar os fatores menos significativos, considerando-os constantes no modelo.

3.1.1.3 FATORIAL FRACIONADO

Conforme comentado na seção anterior, à medida que o número de fatores em um experimento fatorial 2^k aumenta, o número de experimentos gerados também aumenta, podendo inviabilizar a aplicação do planejamento completo. Nesses casos, observa-se também um consequente aumento do número de interações de ordem alta. Em geral, essas interações de ordem elevada são negligenciáveis para o experimento, podendo-se focar apenas nos efeitos principais e das interações de baixa ordem (Montgomery, 2001). Para tanto, recomenda-se a aplicação do método fatorial fracionado, bastante utilizado em aplicações industriais, uma vez que permite reduzir o número de tratamentos e, conseqüentemente, o custo de realização do experimento como um todo.

Experimentos fatoriais fracionados são recomendados na fase de exploração inicial do espaço de busca, denominada “filtragem de fatores” (do inglês *factor screening*), para avaliação do comportamento global do sistema e identificação das variáveis mais significativas ao modelo. Montgomery (2001) afirma que nessa situação é usualmente melhor manter o número de níveis dos fatores baixo. A aplicação deste método na etapa inicial dos tratamentos possibilita a identificação, com baixo custo associado, das variáveis mais significativas ao modelo em análise, ou seja, aquelas que produzem um efeito maior na resposta de interesse. Após essa identificação prévia, segue-se com as análises em um modelo menos complexo, com uma menor quantidade de fatores variáveis, o que reduz o espaço de busca e torna o processo de otimização mais eficaz.

Montgomery e Runger (2009) exemplificam que em um planejamento fatorial com cinco fatores e dois níveis cada (2^5), cinco graus de liberdade correspondem aos efeitos principais, dez graus de liberdade correspondem às interações de segunda ordem e dezesseis graus de liberdade correspondem às interações de ordens mais altas. Nos estudos iniciais de um projeto ou sistema, de um modo geral, há pouco interesse nessas interações de ordens mais altas.

Um planejamento fatorial fracionado é construído selecionando um subconjunto de tamanho 2^{k-p} de todos os pontos possíveis de um planejamento

fatorial completo 2^k , sendo p o número referente à fração do planejamento completo que se deseja simular. Uma abordagem bastante utilizada é a meia fração de um planejamento completo, representada por 2^{k-1} . Embora esse seja um planejamento que permite uma grande redução no número de experimentos requeridos, é possível utilizar frações ainda menores capazes de fornecer quase tanta informação útil quanto uma maior economia. Informações mais detalhadas sobre o delineamento desses experimentos podem ser encontradas em Rodrigues e lemma (2009), Montgomery e Runger (2009) e Montgomery (2001).

Em função das vantagens descritas, proporcionadas pela aplicação do planejamento fatorial fracionado, tendo inclusive este procedimento sido usado com sucesso em trabalhos anteriores (Hawkins e Lye, 2006; Yang e Li, 2010; Madeira, 2005), o mesmo é utilizado no presente trabalho, no estudo de caso apresentado no Capítulo 6.

3.1.2 METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA (MSR)

Na maioria dos sistemas ou processos que se deseja estudar, a forma da relação entre a resposta de interesse e as variáveis independentes que os caracterizam é desconhecida. Nessas situações a definição dessa relação é de grande interesse e pode proporcionar maior eficiência ao processo de otimização.

Nesse sentido a MSR, também conhecida como modelo substituto, consiste em uma técnica bastante útil para modelagem e análise nas aplicações em que a resposta de interesse sofre influência de várias variáveis e nas quais o objetivo consiste em otimizar essa resposta. Segundo Montgomery e Runger (2009), a primeira etapa da MSR é encontrar uma aproximação adequada para a verdadeira relação entre a resposta (Y) e as variáveis independentes (x_1, x_2, \dots, x_k). De modo geral, este relacionamento pode ser representado por

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \varepsilon \quad (3)$$

onde x_1, x_2, \dots, x_k são as k variáveis independentes, ε representa um componente de erro aleatório, que leva em consideração a variação observada no parâmetro de resposta que não é devida às variáveis independentes.

A utilização da MSR é particularmente interessante para o problema abordado no presente trabalho, uma vez que o mesmo envolve a análise dinâmica de *risers*, o

que demanda a um elevado custo computacional. Com o intuito de reduzir tal custo e proporcionar mais eficiência ao processo de otimização, torna-se adequado o uso de metamodelos para mapear o comportamento do *riser* em termos dos parâmetros de resposta de interesse, o que permite a predição dessa resposta em função somente dos dados de entrada do sistema. A partir de tal mapeamento, no processo de otimização pode-se substituir a análise dinâmica de determinada configuração pela consulta direta à superfície de resposta mapeada. Quando devidamente validada, a superfície de resposta fornece resultados confiáveis e é capaz de reduzir significativamente o custo computacional associado à análise de otimização.

Na literatura é possível encontrar diversas referências com descrição e aplicação de técnicas de otimização baseadas em metamodelos (Myers e Montgomery, 1995; Wang *et al.*, 2001; Wang e Shan, 2007; Gomes, 2007; Fonseca, 2009; Song *et al.*, 2010). Nessas referências os autores utilizam a MSR ajustando metamodelos com base em informações obtidas empiricamente em análises anteriores e utilizam a superfície mapeada no processo de otimização com a obtenção de grande ganho de desempenho.

Alguns trabalhos com enfoque em planejamento de experimentos e superfície de resposta como ferramentas auxiliares em processos de otimização já foram desenvolvidos particularmente na área de exploração de petróleo (Madeira, 2005; Yang e Li, 2010; Hawkins e Lye, 2006; Mendonça, 2004; Guarize *et al.*, 2007).

Os resultados apresentados na literatura comprovam a importância e benefícios proporcionados pela utilização de técnicas de planejamento de experimentos e de metamodelos associadas a processos de otimização. Essa abordagem, no entanto, não é incorporada no presente estudo, mas a utilização da mesma é fortemente recomendada e sugerida como continuidade do trabalho.

3.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS: INFERÊNCIA ESTATÍSTICA

A aplicação de uma metodologia de planejamento e avaliação estatística de determinado sistema de interesse é de fundamental importância para que se possa fazer generalizações de uma ou mais populações a partir de uma ou mais amostras. No âmbito estatístico, população consiste em um grupo de interesse que se deseja descrever, enquanto a amostra consiste em um subconjunto representativo de tal população.

No contexto deste trabalho, ao se falar em inferir sobre a população, entenda-se inferir sobre o comportamento estrutural de *risers* verticais complacentes em termos das respostas de interesse (e.g., tensão, raio de curvatura, tração efetiva, entre outras). Nesse sentido, amostras referem-se ao subconjunto de informações obtidas nas simulações realizadas por meio dos experimentos planejados.

Em geral, as informações desejadas acerca da população são desconhecidas. Por sua própria natureza e definição, a população é um ente teórico, em geral, inatingível (Rodrigues e lemma, 2009). Dessa forma, um dos principais objetivos da ciência estatística é fornecer regras consistentes e probabilisticamente confiáveis para possibilitar a inferência de conclusões acerca das características da população de interesse. Logo, a análise de amostras e a utilização da metodologia de planejamento experimental constituem alternativas importantes.

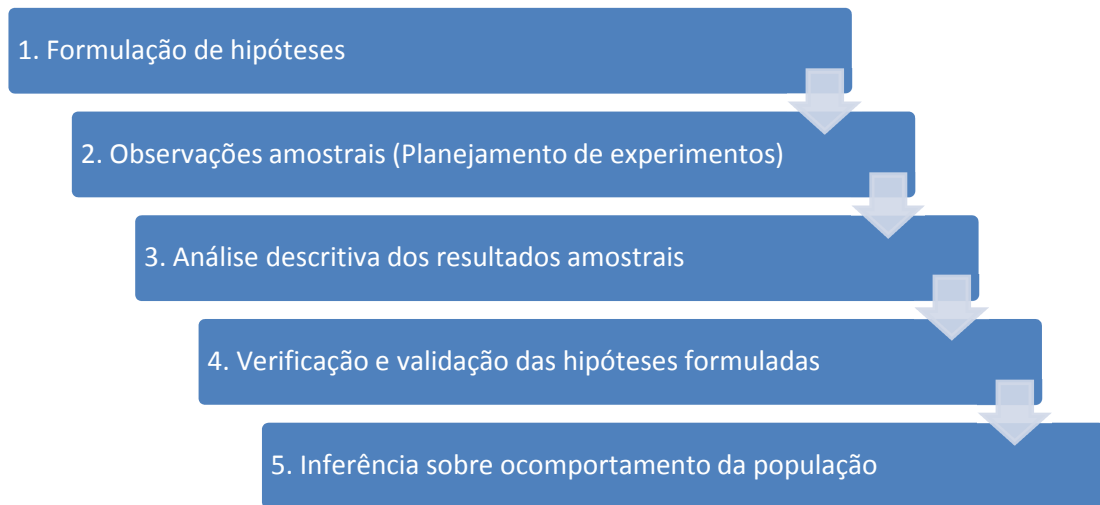
O planejamento de experimentos busca definir amostras representativas da população. A partir dos resultados obtidos por meio destes, busca-se observar as variações provocadas na resposta de interesse pelas variações nos níveis dos fatores envolvidos. A inferência sobre o comportamento da população é fundamentada na análise estatística dessas variações observadas nas amostras.

3.2.1 TESTE DE HIPÓTESES

De modo geral, a metodologia seguida quando da aplicação de uma análise estatística de determinado sistema consiste em formular hipóteses e, com base em observações amostrais, verificar a validade de tais hipóteses. Montgomery e Runger (2009) definem hipótese como uma afirmação sobre os parâmetros de uma ou mais populações, sendo o procedimento que leva a uma decisão acerca de uma hipótese particular denominado teste de hipótese.

Ressalta-se que o planejamento experimental e a análise estatística dos resultados estão interligados, de modo que devem ser considerados de maneira sucessiva dentro da metodologia de análise seguida. A sequência ideal de etapas a serem seguidas para análise estatísticas dos dados de determinado sistema encontra-se esquematizada na Figura 12.

Figura 12 – Esquema sequencial do método científico estatisticamente planejado.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

No contexto deste trabalho, a hipótese científica que se pretende verificar por meio do planejamento estatístico de experimentos é de que as variáveis de projeto identificadas como possivelmente relevantes para a definição da configuração CVAR são de fato significantes. Com base nessa hipótese científica, a hipótese estatística a ser verificada é a de que há variação na média das respostas de interesse quando são impostas variações nos fatores envolvidos.

Uma vez que a hipótese estatística formulada envolve comparação de médias, o teste de hipóteses respectivo é classificado como paramétrico, já que é baseado em parâmetros da amostra. Rodrigues e Lemma (2009) ressaltam que a validade dos resultados obtidos através dos métodos paramétricos é fortemente dependente da normalidade dos dados analisados. Ainda segundo esses autores, salvo raras exceções, resultados de análises estatísticas efetuadas através de métodos paramétricos não são confiáveis se os dados não pertencem a amostras extraídas de populações com distribuição normal.

Entretanto, na maioria das situações reais não se pode garantir que a população seja bem modelada por uma distribuição normal. Para verificar a normalidade da amostra avaliada se faz necessário realizar testes de aderência com os de Shapiro-Wilk e Kolmogorov-Smirnov (Shapiro e Wilk, 1965; Royston, 1983; Cirillo e Ferreira, 2003). Para o caso particular de amostras grandes ($n > 30$, sendo n o tamanho, ou número de observações da amostra), é possível assumir a normalidade da amostra avaliada tendo como base o Teorema Central do Limite

(Montgomery e Runger, 2009). De acordo com esse teorema, para uma amostra suficientemente grande, a distribuição de probabilidade da média amostral tende a uma distribuição normal. Nesse caso, a média das médias amostrais será a média populacional, ou seja,

$$\mu = \bar{\bar{X}} = \frac{\sum \bar{X}}{n} \quad (4)$$

e a variância das médias amostrais é proporcional à variância populacional

$$V(\bar{\bar{X}}) = \frac{\sigma^2}{n} \quad (5)$$

onde μ e σ^2 são, respectivamente, a média e a variância da população e $\bar{\bar{X}}$ e $V(\bar{\bar{X}})$ são, respectivamente, a média e a variância amostrais.

A formulação do teste de hipóteses consiste na definição de duas hipóteses antagônicas:

- Hipótese nula (H_0): consiste na hipótese de igualdade, afirmando determinada característica que se deseja verificar. Essa hipótese é tida como verdadeira até que evidências estatísticas indiquem o contrário. Em geral, é uma afirmação acerca de algum parâmetro da população (e.g. média, desvio padrão, entre outras);
- Hipótese alternativa (H_1): consiste na hipótese contrária a afirmada pela hipótese nula.

Conforme observado, as hipóteses formuladas devem ser opostas e nunca ocorre de ambas serem simultaneamente verdadeiras. A rejeição da hipótese nula envolve a aceitação imediata da hipótese alternativa.

Como a intenção do teste de hipóteses considerado neste trabalho é avaliar se as variáveis de projeto têm influência significativa nos parâmetros de resposta de interesse, a estratégia adotada consiste em dividir as observações amostrais obtidas em duas partes e comparar as médias de ambas. Mais especificamente, a metodologia adotada para avaliação e inferência estatística segue as seguintes etapas:

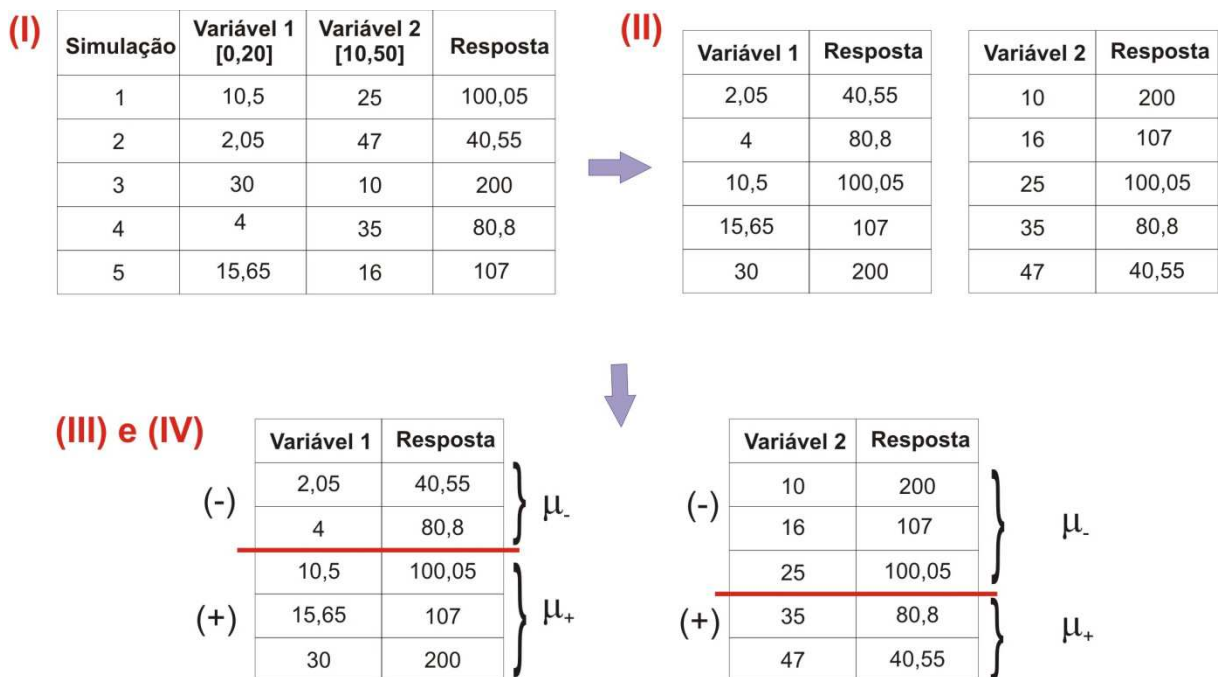
- I. Com base nos dados amostrais definidos pelo planejamento de experimentos, as variáveis são relacionadas com as respostas correspondentes obtidas.
- II. É feita a ordenação em ordem crescente do vetor variável de projeto, sem perder a informação correspondente da resposta de interesse.

III. Os vetores das variáveis de projeto são divididos em duas partes, considerando como referência para divisão o ponto central do intervalo de variação de cada variável. Obtêm-se então dois conjuntos de dados, aqui denominado de superior (+) e inferior (-).

IV. Calcula-se a resposta média da parte inferior (μ_-) e da parte superior (μ_+) dos dados amostrais e essas respostas médias são então comparadas para avaliar a magnitude de efeito de cada variável de projeto nas respostas de interesse.

Apresenta-se na Figura 13, um exemplo ilustrativo destacando as etapas seguidas para a análise estatística como base para o teste de hipótese de diferença entre médias.

Figura 13 – Etapas da estratégia adotada para análise estatística.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

A partir dessa abordagem, ao se verificar a igualdade das médias de ambas as partes da amostra avaliada (μ_+ e μ_-), é possível afirmar que a variável em questão não produz efeito significativo na resposta de interesse, uma vez que a variação da mesma não provocou variação significativa na resposta. No caso da validação dessa hipótese, a variável em questão pode ser desconsiderada no processo de otimização sem perda de representatividade do problema analisado,

sendo a mesma considerada constante em todo o processo, assumindo um valor apropriado definido pelo projetista.

Com esse intuito, considera-se neste trabalho o teste *t* de *Student* para inferência de médias de duas amostras. As hipóteses são definidas da seguinte forma:

$$H_0: \mu_+ - \mu_- = \Delta \quad (6)$$

$$H_1: \mu_+ - \mu_- \neq \Delta \quad (7)$$

onde μ_+ e μ_- são as médias das populações comparadas e Δ o valor de diferença entre as médias a ser considerado no teste.

Sejam $\bar{X}_-, \bar{X}_+, S_-^2, S_+^2$, as médias e as variâncias das amostras, respectivamente. O valor esperado da diferença de médias das amostras é dado por

$$E(\bar{X}_+ - \bar{X}_-) = \mu_+ - \mu_- \quad (8)$$

assim, $\bar{X}_+ - \bar{X}_-$ é um estimador não tendencioso (não viesado) da diferença de médias (Montgomery e Runger, 2009).

A diferença entre as médias equivale à chamada magnitude de efeito, i.e., o valor do efeito causado no parâmetro de resposta dado em função de uma determinada variação na variável de projeto. O teste de hipótese complementa essa informação indicando se a magnitude de efeito observada é ou não significativa, a partir da incorporação de parâmetros de variância na análise.

A variância de $\bar{X}_+ - \bar{X}_-$ é dada por

$$V(\bar{X}_+ - \bar{X}_-) = \frac{\sigma^2}{n_+} + \frac{\sigma^2}{n_-} = \sigma^2 \left(\frac{1}{n_+} + \frac{1}{n_-} \right) \quad (9)$$

onde n_+ e n_- são os tamanhos das partes superior e inferior, respectivamente, das amostras avaliadas e σ^2 é a variância da população.

As variâncias das amostras são dadas por

$$S_+^2 = \frac{\sum(x_+ - \bar{X}_+)^2}{n_+ - 1} \quad (10)$$

$$S_-^2 = \frac{\sum(x_- - \bar{X}_-)^2}{n_- - 1} \quad (11)$$

onde x_+ e x_- correspondem às observações das partes superior e inferior da amostra, respectivamente.

Um estimador combinado da variância da população em termos das variâncias amostrais é dado como segue:

$$S_p^2 = \frac{(n_- - 1)S_-^2 + (n_+ - 1)S_+^2}{n_- + n_+ - 2} \quad (12)$$

que consiste em uma média ponderada das variâncias das amostras, S_-^2 e S_+^2 , sendo os pesos da ponderação dependentes dos dois tamanhos das amostras n_- e n_+ . Assim, observa-se que a primeira parte da amostra contribui com $(n_- - 1)$ graus de liberdade para S_p^2 e a segunda parte da amostra contribui com $(n_+ - 1)$ graus de liberdade. Consequentemente, S_p^2 tem $n_- + n_+ - 2$ graus de liberdade (Montgomery e Runger, 2009).

Para utilizar o teste t de *Student* para comparação de médias define-se a estatística de teste como

$$t = \frac{|\bar{X}_+ - \bar{X}_-| - \Delta}{S_p \sqrt{\left(\frac{1}{n_+} + \frac{1}{n_-}\right)}} \quad (13)$$

Como na hipótese nula deseja-se afirmar a igualdade entre as médias, sendo essa a hipótese a ser testada, assume-se $\Delta = 0$ e a estatística de teste torna-se

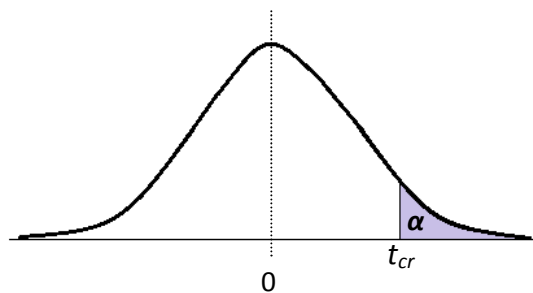
$$t = \frac{|\bar{X}_+ - \bar{X}_-|}{S_p \sqrt{\left(\frac{1}{n_+} + \frac{1}{n_-}\right)}} \quad (14)$$

Assim, o teste t consiste em usar os dados da amostra para calcular a estatística t e depois compará-la com a distribuição t de *Student* para identificar a probabilidade de se ter obtido o resultado observado, caso a hipótese nula seja verdadeira. Em outras palavras, com o valor calculado da estatística de teste t observa-se a função densidade de probabilidade da distribuição t de *Student* e calcula-se a área abaixo dessa função para valores maiores ou iguais ao valor calculado t . Essa probabilidade também é chamada de p -valor.

Essa região delimitada (Figura 14) é denominada região crítica e corresponde aos valores onde a estatística de teste leva a rejeição da hipótese nula, caso essa

área (equivalente à probabilidade) seja menor do que um determinado valor estabelecido (α). Se o valor calculado t for menor do que o valor crítico (t_{cr}) estabelecido, i.e. caso t não esteja dentro da região crítica, a hipótese nula é aceita. Caso contrário, a hipótese nula é rejeitada. É importante ressaltar que aceitar H_0 não significa que a hipótese nula seja verdadeira, mas apenas que não existe evidência suficiente para rejeitá-la.

Figura 14 – Esquema ilustrativo da região crítica do teste de hipóteses.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Como o teste de hipóteses é baseado em algumas amostras, há sempre riscos de erro envolvidos, e o procedimento de decisão pode conduzir a uma de duas conclusões erradas: pode-se rejeitar a hipótese nula, sendo ela verdadeira (Erro tipo I) ou falhar ao rejeitar a hipótese nula quando ela for falsa (Erro tipo II).

Os mecanismos de erros de um teste estatístico encontram-se representados na Tabela 5.

Tabela 5 – Mecanismos dos erros de um teste estatístico.

Decisão	Falha em rejeitar H_0	Rejeitar H_0
H_0 é verdadeira	Não há erro	Erro tipo I
H_0 é falsa	Erro tipo II	Não há erro

Fonte: Montgomery e Runger (2009).

A probabilidade do Erro tipo I é também chamada de nível de significância e é denotada por α . Rodrigues e lemma (2009) afirmam que, em geral, o nível de significância $\alpha = 0,05$ (equivalente a um nível de confiança de 95%) é muito bem aceito pela comunidade científica.

Em resumo, as etapas para realização do teste de hipóteses consistem em:

1. Enunciar claramente as hipóteses H_0 e H_1 ;
2. Fixar o nível de significância α e determinar as regiões críticas do teste;
3. Calcular o valor da estatística de teste;
4. Decidir em rejeitar ou não a hipótese nula.

Para fins de aplicação, o presente trabalho utiliza-se o método fatorial fracionado para planejamento de experimentos no intuito de obter amostras representativas que viabilizem a análise de sensibilidade do comportamento estrutural de *risers* verticais complacentes. Para inferir sobre os resultados o teste t de *Student* é adotado como base para o teste de hipótese na identificação das variáveis de projeto mais significativas, ou seja, que causam maior impacto nas respostas de interesse, para o modelo de *riser* em estudo.

Conforme comentado anteriormente, a análise de sensibilidade proporciona uma melhor compreensão do comportamento do modelo em estudo e fornece informações acerca da significância das variáveis de projeto, o que possibilita a simplificação do modelo para posterior análise de otimização. Para melhor compreender o problema de otimização aqui estudado e modelado, o Capítulo 4, apresentado na sequência, expõe alguns conceitos sobre otimização e a descrição de alguns métodos e parâmetros, com informações que fundamentam as considerações assumidas na aplicação desenvolvida no Capítulo 6.

4 OTIMIZAÇÃO

Soares (1997) define otimização como um mecanismo de análise de decisões complexas, envolvendo a seleção de valores para variáveis, com o simples objetivo de quantificar performance e medir a qualidade das decisões. Schachter *apud* Albrecht (2005) coloca a otimização como sendo a tentativa de se obter o melhor resultado possível para um problema, atendendo a certos critérios e obedecendo a determinadas restrições. Existem diversas definições de otimização e a literatura a respeito do assunto é vasta. De maneira geral, o problema de otimização consiste em encontrar os argumentos (ou variáveis de projeto) que resultam no valor extremo de uma ou mais funções que representem o problema em questão.

A otimização se mostra como uma metodologia bastante eficiente para alcançar soluções de problemas em uma vasta área de aplicação: economia, administração, indústria, engenharia, entre outras. Uma possível aplicação da otimização em engenharia, particularmente da engenharia estrutural, a exemplo do presente trabalho, consiste basicamente em escolher a melhor configuração existente, ou seja, a que melhor se adequa aos objetivos desejados, entre as diversas opções possíveis do modelo estrutural. Esta escolha é determinada pela funcionalidade que se pretende otimizar, descrita por uma função objetivo, pelas variáveis de projeto envolvidas e pelas possíveis restrições que se deseja impor ao sistema. Uma maneira usual de representar um problema de otimização é escrevê-lo na forma

$$\text{achar } \arg \min f_{obj}(x) \quad (15)$$

tal que

$$g_i(x) \geq 0 \text{ para } i = 1, \dots, n_g \quad (16)$$

$$h_j(x) = 0 \text{ para } j = 1, \dots, n_h \quad (17)$$

$$lb_k \leq x_k \leq ub_k \text{ para } k = 1, \dots, n_x \quad (18)$$

onde f_{obj} é a função objetivo a ser minimizada, $g_i(x)$ é a i -ésima restrição de desigualdade, n_g é o número de restrições de desigualdade, $h_j(x)$ é a j -ésima restrição de igualdade, n_h é o número de restrições de igualdade, x é o vetor de variáveis de projeto, n_x é o número de variáveis de projeto, e lb_k e ub_k são os limites

inferior e superior da variável de projeto k , respectivamente. Vale ressaltar que tanto as restrições de igualdade como as de desigualdade são opcionais e podem não existir em determinados problemas.

Este capítulo aborda com mais detalhe cada um desses conceitos a respeito do processo de otimização bem como a descrição de alguns métodos utilizados para a solução do problema.

4.1 CONCEITOS BÁSICOS

Para proporcionar uma melhor compreensão dos termos empregados neste trabalho, bem como na literatura sobre otimização, são apresentados na sequência alguns conceitos mais importantes. Novas definições ou variantes podem ser também citadas ao longo do texto, quando necessário.

4.1.1 FUNÇÃO OBJETIVO

A função objetivo consiste na representação matemática do critério de eficiência adotado, definido e influenciado pelas variáveis de projeto e sob o qual o sistema estrutural deve ser otimizado. Esse critério de eficiência pode ser determinado por apenas uma função, no caso de problemas mono-objetivo, ou possuir vários critérios a serem otimizados, no caso de problemas multiobjetivo.

Normalmente a função objetivo possui dependência em mais de uma variável de projeto, sendo então caracterizada como multidimensional; no caso de dependência de apenas uma variável é classificada como unidimensional. Outra característica importante diz respeito à quantidade de máximos ou mínimos da função: quando essa apresenta um único ponto de mínimo (ou máximo), ela é dita unimodal; caso a função possua mais de um valor extremo, ela é multimodal.

Em problemas que envolvem engenharia estrutural a função objetivo pode ser representada pelo custo de uma estrutura, pela eficiência de um sistema, pelas tensões ou deformações ou qualquer outra medida de desempenho desejada.

4.1.2 VARIÁVEIS DE PROJETO

Os parâmetros variáveis no processo do projeto ótimo e que definem as características determinantes do modelo analisado são denominados variáveis de

projeto. São, portanto, as variáveis para as quais o problema é resolvido, ou seja, são os valores que se deseja determinar.

Em geral, as variáveis de projeto não podem assumir valores arbitrários quaisquer, uma vez que podem fatalmente resultar em uma solução impossível ou inviável na prática. Por isso, faz-se necessário delimitar a faixa de variação das mesmas, definindo os limites superior (ub_k) e inferior (lb_k) para cada variável x_k .

As variáveis de projeto são classificadas em contínuas ou discretas. Se forem contínuas, podem assumir qualquer valor dentro de um determinado intervalo de variação. No caso de variáveis discretas, podem assumir apenas determinados valores específicos. Um exemplo típico de variável de projeto discreta é o diâmetro externo do *riser*, que só pode assumir determinados valores correspondentes aos diâmetros comerciais existentes. Em um mesmo problema pode haver variáveis de projeto contínuas e discretas simultaneamente.

No caso de otimização aplicada a estruturas, as variáveis de projeto podem representar os parâmetros que definem a geometria de um elemento, propriedades dos materiais, entre outros.

4.1.3 RESTRIÇÕES

As restrições consistem em equações de igualdade ou desigualdade que determinam os limites de viabilidade do projeto, expressando uma condição desejável do comportamento do sistema. Normalmente essas condições ou restrições são relacionadas ao material escolhido, resistência, durabilidade, funcionalidade, confiabilidade, eficiência, recursos disponíveis, entre outras.

É importante ressaltar que o correto equacionamento das restrições é determinante para a obtenção da solução ótima viável do problema analisado. A consideração equivocada dessas restrições pode conduzir a uma resposta inviável ou até mesmo resultar em um problema sem solução.

4.1.4 ESPAÇO DE BUSCA

O espaço de busca define a região do domínio viável do problema. Essa região é delimitada pelas restrições pertinentes à análise, bem como pelos limites superior e inferior de cada variável de projeto. É possível encontrar soluções para o problema fora desse domínio viável que tenham valores de função objetivo melhores

do que o valor encontrado dentro do espaço de busca, entretanto tais soluções violam as restrições, tornando o modelo encontrado tecnicamente inviável.

4.1.5 PONTO ÓTIMO

O ponto ótimo é representado pelo vetor composto pelos valores das variáveis de projeto que extremizam a função objetivo e satisfazem as restrições impostas. O valor da função objetivo nesse ponto é denominado valor ótimo. O par formado pelo ponto ótimo e pelo valor ótimo é denominado solução ótima. Essa solução é considerada local caso o valor ótimo esteja localizado apenas numa vizinhança, ou global, caso o valor ótimo seja referente a todo espaço de busca.

4.2 OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO

Problemas de otimização nas mais diversas áreas do conhecimento têm como principal objetivo melhorar o desempenho de um sistema ou processo em relação a determinado parâmetro de interesse. A partir da identificação de tal parâmetro e com base nas características do sistema analisado, é possível formular a medida objetiva de eficiência desejada em função das variáveis de projeto envolvidas. Em projetos de engenharia, os objetivos podem ser, por exemplo, a obtenção do menor custo, do menor prazo, do maior nível de confiabilidade, de menores tensões ou deslocamentos ao longo de uma estrutura, entre outros.

Em alguns casos, o problema de otimização pode ser representado por uma única função objetivo, SOOP (do inglês *Single-Objective Optimization Problem*). Nestas situações, o objetivo do processo de otimização é encontrar a solução viável que represente o mínimo ou máximo global da função objetivo dentro do domínio definido pelas restrições impostas ao problema.

Contudo, são frequentes os casos em que se deseja obter a máxima eficiência em mais de um aspecto do sistema, aspectos esses geralmente conflitantes. Esses problemas, denominados problemas de otimização multiobjetivo, MOOP (do inglês *Multi-Objective Optimization Problem*), requerem a utilização de algoritmos computacionais e métodos matemáticos diferentes daqueles utilizados para solucionar problemas do tipo SOOP. Coello (2006) destaca que a noção de ótimo é diferente em problemas multiobjetivo porque, nesses casos, é desejável

encontrar um equilíbrio entre todos os objetivos ao invés de somente um objetivo atingir o ponto ótimo.

Uma vez que em MOOP busca-se otimizar um conjunto de n funções objetivo, a Eq. 15 da formulação do problema de otimização passa a ser definida na forma

$$\text{achar } \arg \min f_{obj}(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)] \quad (19)$$

Na solução de problemas do tipo MOOP, uma possível solução encontrada pode ser a melhor quanto a um determinado objetivo, mas piorar o desempenho em relação aos demais objetivos. Nessas situações faz-se necessária uma avaliação de dominância dessas soluções na busca por aquelas que gerem a solução ótima em todos os aspectos desejados. A partir dessa abordagem, observa-se que problemas do tipo MOOP não geram apenas uma única solução, mas um conjunto de soluções viáveis ótimas. Uma melhor descrição do conceito de dominância é apresentada na Seção 4.2.1.

Avaliando as características de problemas do tipo SOOP e MOOP, Deb (2001) ressalta que além da quantidade de objetivos considerados, existem outras diferenças fundamentais entre as abordagens multiobjetivo e mono-objetivo. Algumas dessas diferenças são destacadas pelo autor:

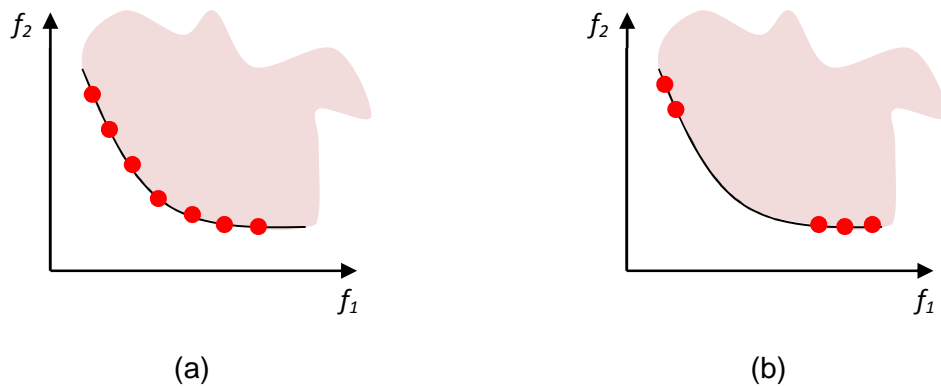
1. Metas diferentes:

Na otimização mono-objetivo existe somente uma meta: encontrar a solução ótima. Mesmo que no espaço de soluções existam soluções ótimas locais, no caso de funções multimodais, a meta é sempre encontrar a solução ótima global. Por outro lado, na otimização multiobjetivo existem duas metas claramente definidas: encontrar um conjunto de soluções ótimas, em equilíbrio de compromisso com todos os objetivos envolvidos, e ainda manter a diversidade entre as soluções ótimas encontradas, de forma que as soluções estejam bem distribuídas no espaço de solução, favorecendo o aparecimento de soluções variadas em termos de compromissos entre os valores das funções objetivo e proporcionando mais opções ao projetista.

Na Figura 15 são ilustrados os dois casos de distribuição das soluções ótimas globais encontradas, (a) com diversidade e boa distribuição das soluções e (b)

soluções mal distribuídas, concentradas em determinadas regiões do espaço de busca.

Figura 15 – Distribuição das soluções ótimas encontradas.

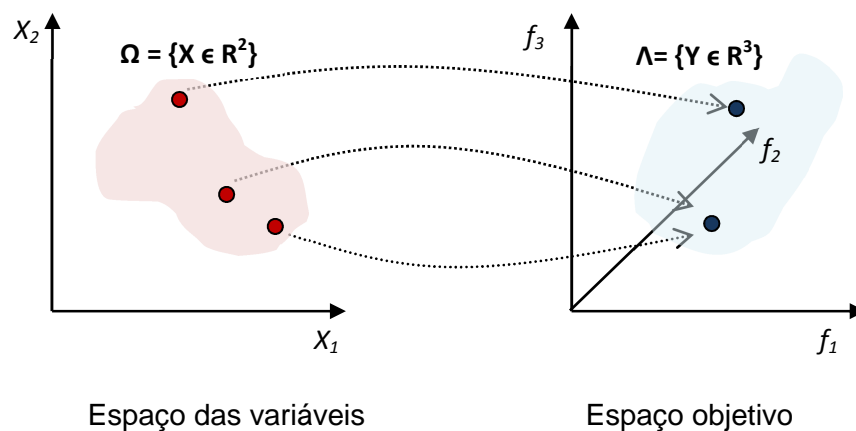


Fonte: Autor desta dissertação (2011)

2. Quantidade de espaços envolvidos:

Outra característica dos problemas multiobjetivo é que, devido à presença de mais de uma função objetivo, surge um novo espaço além do espaço definido pelas variáveis de projeto, denominado espaço objetivo. Dessa forma, é possível mapear o espaço das variáveis de decisão com o seu correspondente espaço objetivo. Ressalta-se que esse mapeamento pode não ser unívoco, podendo haver a ocorrência de diferentes configurações com o mesmo valor de resposta. A Figura 16 ilustra essa relação para o caso de duas variáveis de projeto e três funções objetivo.

Figura 16 – Mapeamento do espaço das variáveis de decisão no espaço objetivo.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Embora o espaço das variáveis de decisão e o espaço objetivo estejam relacionados, o mapeamento entre eles raramente é linear e as propriedades desses espaços nem sempre são similares. Deb (2001) destaca que esse é mais um complicador dos problemas multiobjetivo. Geralmente, a proximidade de duas soluções em um espaço não resulta na mesma proximidade no outro espaço. Assim, existe a necessidade de mapear o espaço das variáveis no espaço dos objetivos de forma a encontrar as diversas soluções ótimas possíveis, sem, no entanto, perder a característica de diversidade entre as soluções.

Iranzo *et al.* (2009) comentam que as técnicas de otimização multiobjetivo oferecem vantagens sobre as técnicas de otimização mono-objetivo, uma vez que são capazes de fornecer inúmeras soluções diferentes para os objetivos de interesse, facilitando ao projetista escolher a melhor solução de acordo com os interesses de projeto. Na literatura diversos autores utilizaram tal metodologia na otimização de problemas específicos obtendo bons resultados. Bardanachvili (2006) utiliza a otimização multiobjetivo com estratégias evolutivas aplicada a projetos estruturais demonstrando a aplicação na otimização de seção de vigas, buscando uma seção transversal que leve ao menor peso e, ao mesmo tempo, às menores deflexões. Burgos (2008) aplica técnicas de otimização multiobjetivo ao projeto preliminar de navios petroleiros. Nesse trabalho, o autor utiliza duas funções de mérito conflitantes: custo e vazamento médio de óleo; e busca as dimensões e coeficientes de forma ótimos para um navio petroleiro utilizando algoritmos genéticos. Outras aplicações podem ser encontradas em Castro (2001), Berbert (2008), Martins e Burgos (2011) e Kang *et al.* (2011).

4.2.1 DOMINÂNCIA DE PARETO

Conforme comentado nas seções anteriores, em um problema de otimização multiobjetivo, normalmente os objetivos são conflitantes e não existe apenas uma única solução que seja ótima simultaneamente para todos os objetivos. Logo, a solução nesses casos envolve a identificação de soluções que tentam equilibrar os vários objetivos. Na literatura essas soluções também são denominadas soluções de compromisso ou ainda soluções não dominadas.

Normalmente essas soluções formam uma fronteira no espaço de busca, denominada fronteira de Pareto, na qual todas as soluções encontradas são

atrativas para o problema multiobjetivo sob análise. A obtenção dessa fronteira é dada pela aplicação do conceito de dominância entre as soluções avaliadas ao longo do processo de otimização.

Segundo esse conceito, todas as soluções são comparadas duas a duas sendo verificada a dominância ou não de uma sobre a outra. De acordo com Deb (2001), o conceito de dominância pode ser descrito como segue:

Definição 1: Dominância

Dados dois vetores de decisão x^* e $y^* \in S^*$, sendo S^* o espaço das variáveis de decisão, então a solução x^* domina a solução y^* (representada como $x^* < y^*$) se as seguintes condições são satisfeitas:

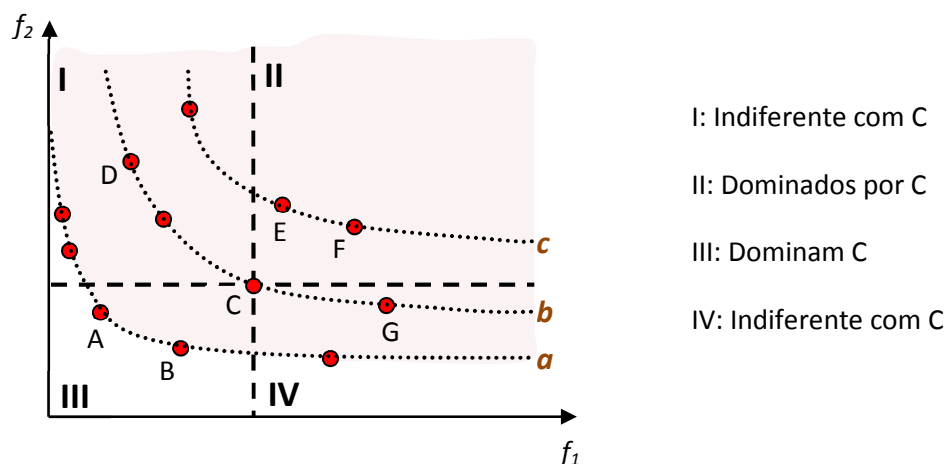
1. A solução x^* não é pior que y^* em todos os objetivos;
2. A solução x^* é estritamente melhor que y^* pelo menos em um objetivo.

Se alguma dessas condições for violada, a relação de dominância de x^* sobre y^* não pode ser comprovada. Caso contrário, esse fato também pode ser escrito como:

- y^* é dominado por x^* ;
- x^* é não dominado por y^* ;
- x^* é não inferior a y^* .

Essas relações de dominância são ilustradas na Figura 17 para melhor compreensão das relações acima definidas.

Figura 17 – Esquema ilustrativo das relações de dominância de Pareto no espaço objetivo.



Na referida figura, o ponto C domina os pontos pertencentes ao subconjunto do espaço objetivo II, uma vez que as seguintes relações são verificadas:

$$f_1(C) < f_1(E)$$

$$f_1(C) < f_1(F)$$

$$f_2(C) < f_2(E)$$

$$f_2(C) < f_2(F)$$

Os pontos pertencentes ao subconjunto III dominam o ponto C, já que:

$$f_1(A) < f_1(C)$$

$$f_1(B) < f_1(C)$$

$$f_2(A) < f_2(C)$$

$$f_2(B) < f_2(C)$$

Os pontos C, D e G são indiferentes, já que:

$$f_1(D) < f_1(C), \text{ mas } f_2(D) > f_2(C)$$

$$f_1(C) < f_1(G), \text{ mas } f_2(C) > f_2(G)$$

Definição 2: Otimalidade de Pareto

Uma solução $x^* \in S^*$ é uma solução Pareto ótima caso não exista qualquer outra solução $y^* \in S^*$ que a domine, de modo que:

$$x^* \in S^* | \nexists y^* \in S^* | f(y^*) \leq f(x^*) \wedge f(y^*) \neq f(x^*) \quad (20)$$

Definição 3: Fronteira de Pareto

O conjunto formado por todas as soluções de Pareto constitui a denominada fronteira de Pareto. Considerando um problema multiobjetivo com um vetor de funções $f_{obj}(x)$ e um conjunto de soluções de Pareto P^* , a fronteira de Pareto define-se como segue:

$$FP^* = \{u = f_{obj}(x^*) | x^* \in P^*\} \quad (21)$$

Ainda em referência à Figura 17, observa-se que as soluções agrupadas nas linhas pontilhadas *a*, *b* e *c* constituem conjuntos de soluções não dominadas. Entretanto, verifica-se que o conjunto *a* domina o conjunto *b* que por sua vez domina

o conjunto *c*. Logo, no caso do exemplo analisado, o conjunto de soluções não dominadas *a* constitui a fronteira de Pareto.

Deb (2001) destaca que existe uma sutil diferença entre um conjunto de soluções não dominadas e a fronteira de Pareto. De acordo com as definições apresentadas, um conjunto de soluções não dominadas é definido no contexto apenas de uma amostra do espaço de busca, enquanto a fronteira de Pareto é definida em relação a todo o espaço de busca. Logo, pode-se afirmar que o objetivo do processo de otimização multiobjetivo é identificar a fronteira de Pareto. Entre as soluções ótimas contidas na fronteira de Pareto não há como identificar qual é a melhor, sendo necessário acrescentar novos critérios e informações que levem o projetista a optar por determinada solução.

4.2.2 ABORDAGENS DA OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO

O campo da otimização multiobjetivo engloba uma série de métodos, cada um com diferentes características e estratégias de busca pelo ótimo. Em função de suas particularidades, cada método é capaz de resolver melhor problemas com determinadas características. Em outras palavras, determinados métodos podem gerar excelentes resultados para certos tipos de problemas, e ao mesmo tempo ser ineficientes quando aplicados a problemas com diferentes características. Em alguns problemas, por exemplo, é necessário encontrar as soluções ótimas de Pareto com exatidão, em outros casos, uma aproximação da fronteira de Pareto já é suficiente. Dessa forma, não se pode afirmar que um método é melhor que outro, mas se pode chegar à conclusão que certo método é mais adequado a determinada aplicação.

De acordo com as definições apresentadas nas seções anteriores, os problemas de otimização multiobjetivo envolvem a busca de valores para as variáveis de projeto que levem ao extremo de mais de uma função objetivo. Foi visto ainda que, uma vez que mais de uma função de mérito está envolvida no problema, geralmente não há apenas uma solução ótima, mas um conjunto de soluções de compromisso que buscam um equilíbrio entre os objetivos definidos. No entanto, na prática, deseja-se obter somente uma solução como resposta ao problema analisado, independentemente do tipo de otimização em utilizado.

Nesse sentido, para classificar os métodos de otimização multiobjetivo Cohon (2004) utiliza como parâmetro a direção do fluxo de informação no processo de otimização. O referido autor identifica dois tipos comuns de fluxo de informação:

– *Top-down* (de cima para baixo): cuja direção do fluxo de informação é do tomador de decisão para o analista. Nessa abordagem, o tomador de decisão define inicialmente prioridades em relação aos objetivos avaliados, identificando quais são os mais importantes no processo e essas informações são então incorporadas ao método de solução aplicado ao problema. Essa classe de métodos também é denominada de métodos *a priori*. Nessa categoria inserem-se os métodos clássicos, a exemplo do método da soma ponderada, método das ε -restrições e método do gradiente.

– *Bottom-up* (de baixo para cima): cuja direção do fluxo de informação é do analista para o tomador de decisão. Nessa abordagem, inicialmente é realizado o processo de otimização multiobjetivo, por meio do qual as soluções ótimas de Pareto são encontradas e, na sequência, o tomador de decisão opta por apenas uma solução específica entre as soluções geradas utilizando critérios e informações adicionais. Essa classe de métodos também é denominada de métodos *a posteriori* ou ainda de métodos de geração. Nessa categoria inserem-se os métodos baseados em estratégias evolutivas, a exemplo dos algoritmos genéticos e do método de enxame de partículas.

No presente trabalho utiliza-se o método *a posteriori*, com direção de fluxo *bottom-up*, com auxílio do programa modeFRONTIER® (modeFRONTIER, 2011) tanto na aplicação do método específico de otimização para obtenção da fronteira de Pareto quanto na análise dos resultados e tomada de decisão na escolha por uma determinada configuração ótima, posteriormente à análise.

4.3 MÉTODOS CLÁSSICOS MULTIOBJETIVO

A literatura dispõe de vários métodos clássicos para tratar um problema de otimização multiobjetivo (Cohon, 2004; Deb, 2001; Deb, 2005; Rao, 2009; Sampaio, 2011). De modo geral, os métodos clássicos transformam o problema de otimização multiobjetivo em um problema mono-objetivo, incorporando informações subjetivas adicionais, de modo a identificar prioridades em relação aos objetivos do problema. Dessa forma, incorporando as prioridades definidas, alguns métodos

clássicos, por exemplo, transformam o vetor função objetivo em uma função escalar, reduzindo o processo a apenas um objetivo (Oliveira e Saramago, 2004).

Entre os métodos clássicos, destacam-se:

- Métodos baseados em escalonamento das funções:
 - Método da ponderação dos objetivos;
 - Método do critério global;
- Métodos baseados em restrições:
 - Método hierárquico;
 - Método da negociação;
 - Método da programação de metas;

Oliveira (2005) apresenta uma contribuição ao estudo dos métodos clássicos de otimização multiobjetivo aplicando os mesmos para solução de problemas de engenharia mecânica. Os cinco métodos citados acima são avaliados no referido trabalho e indicações relevantes sobre a utilização desses métodos são apresentadas.

Essa abordagem simplifica o processo de otimização, uma vez que reduz a otimização vetorial a um problema de otimização escalar. Por outro lado, as prioridades inicialmente definidas podem influenciar a solução dando mais importância a um dos objetivos, enquanto pode haver outro objetivo mais relevante ao processo.

4.4 ALGORITMOS EVOLUTIVOS MULTIOBJETIVO

Frente às dificuldades encontradas nos métodos clássico de otimização, técnicas heurísticas foram desenvolvidas e vêm sendo aprimoradas ao longo dos anos. Os algoritmos heurísticos de otimização são métodos que obtêm soluções aproximadas para problemas de otimização. Segundo Arroyo (2002), um método é considerado heurístico quando não há conhecimentos matemáticos completos sobre seu comportamento, assim as soluções são avaliadas empiricamente por meio de simulações na busca pela solução ótima. Bueno (2009) define heurística como uma busca contínua e empírica, com vários ótimos locais, cujo resultado é o melhor que se pode encontrar sob determinadas condições. Tais técnicas proporcionam boas soluções, contudo não garantem que as soluções encontradas sejam ótimas. Entre

essas técnicas, as estratégias bioinspiradas surgem como metodologias eficientes nos processos de otimização multiobjetivo.

Os sistemas bioinspirados baseiam-se nas características de fenômenos e processos biológicos, com o intuito de desenvolver algoritmos capazes de resolver problemas complexos (Castro e Von Zuben, 2004). Entre os diversos métodos bioinspirados destacam-se as redes neurais artificiais (Wasserman, 1989), os sistemas imunológicos artificiais (Timmis, 2000), colônia de formigas (Dorigo, 1992; Dorigo *et al.*, 1996), enxame de partículas (Kennedy e Eberhart, 1995), algoritmos evolucionários (Deb, 2001; Coello *et al.*, 2007), entre outros. Esses métodos têm sofrido um grande desenvolvimento e mostrado uma eficiência cada vez maior na solução de problemas complexos, a exemplo do dimensionamento de estruturas *offshore* (Augusto *et al.*, 2002; Faller, 2009; Rosa, 2006; Oliveira, 2008; Baioco, 2011).

Entre esses métodos, o presente trabalho aborda apenas os algoritmos evolucionários. Informações completas sobre os métodos citados podem ser obtidas nas respectivas referências informadas.

De modo geral, os métodos evolutivos são baseados na evolução de indivíduos de uma população, representativa das variáveis de projeto, em busca do ponto ótimo desejado. Esse processo de busca aplica os fundamentos da teoria de Darwin, com base na ocorrência de seleção de indivíduos, processo no qual somente os mais aptos e melhor adaptados possuem chances de sobreviver e, conseqüentemente, de reproduzir.

No desenvolvimento dessa classe de métodos, diferentes estratégias de evolução foram desenvolvidas, diferenciando os algoritmos existentes. Entre os métodos evolutivos de otimização multiobjetivo destacam-se: VEGA (*Vector Evaluated Genetic Algorithm*) (Schaffer, 1984); MOGA (*Multi-Objective Genetic Algorithm*) (Fonseca e Fleming, 1993); NPGA (*Niched Pareto Genetic Algorithm*) (Horn e Nafpliotis, 1993); NSGA (*Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm*) (Srinivas e Deb, 1994); NSGA-II (*Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm*) (Deb *et al.*, 2002); SPEA (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm*) (Zitzler e Thiele, 1999), entre outros. Zitzler *et al.* (2000) apresentam uma comparação entre os algoritmos evolutivos multiobjetivo por meio de exemplos de aplicação.

A aplicação de algoritmos evolutivos em problemas de otimização é bastante abrangente. Na literatura é possível encontrar exemplos de aplicação de algoritmos evolutivos em diversos tipos de problemas, nas diversas áreas do conhecimento: otimização energética da operação de um sistema adutor de água tratada (Bardales, 2007), otimização em problema de estoque (Azuma, 2011), otimização da distribuição da carga horária de professores (Góes, 2005), otimização de estruturas (Castro, 2001), otimização de sistemas de ancoragem e *risers* (Albrecht, 2005; Monteiro, 2008; Vieira, 2009; Vieira, 2008; Tanaka, 2009).

4.4.1 ALGORITMOS GENÉTICOS

O método dos algoritmos genéticos (Holland, 1992; Goldberg, 1989) consiste em um dos métodos evolutivos de otimização mais conhecidos e foi idealizado para simular a ideia de Darwin de seleção natural aliada às leis de herança genética de Mendel. De acordo com essa ideia, cada configuração analisada é vista como um indivíduo e o problema consiste em maximizar ou minimizar a performance dos indivíduos em relação à determinada medida de eficiência, ou função objetivo, desejada. O algoritmo funciona fazendo com que os melhores indivíduos passem adiante, para as futuras gerações, o seu material genético, enquanto os indivíduos menos adaptados não sobrevivem.

Algoritmos Genéticos são muito eficientes para busca de soluções ótimas em uma grande variedade de problemas, pois não impõem muitas das limitações encontradas nos métodos de busca tradicionais. Adicionalmente, por serem baseados em processo da evolução biológica, são capazes de identificar e explorar todo o espaço de busca do problema e convergir para soluções ótimas, ou aproximadamente ótimas em níveis globais. Dessa forma, esses algoritmos são indicados para se obter soluções de problemas que possuem um espaço de busca grande, sendo capazes de identificar rapidamente sub-regiões de interesse para o processo de otimização. Outra vantagem dessa classe de métodos é que ela requer pouco conhecimento sobre a função a ser otimizada. Logo, para funções desconhecidas, descontínuas e não diferenciáveis, os algoritmos genéticos estão entre os métodos mais indicados. Embora possam parecer simplistas do ponto de vista biológico, esses algoritmos são suficientemente complexos para fornecer mecanismos de busca adaptativa poderosos e robustos (Lecheta, 2004).

Para melhor compreensão da ideia e do funcionamento dos algoritmos genéticos se faz necessário definir alguns conceitos básicos utilizados nesses algoritmos, englobando definições gerais, parâmetros dos algoritmos e operadores genéticos. Essas definições são apresentadas nas Seções 4.4.1.1 e 4.4.1.2.

4.4.1.1 DEFINIÇÕES GERAIS

Como os algoritmos genéticos se utilizam dos conceitos da genética para simular a evolução das populações, cabe inicialmente fazer uma analogia entre os termos usados na biologia e o método dos algoritmos genéticos aplicados ao problema de otimização.

A genética populacional é a área biológica na qual se baseia a metodologia dos algoritmos genéticos. De acordo com essa ciência, o surgimento de novas gerações é realizado através da reprodução, que pode ocorrer de forma assexuada (sem troca de material genético entre indivíduos) ou sexuada (que exige a presença de dois organismos que fazem a troca entre si do material genético). A metodologia aplicada pelos algoritmos genéticos é baseada na reprodução sexuada, a qual envolve os conceitos dos seguintes parâmetros: cromossomos, genes e alelos.

Nesse contexto, é possível criar a seguinte analogia:

- **Cromossomos:** correspondem aos indivíduos analisados ao longo do processo de otimização. No caso particular do presente trabalho o cromossomo corresponde a uma determinada configuração geométrica do *riser* em estudo. O cromossomo consiste em uma estrutura formada por uma sequência de genes. Uma forma bastante utilizada para representação dos cromossomos no algoritmo genético é a representação binária. Nessa representação um cromossomo pode ser montado utilizando a representação binária das variáveis. Um exemplo da representação de um indivíduo (cromossomo) caracterizado pela definição de três variáveis de projeto (x_1, x_2, x_3) , cujos valores para uma possível solução sejam $x_1 = 10$, $x_2 = 3$ e $x_3 = 9$, é dado como segue:

$$\{x_1, x_2, x_3\} = \{10, 3, 9\} = \{1010, 0011, 1001\}$$

formando o cromossomo: 101000111001.

Tanaka (2009) destaca que este método é excelente para variáveis discretas e inteiras, mas também pode lidar com variáveis contínuas desde que estas sejam

discretizadas com um número de bits adequado para representar a precisão desejada. Outras opções para essa representação são a codificação por permutação e a codificação por valor.

Figura 18 – Analogia entre termos da genética populacional e dos algoritmos genéticos.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

- Genes: representam as variáveis de projeto. Correspondem ao elemento constituinte de um cromossomo, geralmente responsável pela codificação de um único parâmetro, ou seja, consiste em um elemento do vetor que representa um cromossomo. Cada indivíduo, ou cromossomo, tem um determinado número de genes, cada um descrevendo uma variável específica do problema.

- Alelos: representam os valores atribuídos aos genes.

- Genótipo: corresponde a informação contida no cromossomo. Consistem em uma estrutura de dados que representa uma solução candidata a um determinado problema.

- Fenótipo: corresponde a decodificação de um ou mais cromossomos que leva a uma determinada resposta de interesse do sistema em estudo.

- População: representa um conjunto de indivíduos ou configurações a serem analisadas.

- Geração: equivale ao número de iterações que o algoritmo genético executa.

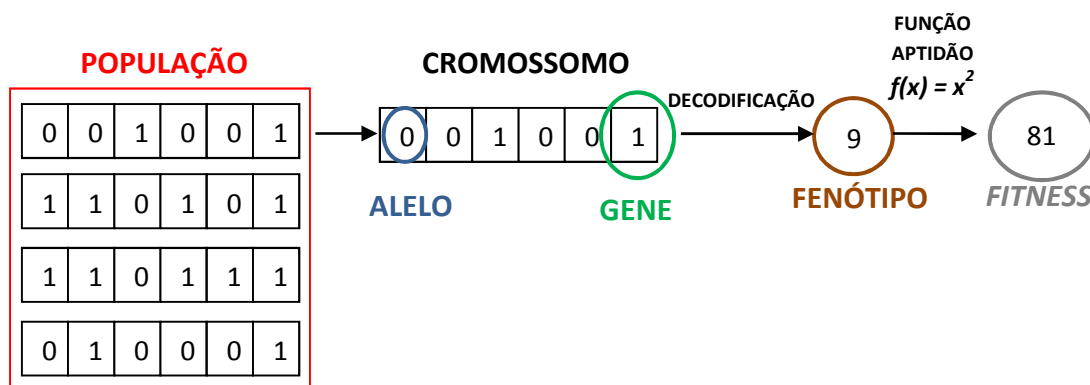
- Operações Genéticas: consistem nas operações que o algoritmo genético realiza sobre cada um dos indivíduos (cruzamento e mutação).

- **Seleção:** consiste no processo de selecionar os indivíduos da população que resultam no melhor desempenho. Por meio desse processo os algoritmos genéticos são capazes de identificar os indivíduos mais aptos, para que permaneçam na população durante o processo de evolução, e os menos adaptados, para que sejam excluídos do processo. Diversos métodos de seleção já foram desenvolvidos, entre eles: a seleção proporcional, a seleção por ranking e a seleção por torneio.

- **Aptidão ou *fitness*:** referente a cada indivíduo, é o valor da função a ser otimizada. Consiste na composição da função objetivo, com funções de penalidade estabelecidas a partir das restrições do problema. De modo geral, representa uma medida da capacidade de sobrevivência de um cromossomo no processo de evolução e, conseqüentemente, a probabilidade dele se reproduzir com mais frequência. No caso de um problema de minimização, por exemplo, quanto menor o valor da função objetivo, maior a aptidão de um determinado indivíduo. Isso representa que a solução deste indivíduo é uma melhor solução para o problema quanto maior for a aptidão. A aptidão pode ser calculada de diversas maneiras, mas sempre em função do valor de função objetivo.

A Figura 19 ilustra um esquema da analogia apresentada.

Figura 19 – Esquema ilustrativo da analogia do método AG com a genética.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

4.4.1.2 OPERADORES GENÉTICOS

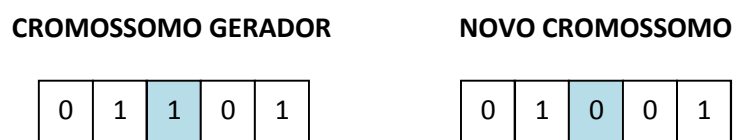
Ao longo do processo de busca pela solução ótima, os algoritmos genéticos aplicam basicamente duas operações: cruzamento e mutação. Tais operações têm como objetivo estabelecer diretrizes de busca; em outras palavras, para uma dada

população os operadores genéticos são aplicados com o intuito de gerar populações sucessivas geneticamente melhoradas em termos de aptidão.

Essas duas operações têm papéis diferentes no algoritmo genético, ambos importantes. Elas garantem a manutenção da diversidade da população bem como das características de adaptação adquiridas e repassadas pelas gerações anteriores. Dessa forma, os operadores genéticos promovem transformações na população através de sucessivas gerações até que seja atingido algum critério de parada, ou convergência. Tal critério geralmente leva em consideração a uniformidade das populações e a relação entre a média e o valor do melhor indivíduo.

A mutação é efetuada alterando-se o valor (alelo) de um determinado gene de um indivíduo sorteado com uma determinada probabilidade, denominada probabilidade de mutação. Desta forma, alguns indivíduos da nova população podem ter um de seus genes alterados aleatoriamente. A mutação é utilizada para garantir que diversas alternativas sejam avaliadas na busca pelo ótimo, possibilitando uma maior varredura do espaço de busca e evitando que o algoritmo genético convirja prematuramente para mínimos locais. A Figura 20 apresenta um exemplo esquemático do operador de mutação para codificação binária.

Figura 20 – Exemplo de operação de mutação de um ponto escolhido aleatoriamente.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Outro operador utilizado nos algoritmos genéticos é o cruzamento. Esse operador permite a troca de material genético (características) de dois indivíduos selecionados da população corrente, gerando novos indivíduos, geneticamente melhorados, para a nova população. O cruzamento é considerado o operador genético predominante, sendo, desta forma, aplicado com probabilidade maior que a probabilidade de mutação.

A operação de cruzamento pode ser realizada de diferentes maneiras, as mais utilizadas são descritas a seguir.

• **Cruzamento de um único ponto:** consiste no tipo mais simples de cruzamento. A partir dessa estratégia, apenas um ponto do cromossomo é sorteado aleatoriamente e a partir deste ponto as informações genéticas dos pais são trocadas. A Figura 21 mostra um exemplo de cruzamento de um único ponto. Assim, após esta operação, os cromossomos gerados substituem os genitores na nova população.

Figura 21 – Exemplo de cruzamento de um único ponto.



Fonte: Adaptada de Amorim (2006)

• **Cruzamento multi-pontos:** consiste na estratégia de troca de material genético em mais de um ponto do cromossomo. Um exemplo dessa estratégia é apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Exemplo de cruzamento multi-pontos.



Fonte: Adaptada de Amorim (2006)

- **Cruzamento uniforme:** não utiliza pontos de cruzamento, mas determina, através de um parâmetro global, qual a probabilidade de cada variável ser herdada de cada pai (Falkenauer, 1999).

4.4.1.3 PARÂMETROS DOS ALGORITMOS GENÉTICOS

A aplicação dos algoritmos genéticos depende da definição de alguns parâmetros, que possuem grande influência no desempenho do processo de otimização. Os parâmetros mais importantes dessa classe de métodos são: o tamanho da população, o número de gerações, a probabilidade de cruzamento e a probabilidade de mutação. A adequada definição desses parâmetros depende das características particulares de cada problema e dos recursos disponíveis, principalmente em termos computacionais.

O tamanho da população equivale ao número de cromossomos existentes na população de cada geração. Esse tamanho, normalmente considerado constante durante a evolução, possui grande influência no método, podendo afetar o desempenho global e a eficiência do processo de otimização. A definição de uma população pequena acarreta um fraco desempenho, uma vez que deste modo a população fornece uma pequena cobertura do espaço de busca, podendo conduzir o algoritmo na direção de um mínimo local. Por outro lado, a adoção de uma população grande fornece uma cobertura representativa do domínio do problema, além de prevenir convergências prematuras para soluções locais. Entretanto, quanto maior o tamanho da população, maior é o tempo de análise e maiores são os recursos computacionais necessários.

Outro parâmetro importante dos algoritmos genéticos é o número máximo de gerações, que define o número de iterações do método na busca pelo ponto ótimo. Um número baixo de gerações pode ser insuficiente para que as operações genéticas aplicadas conduzam a solução ótima desejada. No entanto, uma grande quantidade de gerações pode elevar significativamente o custo computacional associado, uma vez que conduz a um grande número de avaliações da função objetivo. A quantidade de gerações necessárias para gerar soluções ótimas, ou aproximadamente ótimas, depende das características do problema bem como da população inicial definida. Em geral, é vantajoso que na população inicial existam indivíduos que gerem soluções viáveis e com bom valor de aptidão. Para tanto, a experiência do projetista na definição dessa população tem grande influência. Além

disso, a realização de análises prévias pode contribuir na seleção de indivíduos da população inicial. Nessa definição também é importante garantir a diversidade dos indivíduos, isto é, garantir que os indivíduos estejam uniformemente distribuídos por todo o espaço de busca.

Dada à importância já apresentada do operador de cruzamento, deve-se definir adequadamente a probabilidade com que a mesma ocorre. Esse parâmetro, denominado probabilidade de cruzamento ou de recombinação é uma grandeza percentual do número de indivíduos que sofrem o processo de cruzamento em relação ao número total de indivíduos de uma população. Essa probabilidade tem grande influência no que diz respeito à convergência do processo de busca, uma vez que a definição de uma alta probabilidade de cruzamento pode conduzir a eliminação de indivíduos com alto desempenho. Por outro lado, uma baixa probabilidade de cruzamento pode conduzir a uma convergência muito lenta devido à baixa taxa de exploração das características genéticas favoráveis ao bom desempenho dos indivíduos. Geralmente, a probabilidade de cruzamento varia entre 0,5 e 0,95, mas esses números indicam apenas uma ordem de grandeza, já que existem diferentes procedimentos para esse tipo de operação e o comportamento do processo é bastante dependente das características de cada problema.

A probabilidade de mutação corresponde à taxa de ocorrência de mutação dos cromossomos nas populações ao longo da evolução do processo de otimização. Esse parâmetro também afeta significativamente o desempenho do método, pois se a taxa escolhida for muito alta o processo de busca pode se tornar essencialmente aleatório. Assim como os demais parâmetros, a adequada probabilidade de mutação depende das características do problema a ser resolvido. Geralmente, as taxas utilizadas variam entre 0,001 e 0,1. De Jong (2006) sugere que a taxa de mutação seja inversamente proporcional ao tamanho da população. Barbosa *et al.* (2010) sugerem a adoção de uma probabilidade de mutação adaptativa com o intuito de no início do processo evolucionário ser adotada uma baixa taxa de mutação, ou seja, pouca alteração das partes cromossômicas. Nessa abordagem, a taxa de mutação adapta-se ao sistema conforme o passar das gerações, se adequando às características do problema avaliado.

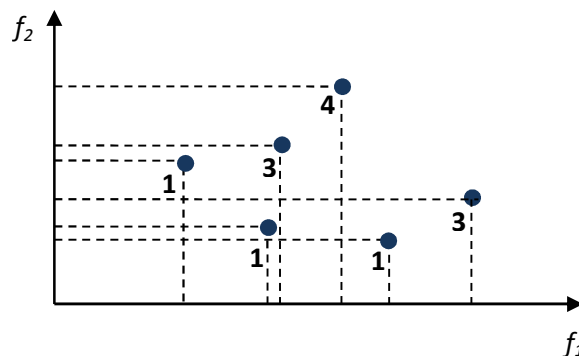
Alguns estudos já foram desenvolvidos no sentido de avaliar a definição adequada dos parâmetros dos algoritmos genéticos para diferentes tipos de problemas. Alguns resultados acerca desse tipo de avaliação podem ser

encontrados em Pinho *et al.* (2007) e Tanaka (2009). Existem também estudos que utilizam algoritmos genéticos como método de otimização para a escolha dos parâmetros de outro algoritmo genético, devido à importância da escolha correta destes parâmetros (Coelho *et al.*, 2011; Leiras, 2010).

4.4.1.4 MOGA (*MULTIOBJECTIVE GENETIC ALGORITHM*)

Este método foi proposto por Fonseca e Fleming (1993) e trouxe como inovação a aplicação simultânea dos conceitos de dominância na classificação das soluções avaliadas ao longo das gerações bem como o conceito de diversidade das soluções não dominadas. A classificação proposta para os indivíduos é baseada na definição de um parâmetro denominado *rank*. Para um determinado indivíduo, esse parâmetro é igual ao número de indivíduos da população corrente que o dominam, acrescido da unidade. Por meio dessa abordagem, todos os indivíduos não dominados possuem o valor de *rank* igual a um e a classificação dos indivíduos dominados não excede o tamanho da população. Um exemplo ilustrativo dessa estratégia de classificação é apresentado na Figura 23, na qual se supõe um problema de minimização.

Figura 23 – Exemplo ilustrativo da classificação realizada pelo MOGA.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Ao final do procedimento de ordenamento pode haver a ocorrência de mais de um indivíduo compartilhando a mesma posição. Para tratar esse tipo de situação foi introduzido o conceito de nichos (Mahfoud, 1995), que correspondem a grupos de indivíduos com características comuns; em geral, são indivíduos com valores semelhantes de aptidão e localizados em uma vizinhança próxima no espaço objetivo. A utilização da estratégia de avaliação de nichos consiste, basicamente, em calcular um parâmetro denominado *fitness* compartilhado de cada solução

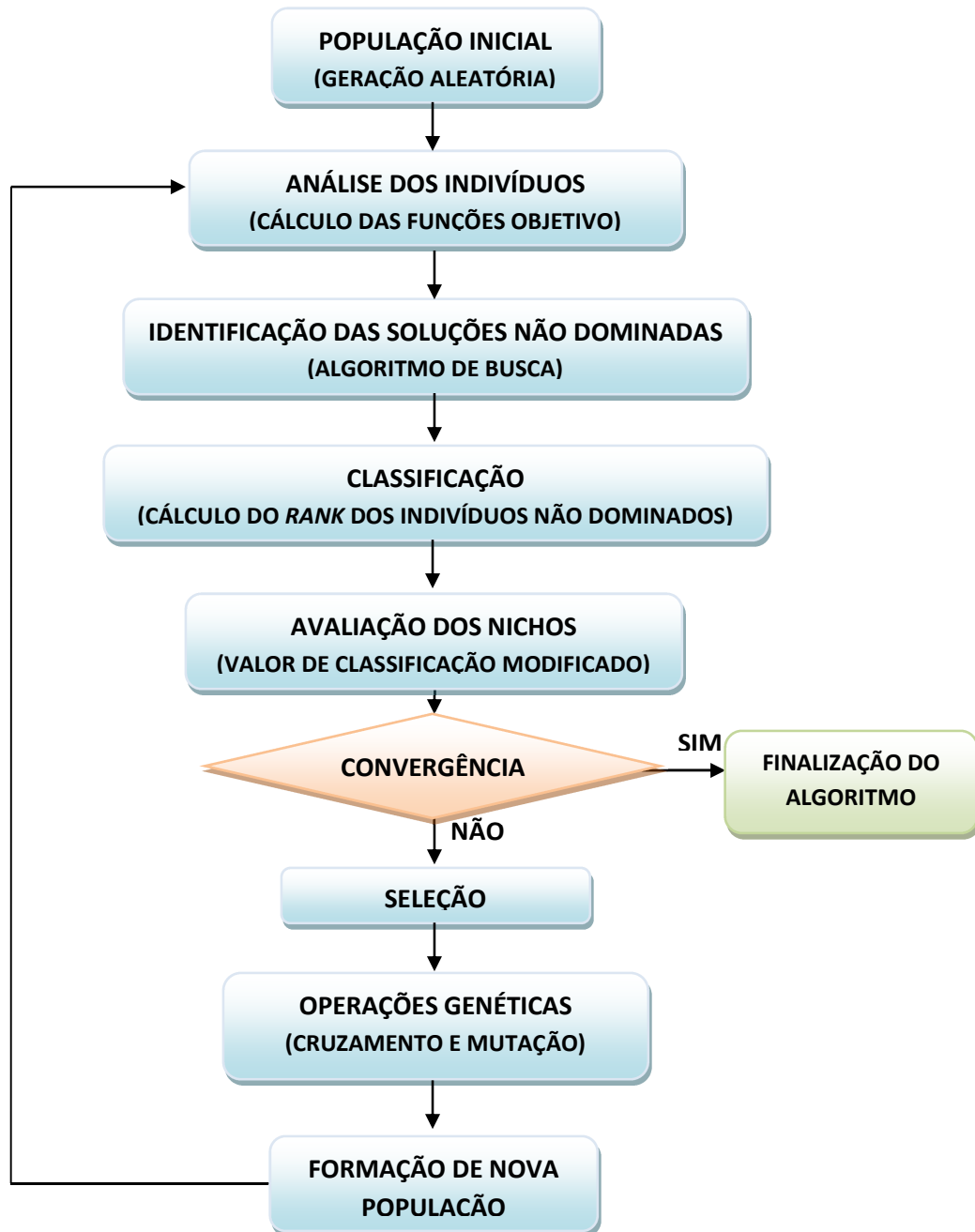
pertencente a determinado nicho. No cálculo desse parâmetro, as soluções que residem em um nicho menos ocupado terão melhor *fitness* compartilhado, permitindo que soluções pouco representadas em cada *rank* se destaquem.

Amorim (2006) destaca que esta estratégia mantém a diversidade nos valores da função de aptidão, mas pode não garantir a diversidade no conjunto das variáveis. Dessa forma, o MOGA pode não ser eficiente em encontrar as múltiplas soluções em problemas em que diferentes pontos ótimos de Pareto correspondem aos mesmos valores de aptidões. A importância desse tipo de tratamento reside no fato de que soluções diferentes com mesmo valor de função objetivo podem conduzir a um desempenho semelhante, mas o conhecimento das diversas alternativas é desejável uma vez que amplia as opções de escolha do projetista.

Após a classificação, tendo sido identificados os indivíduos (soluções) com melhor desempenho, é realizado procedimento de seleção para escolher ou descartar determinadas soluções e possibilitar a seleção dos indivíduos mais aptos para a reprodução.

A Figura 24 apresenta um fluxograma do MOGA, resumindo o procedimento geral do método. Informações mais detalhadas, com as devidas formulações incorporadas e descrição completa do algoritmo, podem ser encontradas em Konak *et al.* (2006), Coello *et al.* (2007) e Fonseca (2003).

Figura 24 – Fluxograma geral do MOGA.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

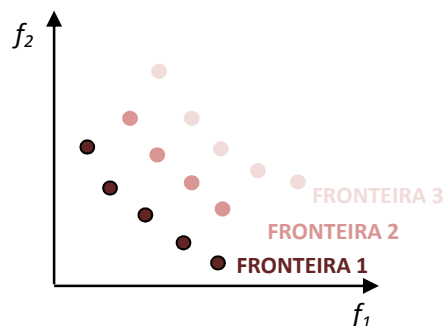
4.4.1.5 NSGA (*Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm*)

O método NSGA, proposto por Srinivas e Deb (1994), envolve critérios de avaliação de dominância e manutenção da diversidade da população simultaneamente. A estratégia aplicada por esse método, assim como o MOGA, utiliza um esquema de seleção baseada em um ordenamento para privilegiar as

soluções não dominadas correntes, juntamente com um método voltado para a criação de nichos para manter a diversidade da população. O NSGA difere do MOGA na maneira como classifica as soluções não dominadas e na forma como o compartilhamento é considerado para garantir a diversidade da população. Dessa forma, a diferença reside apenas na maneira como o método de seleção trabalha, uma vez que os operadores cruzamento e mutação permanecem idênticos.

Assim, antes do procedimento de seleção ser aplicado, os indivíduos (configurações) são classificados com base na avaliação do desempenho dos mesmos em termos da função objetivo. Os indivíduos eficientes, com bom desempenho, presentes na população corrente são então ordenados considerando o nível de não dominância dos indivíduos, formando frentes, ou fronteiras (Figura 25). Dessa forma, todas as soluções não dominadas da população corrente recebem valores altos de aptidão, sendo esse valor o mesmo para todos os indivíduos não dominados, de modo que tais indivíduos possuam um mesmo potencial reprodutivo.

Figura 25 – Representação da classificação dos indivíduos no NSGA (fronteiras).



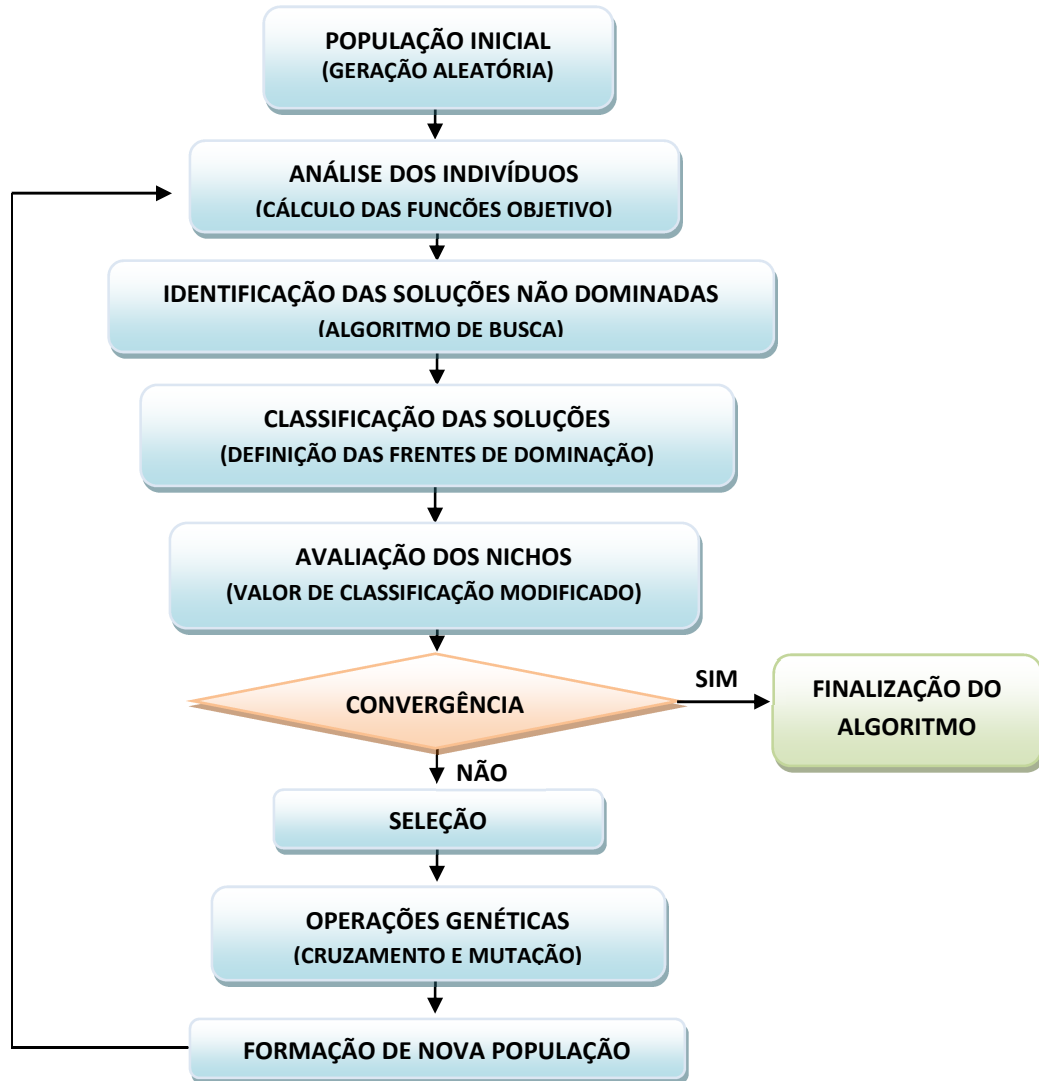
Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Como os indivíduos da primeira fronteira têm os maiores valores de *fitness*, eles serão selecionados mais vezes que o resto da população, o que privilegia a busca por indivíduos não dominados, de interesse do processo de otimização. Para manter a diversidade da população, o valor de *fitness* de cada indivíduo é ajustado utilizando os conceitos da técnica de compartilhamento (*fitness sharing*) nos nichos formados pelas fronteiras não dominadas já identificadas.

Com base nessa ordenação, os indivíduos melhor classificados são selecionados, passam pelo processo de cruzamento e mutação e formam a população da geração seguinte, que será então avaliada com os mesmos critérios

de classificação acima apresentados. Apresenta-se na Figura 26 o fluxograma geral do método NSGA.

Figura 26 – Fluxograma do método NSGA.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

4.4.1.6 NSGA-II (*ELITIST NON-DOMINATED SORTING GENETIC ALGORITHM*)

Com o objetivo de proporcionar mais eficiência ao método, Deb *et al.* (2002) propuseram a chamada segunda geração do método NSGA, denominado NSGA-II, incorporando o conceito de elitismo. A função desse operador consiste em preservar as melhores soluções da população corrente e incorporá-las, sem modificações, na

população posterior. Dessa forma, evita-se que essas soluções de bom desempenho sejam perdidas durante o processo de evolução.

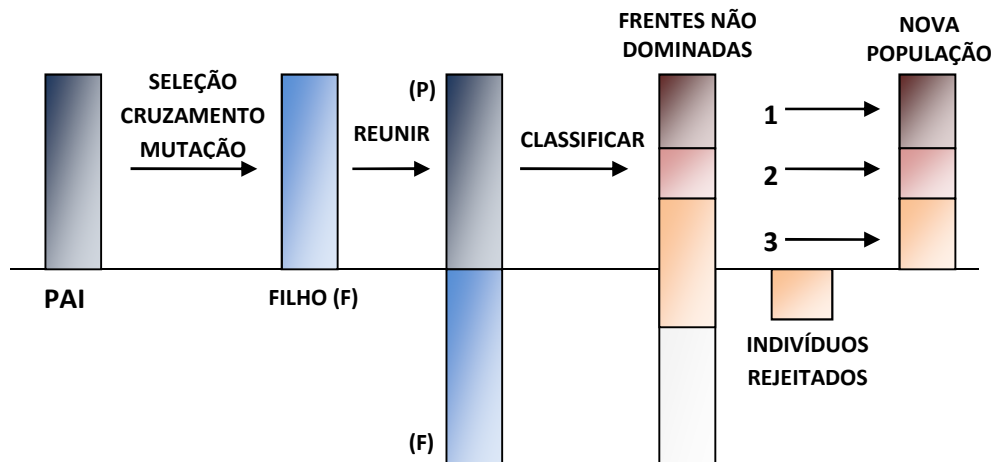
Na formulação dessa nova estratégia, os referidos autores consideraram ainda a necessidade de diminuir a complexidade computacional na classificação dos indivíduos. Dessa forma, passou-se a utilizar somente o conceito de soluções dominadas e não dominadas.

Para evitar a existência de nichos localizados e garantir a diversidade das soluções, foi também incorporada ao método a técnica de comparação de aglomeração (*crowding*). Essa consiste em um operador de comparação de aglomeração que prioriza os indivíduos menos aglomerados. Uma vez que os algoritmos multiobjetivos buscam encontrar o maior número possível de soluções que pertençam à frente de Pareto, é importante que a população se mantenha diversificada. Nesse sentido, a distância de aglomeração quantifica o espaço ao redor de uma determinada solução, sendo mais diversificadas as soluções que resultam na maior distância de aglomeração.

Para melhor entendimento do método, a seguir apresenta-se uma síntese dos procedimentos do método NSGA-II.

1. Geração da população inicial de tamanho n ;
2. Identificação das frentes de dominância e avaliação das distâncias de aglomeração em cada frente;
3. Aplicação dos operadores genéticos de cruzamento e mutação para geração de uma população de descendentes com o mesmo tamanho da população anterior;
4. Os indivíduos da população corrente (pais) e da população gerada (filhos) são reunidos em um conjunto de tamanho $2n$ e mais uma vez classificados em frentes de dominância;
5. A nova população é então formada selecionando as frentes com melhor grau de dominância. Caso o limite tamanho da população (n) seja ultrapassado, as soluções com menor distância de aglomeração na última frente selecionada são eliminadas (Figura 27);
6. Avalia-se o critério de convergência e caso o mesmo seja atingido o processo é finalizado. Caso contrário, retorna-se à etapa 3 da sequência aqui descrita.

Figura 27 – Esquema do procedimento evolutivo do NSGA-II.



Fonte: Adaptada de Deb (2001)

Dada a eficiência proporcionada pelo método NSGA-II e com base em aplicações bem sucedidas desse método na literatura (Andrade *et al.*, 2010; Oliveira, 2008), o mesmo é utilizado neste trabalho para otimização do projeto preliminar de *risers* verticais complacentes, aplicação apresentada no Capítulo 6.

5 RISER VERTICAL COMPLACENTE (CVAR)

A configuração CVAR consiste em uma alternativa relativamente recente para a exploração de petróleo em águas profundas, como é o caso dos campos do pré-sal. Esse tipo de configuração ainda não foi instalado e usado na prática de exploração de petróleo e gás, mas alguns estudos já foram desenvolvidos que comprovam sua viabilidade técnica e econômica. A concepção dessa configuração foi proposta por Pearce *et al.* (1988), que patentearam a ideia de um arranjo de riser flexível associado a equipamentos capazes de viabilizar acesso vertical ao poço de produção. Ishida *et al.* (2001) estudaram a aplicação da configuração CVAR acoplada a um FPSO, demonstrando a viabilidade da configuração e ainda a possibilidade de utilizá-lo com completação seca nesse tipo de embarcação. A mesma avaliação foi feita por Mungall *et al.* (2004), Brinkmann e Whooley (2002) e Bhat *et al.* (2006). Esses estudos consideraram o uso do CVAR em plataformas semi-submersíveis, DDCV (*Deep Draft Caisson Vessel*), FPU's (*Floating Production Unit*) e FPSO's em profundidades de 1.500 m a 3.000 m no Golfo do México e, para os casos analisados, comprovaram a viabilidade técnica do CVAR para uso também em completação seca, o que torna essa nova configuração bastante atrativa economicamente. No caso de sistemas com completação seca, os equipamentos submarinos e o conjunto de válvulas que controlam a produção do poço são mais simples e de fácil manutenção, assim como o acesso ao poço.

Grant *et al.* (1999 e 2000) realizaram análises e testes em larga escala do CVAR em uma profundidade de aproximadamente 240 m com o objetivo de aperfeiçoar e verificar os métodos de análise de riser rígidos complacentes, comparando os resultados das simulações em softwares de engenharia específicos com os resultados dos experimentos físicos realizados. Os modelos avaliados demonstraram a grande influência e importância da consideração do efeito de vibrações induzidas por vórtices para a resposta global do riser.

Uma importante contribuição sobre o dimensionamento e comportamento estrutural de risers verticais complacentes foi feita também por Granherne (2009), que apresenta um estudo completo sobre essa nova configuração, abordando o desenvolvimento conceitual do CVAR, detalhes da análise e simulação realizadas e ainda a avaliação dos riscos associados a sua instalação e condições de operação.

5.1 DESCRIÇÃO GERAL

O *riser* vertical complacente aqui estudado consiste em um *riser* rígido com uma geometria diferenciada, obtida pela disposição de módulos de flutuadores e de peso adicional, nas extremidades inferior e superior do duto, respectivamente. A utilização desses módulos garante que as extremidades do *riser* permaneçam predominantemente verticais, permitindo acesso direto ao poço. Além disso, os flutuadores impõem uma tração na seção inferior suficientemente elevada para garantir a ausência de elevadas curvaturas e, conseqüentemente, tensões excessivas na base do *riser*.

A geometria do sistema permite também procedimentos de intervenção direta no poço, viabilizando as operações de *workover* direto da plataforma de produção. Essa facilidade dispensa a contratação de unidades específicas para esse tipo de serviço, tornando o *riser* em estudo atrativo também economicamente.

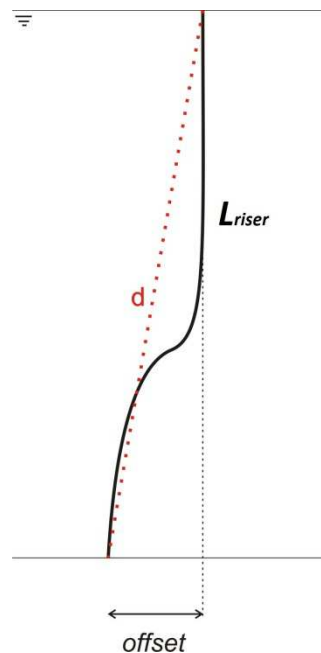
A complacência característica do *riser* é obtida por uma diferença de cota horizontal entre as conexões de topo e base, denominado *offset* horizontal, juntamente com a adoção de um excesso de comprimento de *riser*, denominado *overlength*, que consiste em um comprimento de *riser* além da distância em linha reta entre os pontos de conexão com a plataforma e com o poço. Outro parâmetro associado à complacência do *riser* é o *overlength fraction*, que é definido como a razão entre o *overlength* e a distância entre o topo e a base, ou seja,

$$OF = \frac{L_{riser} - d}{d} \quad (20)$$

onde *OF* é o *overlength fraction*, L_{riser} é o comprimento total do *riser* e *d* é a distância entre o topo e a base (Figura 28).

Esse parâmetro define o grau de complacência do CVAR. Para um alto valor de *OF* o *riser* apresenta uma maior capacidade de manter as tensões extremas dentro dos limites, para unidades flutuantes com maior movimento, como é o caso dos navios, pois o excesso de comprimento do duto é capaz de absorver o movimento da plataforma sem causar grandes esforços de tração.

Figura 28 – Configuração CVAR com destaque nas variáveis de cálculo do *overlength fraction*.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Cabe ressaltar que o *overlength fraction* varia de acordo com o *offset* estático da plataforma. Nesse sentido, a posição relativa *far*¹ da FPU é a crítica para a resposta extrema do *riser*, uma vez que o *OF* sobre o comprimento é menor para esta posição. Por outro lado, um alto valor de *OF* torna crítica a resposta extrema do *riser* na posição relativa *near*², visto que para essa posição um elevado comprimento do duto provoca elevadas curvaturas na região flutuante intermediária do mesmo, gerando elevados momentos de flexão e conseqüentemente elevadas tensões nessa região. Dessa forma, a complacência do sistema se revela como um dos mais relevantes parâmetros de dimensionamento da estrutura; é preciso dimensionar o comprimento do *riser* de modo que o mesmo seja longo o suficiente para evitar elevado esforço de tração e atender ao critério de tensão no topo na condição *far* sem gerar grandes curvaturas quando em *near*. O comprimento da estrutura é limitado ainda pelo critério de interferência entre *risers* e desses com as linhas de ancoragem, entretanto esse aspecto não é abordado neste trabalho.

¹ Movimento relativo de afastamento entre a plataforma e o *riser*.

² Movimento relativo de aproximação entre a plataforma e o *riser*.

A existência do *offset* horizontal em conjunto com a utilização de flutuadores e revestimento pesado na região intermediária do *riser* gera uma região central flutuante quase-neutra, perto de um ponto de inflexão que tende a isolar os movimentos da região superior do *riser* dos movimentos da região inferior. Uma característica fundamental proporcionada por esse sistema é a atenuação da dinâmica da linha.

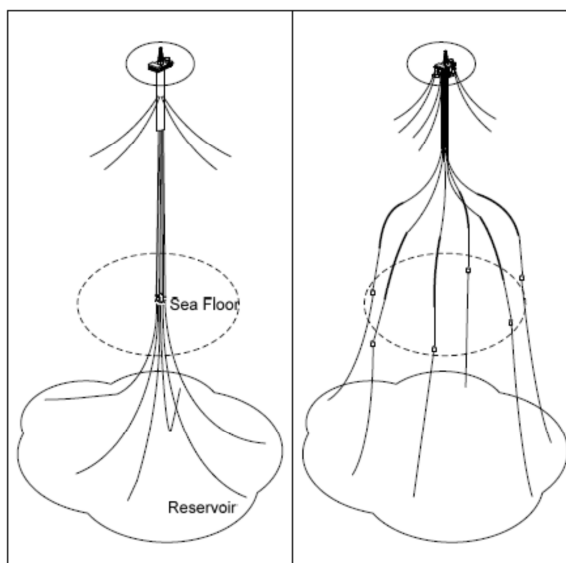
Alguns estudos já realizados a respeito dessa nova concepção de *riser* indicam uma faixa para a determinação da distância do *offset* horizontal do poço. Bhat *et al.* (2006) afirmam que essa distância entre o poço e o ponto de conexão do *riser* com o flutuante pode ser dimensionada entre um intervalo de 10% a 100% da profundidade. Granherne (2009), define esse intervalo viável para o *offset* horizontal do poço em até 50% da lâmina d'água.

Em função da existência desse distanciamento entre o topo e a base do *riser* e dada à geometria complacente do mesmo, o sistema CVAR permite que os poços de exploração sejam alocados a uma distância considerável da plataforma. Portanto, a configuração de *riser* em estudo permite o acesso vertical direto a poços localizados em grandes distâncias. Os *risers* verticais rígidos, que também permitem esse acesso vertical ao poço e a viabilidade da completação seca, têm esse acesso ao poço limitado a pequenas distâncias. A Figura 29 ilustra a diferença entre o acesso vertical ao poço por *risers* verticais rígidos e *risers* verticais complacentes.

5.2 COMPONENTES DO RISER

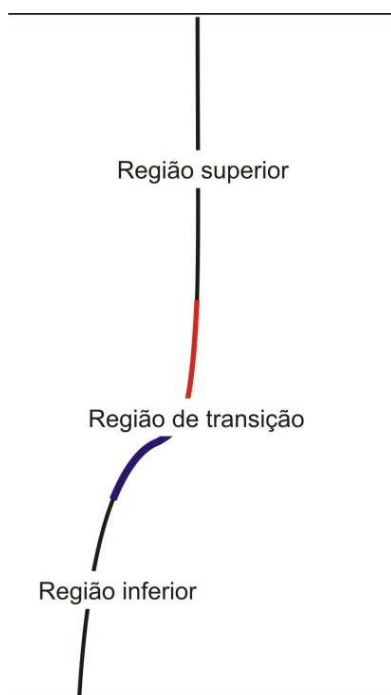
O CVAR é composto basicamente por três diferentes regiões: superior, de transição (intermediária) e inferior (Figura 30). Toda a extensão do *riser* deve possuir uma camada de revestimento térmico, de modo a reduzir a taxa de transferência de calor entre um sistema e o meio. As regiões superior e inferior são compostas apenas por *riser* com revestimento térmico, sendo a região de transição composta por um trecho de *riser* com revestimento pesado e outro trecho de *riser* com flutuadores acoplados.

Figura 29 – Acesso vertical por meio de (a) *risers* verticais rígidos e (b) *risers* verticais complacentes.



Fonte: Granherne (2009)

Figura 30 – Seções características do CVAR.

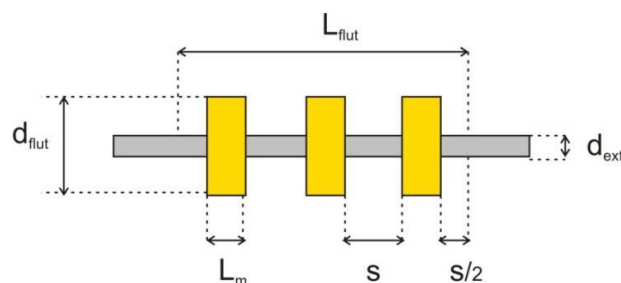


Fonte: Autor desta dissertação (2011)

O flutuador é montado sobre o *riser* em módulos, conforme representado na Figura 31, onde L_{flut} é o comprimento total do trecho de flutuador, d_{flut} é o diâmetro de cada módulo de flutuador, d_{ext} é o diâmetro externo do *riser*, L_m é o comprimento de cada módulo de flutuador e s é o espaçamento entre os módulos.

Cada módulo do flutuador é caracterizado por seu diâmetro e comprimento, estando os módulos, em geral, igualmente espaçados. Cabe ressaltar que os flutuadores têm apenas determinados diâmetros disponíveis comercialmente. O mesmo acontece com o comprimento de cada módulo de flutuação. Dessa forma, o dimensionamento desses elementos deve ser limitado aos valores pré-determinados, caracterizando tais informações como variáveis discretas. Já o espaçamento entre os módulos é definido pelo projetista e pode ser qualquer valor, sendo representado por uma variável contínua. Existe uma grande diversidade de materiais constituintes dos módulos de flutuador, sendo mais comum o uso de espumas sintéticas, que apresentam características favoráveis, como grande resistência ao impacto, pequena perda de flutuação causada pela absorção de água e manutenção da capacidade de flutuação, em caso de furos.

Figura 31 – Segmento de *riser* com flutuador.



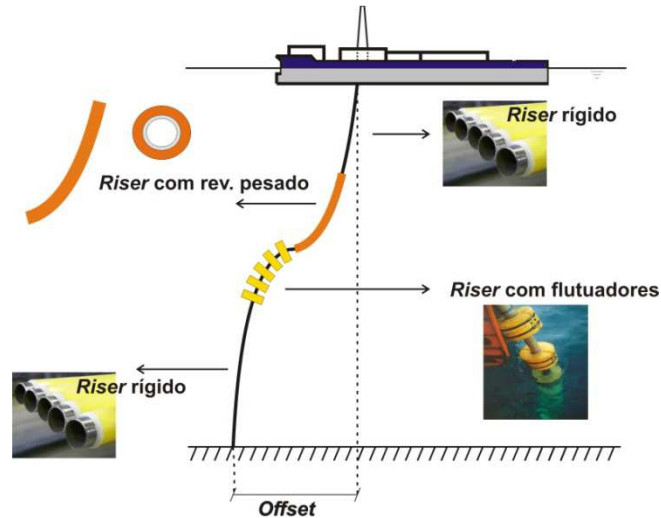
Fonte: Autor desta dissertação (2011)

O peso adicional, posicionado na região superior do *riser*, consiste no segmento de *riser* com revestimento pesado contínuo, cujo peso específico é maior que o do aço. Como exemplo do material empregado, Granherne (2009) utilizou um revestimento de borracha desenvolvido pela Trelleborg Viking AS, com densidade equivalente a 3 t/m^3 (Trelleborg Engineered Systems *apud* Granherne, 2009).

Apresenta-se na Figura 32 um esquema ilustrativo da composição característica da configuração CVAR. A Figura 33 ilustra as seções transversais dos diferentes trechos que compõem o CVAR, destacando os componentes característicos em cada um. Nessa figura, e_{term} é a espessura do revestimento

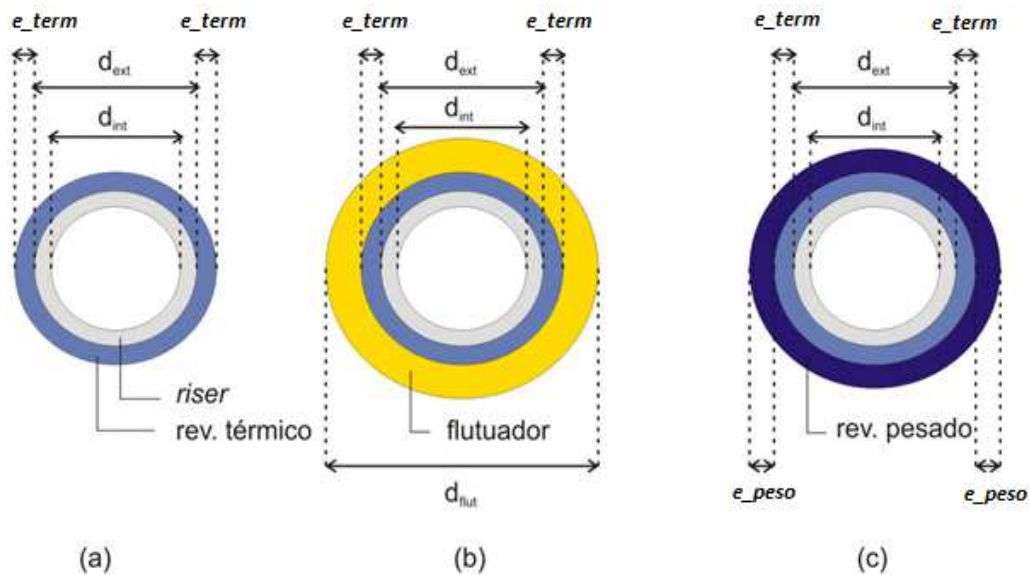
térmico, e_{peso} é a espessura do revestimento pesado e d_{int} é o diâmetro interno do riser.

Figura 32 – Componentes característicos da configuração CVAR.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Figura 33 – Seções transversais dos trechos que compõem o CVAR: (a) riser com revestimento térmico, (b) com flutuadores e (c) com revestimento pesado.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Os pontos de conexão do riser com a plataforma e com a cabeça do poço geralmente são críticos quanto aos valores de tensão. Esse comportamento na conexão de topo ocorre porque essa é a região que suporta todo o peso suspenso

do *riser*, estando sujeita a elevados esforços de tração. Elevados valores de tensão também são verificados na conexão de base, considerada engastada, devido à tração aplicada pelos flutuadores e pela curvatura apresentada nessa região quando o sistema se encontra na posição *far*. Uma alternativa para melhorar esse comportamento é a utilização de juntas enrijecedora especiais, denominadas *stress-joints*. Essas juntas possuem seção tronco-cônica com espessura maior junto ao equipamento e espessura normal junto ao primeiro conector, com diâmetro externo igual ao *riser*. O objetivo de uma *stress-joint* é suportar os elevados esforços axiais e de flexão gerados pela conexão do *riser* com a plataforma ou com qualquer outra estrutura mais rígida que o próprio *riser*, por meio deste elemento com momento de inércia maior. Quanto ao material constituinte, as *stress-joints* podem ser de aço, mesmo material do *riser*, ou de titânio, capaz de proporcionar maior resistência, possuindo uma tensão de escoamento mais alta e maior vida útil à fadiga.

5.3 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

Apresenta-se nesta seção a descrição do problema de otimização a ser estudado. São aqui definidas as variáveis de projeto, funções objetivo e restrições.

5.3.1 VARIÁVEIS DE PROJETO

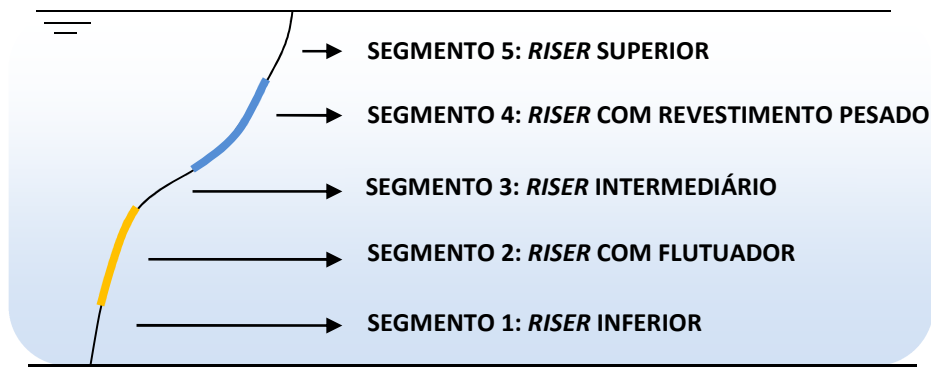
A caracterização de um problema de otimização tem início pela definição das variáveis de projeto. Essas variáveis representam os graus de liberdade do problema e tanto a função objetivo quanto as restrições devem ser escritas em função delas.

Quanto maior o número de variáveis de projeto envolvidas no dimensionamento, mais complexo se torna o problema de otimização. Por outro lado, a não consideração de variáveis significativas pode prejudicar a solução do problema, pois a falta de variáveis restringe o espaço de busca, podendo excluir soluções viáveis que, eventualmente, podem determinar a solução ótima. Dessa forma, é necessário avaliar cuidadosamente as variáveis de projeto, selecionando apenas as mais representativas.

Com base nas características do modelo de *riser* em estudo, considera-se que o mesmo é formado por uma sucessão de cinco segmentos de propriedades constantes, sendo eles: segmento inferior, segmento com flutuador, segmento

intermediário, segmento com revestimento pesado e segmento superior (Figura 34). Para definir cada um desses trechos específicos do *riser* é necessário determinar suas características geométricas, como comprimento, espessura e diâmetro externo.

Figura 34 – Composição do *riser* em segmentos.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

O dimensionamento do diâmetro interno de um *riser* é usualmente feito em função das condições de prospecção específicas de cada poço, sendo levado em conta o fluxo necessário, a queda de pressão admissível e a composição da mistura encontrada no campo em que o *riser* será instalado. Trata-se de um problema complexo, pois envolve escoamento multifásico (óleo, gás, areia) em elevado gradiente de temperatura (Tanaka, 2009). Dessa forma, o dimensionamento do diâmetro interno requer uma análise detalhada e complexa, que se encontra fora do escopo deste trabalho. Por essa razão, no presente trabalho o diâmetro interno é considerado constante e pré-determinado.

O diâmetro externo do *riser* também consiste em uma variável de projeto, influenciando diretamente na resistência e no peso da estrutura. Visto que existem disponíveis comercialmente apenas determinados diâmetros de *riser*, essa variável deve ser tratada como discreta, cujos valores devem ser obtidos através de catálogos dos fabricantes.

Além das variáveis que caracterizam geometricamente cada trecho do *riser* existem outras duas variáveis que definem a geometria característica dessa configuração: o *offset* horizontal do poço e o comprimento total do *riser*, que pode ser representado pelo *overlength fraction*.

Em resumo, é possível representar globalmente uma configuração CVAR, a partir da definição dos seguintes parâmetros:

- *overlength fraction (OF)*;
- comprimento total do flutuador (L_{flut});
- diâmetro do flutuador (d_{flut});
- comprimento do revestimento pesado (L_{peso});
- espessura do revestimento pesado (e_{peso});
- comprimento do trecho de *riser* inferior (L_{inf});
- comprimento do trecho de *riser* superior (L_{sup});
- *offset* do poço (*offset*).

Algumas análises prévias da configuração CVAR foram realizadas, o que permitiu a constatação de algumas primeiras observações acerca do comportamento do mesmo. Inicialmente verificou-se que, a depender do comprimento total do *riser*, do volume de flutuadores e de peso adicional utilizados, as tensões máximas ocorrem predominantemente nas extremidades da linha (topo e base). Em função dessa característica opta-se por considerar também como variáveis de projeto os comprimentos das *stress-joints* de topo e de base, uma vez que estes elementos promovem uma maior resistência às tensões extremas.

Outro ponto observado é a redução das tensões e aumento do raio de curvatura na região intermediária do *riser* a partir da utilização de uma gradação do diâmetro dos flutuadores, ou seja, da utilização de uma sequência de trechos de flutuadores com diâmetros diferentes (decrecentes no sentido base-topo) ao invés de considerá-lo constante ao longo de todo o trecho. No estudo aqui apresentado opta-se pela utilização de cinco trechos de flutuadores com diâmetros diferentes. Esta quantidade foi definida apenas a título de exemplificação, podendo-se adotar uma quantidade maior ou menor.

Assim, para o estudo aqui desenvolvido são consideradas as seguintes variáveis de projeto:

1. comprimento da *stress-joint* de base (L_{TSJ_base});
2. comprimento da *stress-joint* de topo (L_{TSJ_topo});
3. proporção do trecho de *riser* inferior ($liso_inf$);
4. proporção do trecho total com flutuadores ($flut_tot$);
5. diâmetro do maior flutuador (d_{flut1});

6. proporção do trecho de *riser* com revestimento pesado (*peso*);
7. espessura do revestimento pesado (*e_peso*);
8. *overlength fraction* (*OF*);
9. *offset* horizontal do poço (proporção em relação à lâmina d'água) (*pOffset*);
10. proporção do trecho de *riser* superior (*liso_sup*);
11. diâmetro externo do *riser* (*dext*).

A título de simplificação algumas considerações são assumidas em relação à definição dos parâmetros geométricos do modelo da configuração CVAR a serem utilizados no estudo de otimização:

- são consideradas fixas as proporções de cada um dos cinco trechos de flutuadores em relação ao comprimento total de flutuador, definido pela variável 4 (proporção do trecho total com flutuadores);
- o diâmetro dos três trechos de flutuadores intermediários são definidos proporcionalmente em função dos flutuadores de maior e menor diâmetro. O diâmetro do menor flutuador é fixo, sendo igual ao limite inferior do intervalo de variação definido para a variável 5. Assim, para cada configuração analisada, o diâmetro dos flutuadores intermediários é definido de modo que haja uma gradação linear variando do maior para o menor diâmetro;
- a espessura maior da *stress-joint* é considerada fixa, variando-se apenas o comprimento da mesma.

5.3.2 FUNÇÃO OBJETIVO

A função objetivo é determinante sobre os resultados da otimização, uma vez que a mesma representa a medida de eficiência que se deseja extremizar. A maior parte dos estudos já desenvolvidos sobre a otimização do dimensionamento de *risers* rígidos utiliza o custo do material como função de mérito a ser minimizada, a exemplo de Rodrigues (2004), Vieira (2008), Vieira (2009), Yang e Zheng (2011) e Pina *et al.* (2011). Nesses trabalhos, o custo é minimizado a partir da minimização do volume de material utilizado.

No entanto, a composição de custos de uma configuração de *risers* não é facilmente representada, vai além da quantidade de material utilizada, devendo

também contemplar várias fases como: transporte, lançamento e instalação, operação e manutenção. Tanaka (2009) ressalta que, como a expectativa de vida útil de um *riser* é normalmente de cerca de 20 anos, estes custos de manutenção e operação, que se dão ao longo de sua vida, tendem a ser maiores que a parcela devida ao preço do material e da instalação, que é despendida antes do início da produção comercial. Além disso, a otimização com base em uma função objetivo de custo tende a levar apenas a soluções com o mínimo comprimento de *riser* capaz de satisfazer as restrições impostas. Tanaka (2009) propõe então a utilização de um critério de desempenho estrutural como função objetivo, a partir da minimização da máxima amplitude de tensão combinada, calculada ao longo do *riser*, dentre todos os casos dinâmicos. Por outro lado, a redução da quantidade de flutuadores contribui no sentido de facilitar o procedimento de instalação do *riser*, sendo nesse sentido desejável a busca por configurações que sejam viáveis e necessitem do menor volume de flutuador possível.

Predominantemente, os trabalhos existentes na literatura sobre a otimização de *risers* utilizam como estratégia uma avaliação mono-objetivo, a partir da extremização de apenas uma medida de eficiência de interesse. Em geral, sistemas complexos, como os *risers*, envolvem uma série de parâmetros que se deseja otimizar, e.g. minimizar custos, minimizar fadiga, minimizar esforços, minimizar deslocamentos, maximizar características específicas de desempenho operacional. Dessa forma, torna-se adequada a aplicação de uma metodologia de otimização multiobjetivo, capaz de considerar simultaneamente as diferentes medidas objetivas de eficiência desejadas.

O presente trabalho avalia o problema de otimização da configuração CVAR em três diferentes frentes, com o objetivo de avaliar os resultados obtidos em cada uma.

(I) função mono-objetivo baseada na minimização de material

Nesta abordagem, busca-se minimizar o volume de material utilizado na composição da configuração CVAR. Dadas às características de tal configuração, o volume total tem a contribuição de três parcelas: volume total do flutuador (V_{flut}), volume do revestimento pesado (V_{peso}) e volume total do *riser* (V_{riser}), uma vez que o comprimento e diâmetro são considerados como variáveis. Logo, tem-se

$$f_{obj_I} = V_{flut} + V_{peso} + V_{riser} \quad (21)$$

Para melhorar o desempenho do método e evitar problemas de escala, a função objetivo é normalizada pelo volume máximo de flutuador, considerando que o mesmo se estende ao longo de todo o *riser*. Assim, a Eq. 21 torna-se

$$f_{obj_I} = \frac{V_{flut} + V_{peso} + V_{riser}}{L_{riser}(d_{flut}^2 - d_{ext}^2)} \quad (22)$$

onde d_{flut} corresponde ao diâmetro do maior flutuador, d_{ext} corresponde ao diâmetro externo do *riser* e L_{riser} é o comprimento total do *riser*, calculado em função da variável *overlength fraction (OF)* como

$$L_{riser} = (1 + OF)d \quad (23)$$

sendo d a distância em linha reta entre as conexões de topo e base do *riser*.

O problema de otimização é então descrito como

$$\text{achar arg min } f_{obj_I}(x) \quad (24)$$

onde x representa o vetor das variáveis de projeto.

(II) função mono-objetivo baseada em critério estrutural:

Nesta avaliação o problema de otimização é solucionado a partir da maximização do menor fator de utilização de tensão calculado ao longo de todo o *riser*, no intuito de proporcionar o maior aproveitamento do material, sem infringir as restrições de máxima tensão.

A função objetivo a ser maximizada pode então ser escrita como

$$f_{obj_II} = \min \left(\frac{\sigma_{serv}}{\sigma_{adm}} \right) \quad (25)$$

onde σ_{serv} corresponde à tensão de serviço e σ_{adm} corresponde à tensão admissível do material, que pode variar a depender da região onde está sendo calculada a tensão. Caso a tensão seja referente a *stress-joint*, considera-se a tensão admissível do titânio, caso a tensão seja referente ao *riser*, considera-se a tensão admissível do aço.

Neste caso, o problema de otimização é descrito como

$$\text{achar arg max } f_{obj_II}(x) \quad (26)$$

Essa abordagem da função objetivo é também conhecida como técnica de saturação de tensões (*fully stressed design*), técnica bastante utilizada na

otimização estrutural (Haftka e Gürdal, 1992; Hinton e Sienz, 1995; Mueller *et al.*, 2002).

(III) função multiobjetivo:

Nesta abordagem, os dois critérios avaliados isoladamente nos itens anteriores (I e II) são combinados, em uma análise multiobjetivo. Busca-se então minimizar o volume de material e maximizar o menor fator de utilização de tensão ao longo de todo o *riser*, ou seja,

$$f_{obj_III} = [f_{obj_I} , -f_{obj_II}] \quad (27)$$

Neste caso, o problema de otimização é descrito como

$$\text{achar } \arg \min f_{obj_III}(x) \quad (28)$$

Vale ressaltar que outras funções objetivo podem ser utilizadas para o dimensionamento do *riser*, como, por exemplo, um critério de fadiga ou outro definido pela experiência do projetista, desde que represente adequadamente o modelo e o parâmetro que se deseja otimizar.

5.3.3 RESTRIÇÕES

As restrições têm por objetivo garantir que o resultado final do processo de otimização seja uma solução viável, obedecendo às limitações impostas. A partir da consideração de tais limitações, algumas soluções que não obedecem às leis da física ou critérios de engenharia específicos são eliminadas, mesmo que matematicamente corretas. Assim como a função objetivo, as restrições devem ser definidas em função das variáveis de projeto, ainda que de forma implícita.

No presente trabalho as restrições consideradas se baseiam em critérios estruturais e de operação do sistema. Como critérios estruturais são avaliadas a máxima tensão e a mínima tração efetiva ao longo do *riser*. Como critério de operação avalia-se o raio de curvatura mínimo. Essa verificação é feita de modo a garantir a operação de *workover*, enquanto os critérios estruturais garantem a integridade do *riser*.

Para cada conjunto de variáveis avaliado no processo de otimização, são realizadas simulações dinâmicas no programa Anflex (Anflex, 2009). Os valores das respostas de interesse (tensão, tração efetiva e raio de curvatura) obtidos são então

comparados com os valores limites definidos pelas restrições, avaliando dessa forma a viabilidade da configuração em questão.

5.3.3.1 MÁXIMA TENSÃO DE VON MISES

Segundo este critério a máxima tensão ao longo de todo o *riser*, obtida a partir da simulação dinâmica nas paredes interna e externa, não deve ultrapassar 80% da tensão de escoamento do aço para as análises extremas (com estado de mar centenário). Para as análises em condições de operação (com estados de mar anuais) essa tensão admissível a ser respeitada é de 67% da tensão de escoamento do aço.

5.3.3.2 TRAÇÃO EFETIVA

Quanto à verificação da tração efetiva, devem ser evitados valores muito baixos para que não ocorra compressão no *riser*, uma situação altamente indesejável uma vez que favorece a flambagem do duto. Dessa forma, impõe-se que a tração efetiva deve ser sempre positiva ao longo de todo o *riser*, ou seja

$$FX > 0 \quad (29)$$

Onde FX é a tração efetiva no duto.

5.3.3.3 RAIOS DE CURVATURA

A limitação de um raio mínimo de curvatura garante a viabilidade dos procedimentos operacionais e de *workover*. Ishida (2001) assume um valor limite de 90 m para o raio de curvatura mínimo. Esse valor de referência é adotado no presente trabalho, mas vale ressaltar que o mesmo pode variar a depender do diâmetro interno do *riser* e das dimensões dos equipamentos utilizados para a operação de *workover*. Ressalta-se que tal restrição se aplica apenas a condição de operação do sistema, correspondendo às simulações dinâmicas de estados de mar com período de retorno anual.

5.4 COMENTÁRIOS GERAIS

Para o cálculo da função objetivo e das restrições envolvidas no problema de otimização descrito neste capítulo é requerida a simulação tanto estática quanto

dinâmica de diversas condições ambientais, tanto extremas (centenárias) quanto de operação (anuais). Cada simulação a ser avaliada consiste um problema complexo, envolvendo análises estáticas e dinâmicas não lineares e no domínio do tempo. Dessa forma, tanto a função objetivo quanto as restrições são de difícil cálculo, e estão sujeitas à convergência de algoritmos numéricos, sendo, portanto computacionalmente onerosas. Adicionalmente, as restrições impostas tendem a eliminar parte das soluções, reduzindo significativamente o domínio viável e tornando-o descontínuo.

Dessa forma, ressalta-se a complexidade de solução do problema aqui abordado, salientado novamente a importância da adequada seleção do algoritmo de otimização a ser utilizado, da definição da função objetivo e restrições e correta caracterização das variáveis envolvidas.

6 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Apresenta-se neste capítulo um exemplo de aplicação da metodologia de otimização na definição da configuração ótima de *risers* verticais complacentes. Os resultados obtidos são avaliados tanto em relação às análises de otimização quanto ao comportamento estrutural do CVAR para as diferentes situações analisadas.

Inicialmente, no intuito de obter uma melhor compreensão do comportamento do *riser* em relação às respostas de interesse, é feita uma análise de sensibilidade da estrutura em função de suas variáveis de projeto características. Por meio de tal análise, é possível identificar quais variáveis de projeto são mais representativas para o dimensionamento do *riser* e inferir alguns aspectos gerais relacionados ao comportamento e características da estrutura. Neste estudo são avaliadas as seguintes respostas de interesse: as máximas tensões combinadas de von Mises, a mínima tração efetiva e o menor raio de curvatura ao longo de todo o *riser*. A formulação do problema de otimização utilizado neste exemplo encontra-se descrita no Capítulo 5.

Uma característica importante acerca do problema aqui tratado é que o mesmo consiste em um problema de otimização via simulação, associado a um considerável esforço computacional, uma vez que para cada configuração analisada durante o processo se faz necessária a simulação estática e dinâmica do *riser*. No intuito de melhorar o desempenho da solução do problema, todo o processo de análise de otimização foi realizado no cluster computacional do Laboratório de Computação Científica e Visualização (LCCV), da Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Esse consiste em um dos clusters que compõem a GradeBR, projeto de uma rede de HPC (*High Performance Computing* – Computação de Alta Performance) composta por cinco sistemas de processamento numérico. Esses sistemas fazem parte da Rede Temática de Computação Científica e Visualização (Rede Galileu), idealizada pela Petrobras em parceria com cinco universidades brasileiras (UFAL, USP, PUC-Rio, COPPE/UFRJ e ITA), nas quais esses sistemas estão instalados. O cluster instalado no LCCV/UFAL conta com 172 nós, com 2 processadores por nó e 4 cores por processador, totalizando 1.376 cores Intel Nehalem de 2.8 GHz. O cluster possui ainda um processamento numérico de 20 teraflops, um processamento gráfico de uso geral de 32 teraflops, uma rede de

interconexão de 40 gigabits por segundo e um sistema de arquivos paralelo de 50 terabytes. A utilização do cluster promoveu um ganho expressivo na eficiência do processo de otimização em termos de tempo de análise, uma vez que possibilitou a simulação em paralelo de diferentes configurações ao longo do processo.

Conforme mencionado anteriormente, para o desenvolvimento deste estudo são utilizados dois programas computacionais específicos. Para as simulações estática e dinâmica do *riser* é utilizado o programa de análise de linhas de ancoragem e *risers* Anflex (Anflex, 2009), desenvolvido pela Petrobras. As análises de otimização são realizadas com auxílio do programa modeFRONTIER® (modeFRONTIER, 2011), que consiste em um programa de otimização multidisciplinar no qual estão incorporados diversos métodos de otimização e que também permite o acoplamento com outros programas, a exemplo do Anflex. O modeFRONTIER® vem sendo utilizado com sucesso em diversos trabalhos nas mais diferentes áreas: otimização de radiadores espaciais (Cuco *et al.*, 2011), desenvolvimento de processos químicos (Spogis, 2007), processo de produção de biodiesel (Nicola *et al.*, 2010). Particularmente na área *offshore*, já foram desenvolvidas análises de otimização com o modeFRONTIER® para otimização de plataformas de petróleo (Oliveira, 2008), otimização de *risers* em configuração *lazy-wave* (Andrade *et al.* 2010), otimização de sistemas de isolamento térmico de dutos (Silva, 2008).

6.1 DESCRIÇÃO DO MODELO

A estrutura avaliada consiste em um *riser* rígido de aço em configuração vertical complacente. Assume-se que o *riser* encontra-se instalado em uma lâmina d'água de 2.200 m e conectado ao ponto central inferior de uma monocoluna. O azimute da linha é definido equivalente a 135° (SW). Os dados referentes à geometria e propriedades físicas do *riser* encontram-se resumidos na Tabela 6 e Tabela 7.

Toda a extensão do *riser* possui um revestimento térmico com espessura de 0,051 m e peso específico equivalente a 7 kN/m³. Para a realização das análises estáticas e dinâmicas do *riser*, o mesmo é modelado no programa ANFLEX (2009). Tal modelo é montado com nove segmentos do tipo *rigid tube* e dois do tipo *stress joint* (no topo e na base) (Tabela 6). O elemento *rigid tube* representa um trecho de

riser rígido cujas propriedades são calculadas considerando-se uma seção transversal constante com forma de anel circular. A *stress joint* é um segmento utilizado para modelar trechos de inércia variável. A seção transversal da junta é um anel circular em que o diâmetro interno é constante e o externo varia linearmente ao longo do comprimento.

Tabela 6 – Trechos que compõem o riser.

Trecho	Material
1	<i>Stress Joint</i> (base)
2	<i>Riser liso inferior</i>
3	<i>Riser com flutuador</i> (1)
4	<i>Riser com flutuador</i> (2)
5	<i>Riser com flutuador</i> (3)
6	<i>Riser com flutuador</i> (4)
7	<i>Riser com flutuador</i> (5)
8	<i>Riser liso intermediário</i>
9	<i>Riser com revestimento pesado</i>
10	<i>Riser liso superior</i>
11	<i>Stress Joint</i> (topo)

Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Os *riser* analisados numericamente são modelados utilizando elementos de viga com doze graus de liberdade (três forças e três momentos para cada nó), correspondendo as forças internas do elemento. Na discretização da linha para análise, cada trecho da Tabela 6 corresponde a um segmento diferente e cada segmento é subdividido em elementos com 1 m de comprimento. A análise numérica no Anflex considera regime de grandes deslocamentos e pequenas deformações.

Para avaliar o comportamento do *riser* em diferentes condições de operação, o mesmo é simulado considerando-se três diferentes situações: *riser* com fluido interno de produção, *riser* com água e *riser* vazio.

Conforme descrito no Capítulo 5, no modelo em estudo considera-se que o segmento característico com flutuador é composto por módulos com diâmetros diferentes, sendo o diâmetro do primeiro trecho de flutuador maior comparado aos demais e o diâmetro dos demais flutuadores segue decrescendo em relação ao imediatamente anterior. Essa mudança gradual de diâmetro proporciona uma atenuação na curvatura formada na região intermediária, característica da

configuração do *riser* em análise. Os trechos com flutuador são compostos por módulos igualmente espaçados ($s = 0,5$ m) e com diâmetro igual ao comprimento.

Tabela 7 – Propriedades do riser.

Diâmetro interno (m)	0,27
Espessura (m)	0,022
Módulo de elasticidade do aço (kN/m^2)	2,07e+008
Peso específico do aço (kN/m^3)	77,00
Tensão de escoamento do aço (kN/m^2)	551580,56

Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Com relação às condições de contorno, a base do *riser* analisado encontra-se engastada em um ponto localizado no nível do solo marinho e o topo do mesmo, engastado na embarcação, possui deslocamentos e rotações prescritos em função do movimento da unidade flutuante. Considera-se que a conexão do *riser* com o flutuante é feita com a utilização de *stress-joint* de aço, enquanto a conexão da base é feita utilizando *stress-joint* de titânio, já que essa região é submetida a elevados esforços.

6.2 DESCRIÇÃO DO CENÁRIO AMBIENTAL

O *riser* avaliado encontra-se localizado a uma profundidade de 2.200 m. Os dados dos estados de mar considerados nas análises do *riser* em estudo são obtidos da I-ET-3A26.00-1000-941-PPC-001, documento disponibilizado pela Petrobras. A título de simplificação, as variáveis ambientais de onda e corrente são consideradas atuando de forma colinear nas direções relativas ao *riser* nas condições *near* e *far*. De acordo com análises realizadas previamente, essas foram as direções relativas críticas para o modelo.

O cenário ambiental extremo considerado é determinado pela atuação conjunta de onda centenária e corrente decenária. O mar considerado nas simulações sob condições de operação é determinado pela atuação conjunta de onda anual e corrente anual. Para as análises extremas realizadas é adotado um *offset* estático de 8,5% da lâmina d'água, ou seja, 187 m. Nas análises anuais esse *offset* estático é equivalente a 4,5% da lâmina d'água.

No intuito de reduzir o custo computacional demandado pela análise dos numerosos estados de mar característicos da locação considerada, um estudo prévio foi realizado de modo a identificar as condições de mar críticas para a estrutura analisada. Assim, no processo de otimização são avaliados apenas quatro estados de mar críticos referentes a condição centenária na condições *near*, centenária na condição *far*, anual na condição *near* e anual na condição *far*.

6.3 MODELAGEM DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

Nesta seção detalha-se a elaboração do modelo do problema de otimização em estudo no programa modeFRONTIER® (modeFRONTIER, 2011).

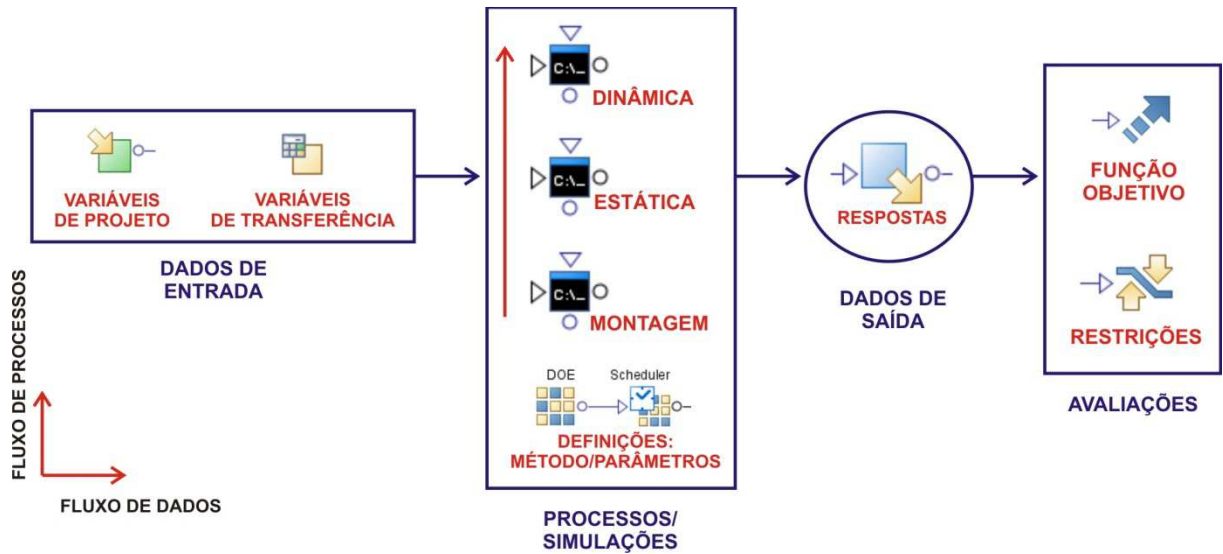
6.3.1 FLUXO DE OTIMIZAÇÃO (*WORKFLOW*)

O modelo de otimização definido possui dois fluxos principais, o fluxo de dados e o fluxo de processos. O fluxo de dados ocorre da esquerda para direita, tendo início na definição das variáveis de projeto, seguindo com o cálculo de variáveis de transferência necessárias para montagem do modelo de cada configuração a ser simulada. Após a simulação da configuração montada o fluxo de dados segue com a obtenção dos valores das respostas de interesse, verificação das restrições e, finalmente, a avaliação da função objetivo.

O fluxo de processo ocorre de baixo para cima, tendo início com a definição dos parâmetros de análise (definição do método a ser utilizado e respectivos parâmetros). Na sequência desse fluxo, tem-se início a análise do *riser* propriamente dita. Em uma primeira etapa é realizada a análise de montagem do *riser*, a partir da qual se simula hipoteticamente a instalação da estrutura e a mesma adquire a posição de equilíbrio inicial, denominada posição neutra. A partir dessa posição segue-se com a simulação estática do *riser*, onde são aplicados os esforços permanentes, a corrente e o *offset* estático da plataforma como prescrição de deslocamento no topo do *riser*. Após a análise estática é feita então a análise dinâmica do *riser*, aplicando-se as ondas centenárias e anuais. Conforme descrito na Seção 6.1, toda a simulação do *riser* é feita para três diferentes condições de operação: *riser* com fluido interno, *riser* com água e *riser* vazio.

A Figura 35 apresenta um esquema simplificado do fluxo de otimização modelado no programa modeFRONTIER®.

Figura 35 – Esquema simplificado do fluxo de otimização.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

6.3.2 DADOS DE ENTRADA

A primeira etapa da construção do fluxo de otimização consiste na definição dos dados de entrada do problema. No programa modeFRONTIER® os dados de entrada podem ser definidos como constantes, variáveis ou como uma expressão em função dos demais dados de entrada. Apenas os parâmetros definidos como variáveis são considerados como parte ativa do problema de otimização. Os demais dados são utilizados na construção do modelo a ser simulado.

A partir da caracterização das variáveis de projeto e seus respectivos intervalos de variação, o espaço de busca do problema é definido. As configurações avaliadas durante o processo de otimização são obtidas a partir da variação dos valores das variáveis do modelo dentro dos limites do domínio então definido para o problema. Vale ressaltar que essa caracterização inicial das variáveis de projeto é determinante para a eficiência do processo de otimização e qualidade dos resultados obtidos. É necessário identificar as variáveis relevantes ao problema e definir adequadamente o intervalo de variação de cada variável. A incorporação de variáveis não significativas ao problema e a definição de intervalos de variação muito grandes podem comprometer a eficiência do método, uma vez que dessa forma o espaço de busca do problema é ampliado, sendo necessário um maior número de avaliações para cobrir todo o espaço na busca pelas soluções ótimas. Por outro

lado, a não incorporação de variáveis significativas ao problema e a definição de intervalos de variação não representativos podem comprometer a qualidade dos resultados, uma vez que, com a redução do espaço de busca, soluções potencialmente de boa qualidade podem não ser avaliadas.

As variáveis de transferência são calculadas em função dos dados de entrada e constituem parâmetros necessários para construção dos modelos a serem simulados pelo programa Anflex. No modelo formulado são definidas as onze variáveis de projeto descritas na Seção 5.3.1, quais sejam: comprimento da *stress-joint* de base, comprimento da *stress-joint* de topo, proporção do trecho de *riser* inferior, proporção do trecho total com flutuadores, diâmetro do maior flutuador, proporção do trecho de *riser* com revestimento pesado, espessura do revestimento pesado, *overlength fraction*, *offset* horizontal do poço (proporção em relação à lâmina d'água), proporção do trecho de *riser* superior, diâmetro externo do *riser*.

6.3.3 FLUXO DE PROCESSOS

Durante o processo de otimização, as possíveis configurações são definidas com base nos dados de entrada e segue-se então com a simulação de tais configurações para posterior avaliação dos resultados das mesmas. Conforme comentado anteriormente, a simulação do *riser* é feita no programa Anflex, acoplado ao modeFRONTIER® por meio da criação de *scripts*.

O fluxo elaborado para o presente estudo tem início com a execução da análise de montagem do *riser*, seguida das análises estática e dinâmica. Ao final de cada um desses processos, são gerados arquivos de saída com as informações correntes da simulação. Esses arquivos são então fornecidos como dados de entrada para a execução do processo seguinte. Após a finalização do último processo, referente à análise dinâmica, as respostas de interesse são extraídas dos arquivos de saída gerados e tais informações são atribuídas às variáveis de saída que serão avaliadas quanto às restrições impostas e à função objetivo.

6.3.4 VARIÁVEIS DE SAÍDAS

Com a finalização das simulações do *riser*, as resposta de interesse são extraídas dos arquivos de saída gerados e atribuídas às variáveis de saída que se deseja avaliar. Para o presente estudo as variáveis de saída correspondem às

informações de máxima tensão de von Mises nas paredes interna e externa, mínima tração efetiva e raio de curvatura mínimo ao longo de todo o *riser*. Essas informações são obtidas dos arquivos de envoltória gerados pelo Anflex após as análises estática e dinâmica do *riser*. Todas as essas variáveis de saída são referentes às análises centenárias e anuais para as posições relativas *near* e *far*.

6.3.5 OBJETIVOS E RESTRIÇÕES

Os objetivos e restrições são definidos em função das variáveis de saída. Vale ressaltar que a adequada definição dos objetivos e restrições é crucial para o problema avaliado. É importante definir claramente a medida objetiva de eficiência que se deseja extremizar e observar se tal medida é de fato representativa para problema analisado. A identificação das restrições do problema é fundamental no sentido de limitar a busca pela solução ótima, garantindo que o resultado obtido será uma configuração viável.

6.4 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Antes de realizar a análise de otimização, uma exploração inicial do espaço de busca pode agregar informações relevantes ou até essenciais ao processo. Essa avaliação inicial pode ser utilizada no intuito de gerar uma população inicial já com boas características bem como para proporcionar uma melhor compreensão do comportamento do *riser* em relação às respostas de interesse, aos objetivos e às restrições. Essa avaliação inicial também é capaz de fornecer informações a respeito da contribuição de cada variável no problema analisado. Assim, é possível identificar as variáveis não relevantes ao problema, mas que a princípio foram incorporadas ao modelo, e então considerá-las constantes. Essa diminuição da quantidade de variáveis reduz o espaço de busca e acelera o processo de otimização.

Para a realização dessa primeira análise do problema formulado, inicialmente composto por onze variáveis, são empregadas técnicas estatísticas de planejamento fatorial fracionado ($11 - 1$), ou seja, uma meia fração de um planejamento fatorial completo com dois níveis (alto e baixo). Essa é uma técnica de planejamento bastante utilizada uma vez que é capaz de fornecer resultados representativos com uma quantidade menor de experimentos, buscando eliminar observações

redundantes e assim reduzir o tempo e os recursos necessários para essa análise inicial. A partir dos resultados obtidos os efeitos principais e interações de dois fatores foram testados quanto à sua significância por meio do teste *t* de *Student*.

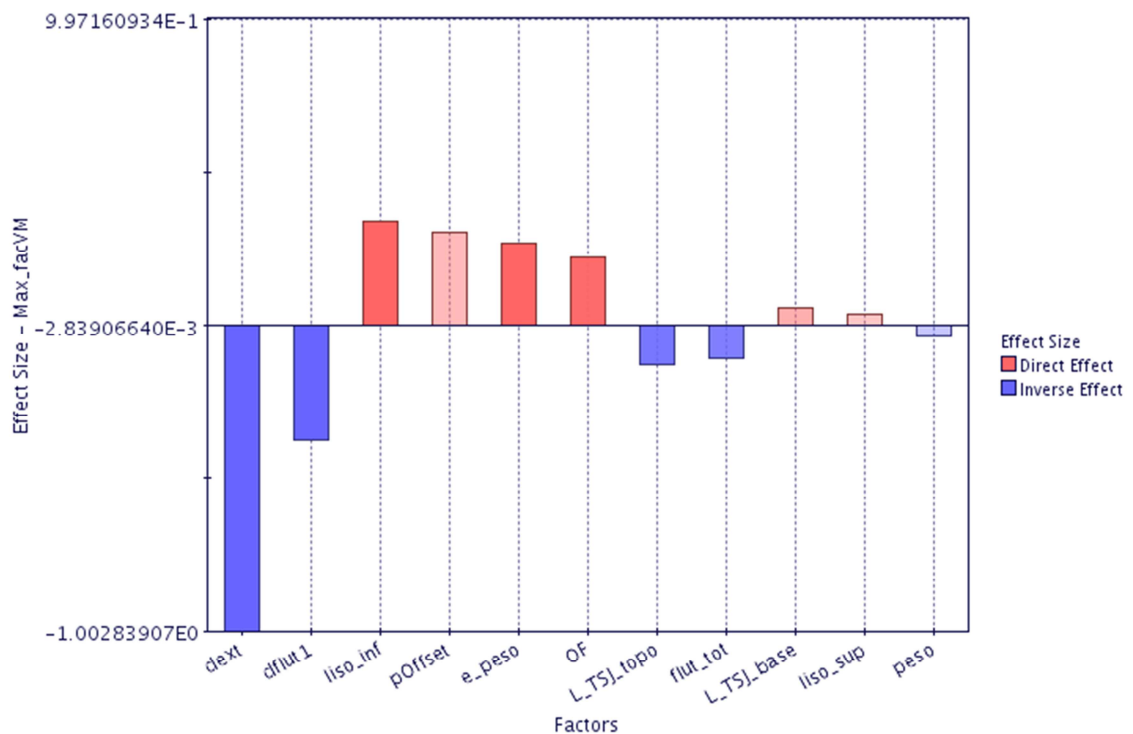
A Figura 36 apresenta os resultados de magnitude de efeito (*effect size*) das variáveis de projeto em relação ao fator de utilização de tensão definido na Seção 5.3.2. Nesse tipo de análise é possível verificar a magnitude da relação entre a variável de entrada e o parâmetro de saída de interesse. Um efeito maior do que zero implica em uma relação direta entre variável e a resposta, enquanto um efeito negativo indica que essa relação é inversa, ou seja, o aumento do valor da variável causa uma diminuição no valor da resposta.

Observa-se na Figura 36 que as variáveis diâmetro externo (*dext*), diâmetro do flutuador (*dflut1*), proporção do trecho de *riser* inferior (*liso_inf*), *offset* horizontal do poço (*pOffset*), espessura do revestimento pesado (*e_peso*) e *overlength fraction* (*OF*) são as que possuem maior influência no comportamento do *riser* vertical complacente em relação ao fator de utilização de tensão. Os resultados obtidos estão consistentes em relação ao comportamento estrutural do *riser*. O aumento do diâmetro externo do *riser* resulta no aumento da rigidez, reduzindo a tensão de serviço o que conseqüentemente reduz o fator de utilização de tensão. Assim, justifica-se a relação inversa observada quanto à relação do diâmetro externo do *riser* e o fator de utilização de tensão. Em relação ao diâmetro do flutuador, tem-se que o aumento dessa variável resulta no aumento do volume do flutuador e, conseqüentemente, no aumento do empuxo. Dessa forma, há um alívio do peso suportado pelo *riser*, refletindo na redução da tensão de serviço, o que justifica a relação inversa entre a variável diâmetro externo e o fator de utilização de tensão.

Ainda em referência à Figura 36, observa-se que as variáveis proporção de *riser* inferior, *offset* horizontal do poço, espessura do revestimento pesado e *overlength fraction* provocam um efeito direto no fator de utilização de tensão. Isso ocorre uma vez que, com o aumento da proporção de *riser* inferior, o segmento de flutuador fica localizado mais próximo do segmento com revestimento pesado, aumentando a tensão na região intermediária do *riser*. Por sua vez, o aumento do *offset* horizontal do poço, afastando as extremidades de topo e base, provoca um aumento da tensão como reflexo do aumento da curvatura ao longo do *riser*, com redução do raio de curvatura. O aumento da espessura do revestimento pesado aumenta o peso da estrutura e conseqüentemente as tensões no *riser*, o que

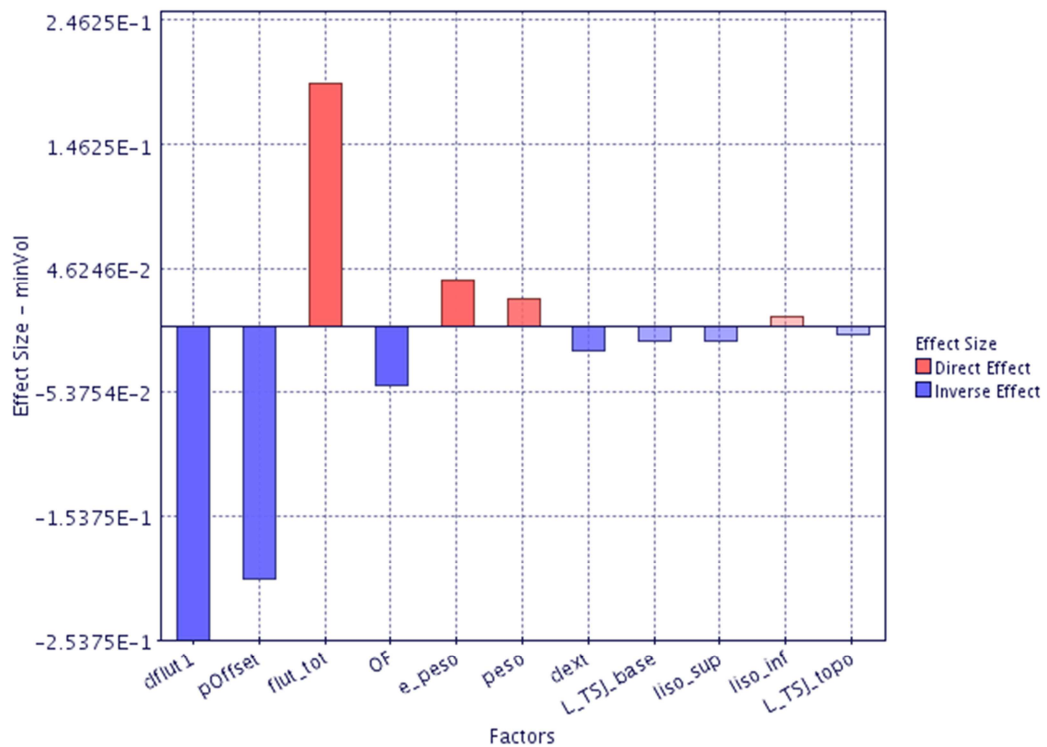
justifica a relação direta desses dois parâmetros. O aumento do *overlength fraction* resulta no aumento do comprimento do *riser*, com isso o peso da estrutura aumenta, aumentando os esforços na estrutura. Adicionalmente, um maior comprimento do *riser* provoca uma redução no raio de curvatura na região intermediária do mesmo, principalmente quando na posição relativa *near*. Essas duas últimas observações justificam a relação direta entre os parâmetros *overlength fraction* e fator de utilização de tensão. Verifica-se ainda que as variáveis comprimento da *stress-joint* de topo (*L_TSJ_topo*), comprimento total do flutuador (*flut_tot*), comprimento da *stress-joint* de base (*L_TSJ_base*), proporção do trecho de *riser* superior (*liso_sup*) e proporção do trecho com revestimento pesado (*peso*) não resultaram em um efeito principal significativo, comparado a efeito observado para as demais variáveis.

Figura 36 – Magnitude de efeito em relação ao fator de utilização de tensão.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Figura 37 – Magnitude de efeito em relação ao fator de volume.



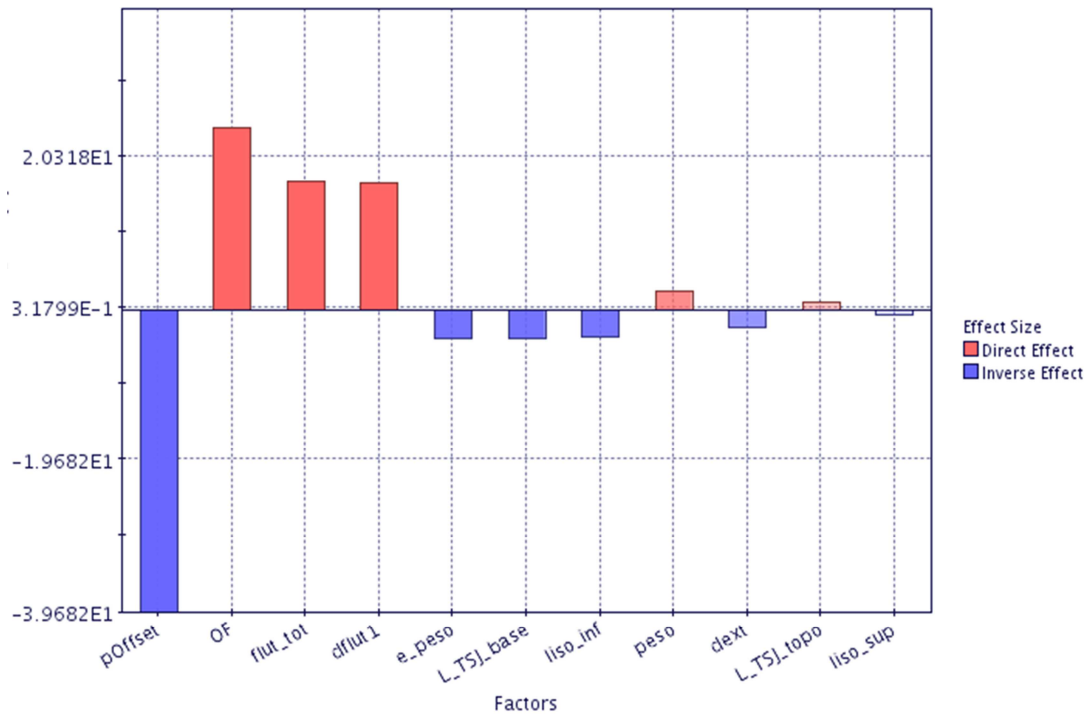
Fonte: Autor desta dissertação (2011)

A Figura 37 apresenta o gráfico da magnitude de efeito das variáveis de projeto em relação ao fator de volume definido na Seção 5.3.2. Nesse gráfico observa-se que as variáveis mais significativas para esse parâmetro de resposta são o diâmetro do flutuador, o *offset* horizontal do poço e a proporção do trecho com flutuador, verificando-se uma relação inversa com as duas primeiras e uma relação direta com a última. Isso é justificado pelo fato dessas três variáveis causarem o maior impacto na geometria, refletindo em aumento do volume da estrutura e conseqüentemente do fator de volume. A relação inversa das variáveis diâmetro do flutuador, *offset* horizontal do poço e *overlength fraction* em relação ao fator de volume é justificada pela forma como foi definido esse parâmetro de resposta (Eq. 22), estando no denominador da equação as variáveis diâmetro do flutuador e comprimento do *riser*. Logo, como o aumento do *offset* horizontal e do *overlength fraction* provocam o aumento do comprimento total do *riser*, isso reflete na redução do fator de volume. Para esse parâmetro de resposta as demais variáveis não possuem efeito significativo.

Apresenta-se na Figura 38 o gráfico de magnitude de efeito das variáveis de projeto em relação ao raio de curvatura. Observa-se que das variáveis consideradas

apenas quatro possuem efeito significativo: *offset* horizontal do poço, *overlength fraction*, proporção de flutuador e diâmetro do flutuador. Verifica-se que o aumento do *offset* horizontal reduz o raio de curvatura, situação indesejada uma vez que provoca o aumento da tensão e pode inviabilizar as operações de *workover*.

Figura 38 – Magnitude de efeito em relação ao raio de curvatura.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

A Figura 39 apresenta proporcionalmente a contribuição de cada variável de projeto para os parâmetros de resposta de interesse. Os fatores de contribuição mostrados nesse gráfico são calculados em função da magnitude de efeito apresentada nos gráficos da Figura 36, Figura 37 e Figura 38.

Figura 39 – Contribuição das variáveis de projeto em relação aos parâmetros de resposta.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

É importante destacar que as informações apresentadas nos gráficos anteriores, em relação ao efeito principal causado pelas variáveis nos parâmetros de interesse, são bastante importantes, mas não podem ser avaliadas isoladamente. É necessário avaliar também a significância desses resultados, que permite confirmar o resultado obtido dentro de certo intervalo de confiança.

Neste estudo foi considerado o teste *t* de *Student* para realizar o teste de hipótese e avaliar a significância dos resultados obtidos. No teste de hipótese considerado a hipótese nula afirma que a variável não produz efeito significativo na resposta de interesse, enquanto a hipótese alternativa afirma o contrário, que a variável tem efeito significativo. Considera-se aqui um intervalo de confiança de 95%, o que representa uma significância limite de 0,05. No teste de hipótese, a significância calculada, também chamada de *p – valor*, representa o Erro tipo I, e consiste na probabilidade de cometer um erro ao rejeitar a hipótese nula sendo ela verdadeira. Dessa forma, caso o *p – valor* calculado seja maior do que 0,05, a hipótese nula é aceita, o que implica dizer que a variável testada não é significativa para o parâmetro de resposta em questão. Nos casos onde *p – valor* é menor do que 0,05, a hipótese nula é rejeitada e pode-se então afirmar que a variável testada é significativa para o parâmetro de resposta em questão. A Tabela 8, a Tabela 9, a Tabela 10, Tabela 11 e a Tabela 12 apresentam os dados obtidos para os testes de hipótese quanto ao efeito, respectivamente, do fator de utilização de tensão, do fator

de volume, do raio de curvatura, da tensão combinada de von Mises e da tração efetiva. Nas referidas tabelas destacam-se em vermelho as variáveis para as quais a hipótese nula foi aceita, ou seja, aquelas não significativas para o parâmetro de resposta em questão. Assim, é possível observar que as variáveis comprimento da stress-joint do topo (L_{TSJ_topo}), comprimento da stress-joint da base (L_{TSJ_base}) e proporção do trecho de riser superior ($liso_sup$) demonstraram ser não significativas para todos os parâmetros de resposta avaliados. Dessa forma, é possível considerá-las constantes no processo de otimização sem perda de representatividade do problema formulado. Entretanto, antes de qualquer conclusão, faz-se necessária a avaliação da interação entre as variáveis.

Tabela 8 – Dados do teste de hipótese para o efeito das variáveis no fator de utilização de tensão.

Variável	Mag. efeito	Significância	t-Student	t crítico (sig. = 5%)
dext	-1,002839066	0,00	8,939866161	1,653042889
dflut1	-0,37718333	0,001	2,980362771	1,660846914
liso_inf	0,338784306	0,005	2,585711832	1,653042889
pOffset	0,305716181	0,369	0,332758222	1,653042889
e_peso	0,269402173	0,021	2,040442813	1,653042889
OF	0,22064847	0,092	1,337713274	1,669006289
L_TSJ_topo	-0,128356621	0,168	0,963365769	1,653042889
flut_tot	-0,106259064	0,206	0,821829125	1,660869989
L_TSJ_base	0,054074616	0,342	0,405571145	1,653042889
liso_sup	0,035453033	0,395	0,265838652	1,653042889
peso	-0,034310521	0,399	0,255096549	1,653042889

Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Tabela 9 – Dados do teste de hipótese para o efeito das variáveis no fator de volume.

Variável	Mag. efeito	Significância	t-Student	t crítico (sig. = 5%)
dflut1	-0,253754124	0	16,00424922	1,661677134
pOffset	-0,204292037	0,1101	1,229626311	1,653042889
flut_tot	0,196010003	0	10,03300498	1,653042889
OF	-0,04782231	0,033	1,847784545	1,653042889
e_peso	0,038200242	0,057	1,58710086	1,653042889
peso	0,022370319	0,179	0,918209812	1,653042889
dext	-0,02003781	0,205	0,825201099	1,653042889
L_TSJ_base	-0,011593419	0,316	0,479128321	1,653042889
liso_sup	-0,011529353	0,317	0,476477403	1,653042889
liso_inf	0,007503045	0,378	0,310076597	1,653042889
L_TSJ_topo	-0,006816897	0,389	0,281233883	1,653042889

Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Tabela 10 – Dados do teste de hipótese para o efeito das variáveis no raio de curvatura.

Variável	Mag. efeito	Significância	t-Student	t crítico (sig. = 5%)
pOffset	-39,68200862	0,050	1,651827157	1,653042889
OF	24,05117334	0,0	5,456824444	1,67046145
flut_tot	16,92944398	0,0	5,315637016	1,660831949
dflut1	16,65757138	0,0	5,204940213	1,660878243
e_peso	-3,647859663	0,149	1,040825246	1,653042889
L_TSJ_base	-3,620664587	0,151	1,033837259	1,653042889
liso_inf	-3,365761704	0,168	0,961004409	1,653042889
peso	2,418454453	0,247	0,683636534	1,653042889
dext	-2,181801644	0,282	0,57717215	1,662750076
L_TSJ_topo	1,010309628	0,387	0,287337201	1,653042889
liso_sup	-0,543443339	0,438	0,154742056	1,653042889

Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Tabela 11 – Dados do teste de hipótese para o efeito das variáveis na tensão combinada de von Mises.

Variável	Mag. efeito	Significância	t-Student	t crítico (sig. = 5%)
OF	813359,3744	0,00	6,476234049	1,653042889
pOffset	-806386,6797	0,181	0,910507724	1,653042889
flut_tot	597580,4174	0,00	4,92644957	1,653042889
dflut1	557430,9857	0,00	4,557215008	1,653042889
dext	-399817,5261	0,001	3,064566344	1,662210184
L_TSJ_topo	195882,1526	0,064	1,527863694	1,653042889
peso	173740,4705	0,090	1,343652703	1,653042889
L_TSJ_base	-158800,4702	0,108	1,237667276	1,653042889
liso_inf	-79001,84437	0,269	0,61404638	1,653042889
liso_sup	-73866,32672	0,283	0,573864256	1,653042889
e_peso	-50753,73073	0,347084692	0,393810829	1,653042889

Fonte: Autor (2011)

Tabela 12 – Dados do teste de hipótese para o efeito das variáveis na tração efetiva.

Variável	Mag. efeito	Significância	t-Student	t crítico (sig. = 5%)
dflut1	-245,6981107	0,00	6,868580719	1,661392544
dext	200,7392547	0,00	4,928535879	1,662968727
flut_tot	-125,1001194	0,00	3,210341952	1,653042889
peso	-110,8121334	0,002	2,80437955	1,653042889
OF	-53,26307993	0,059	1,575099211	1,661732992
pOffset	-41,39300524	0,440	0,150223244	1,653042889
L_TSJ_topo	-33,76593884	0,199	0,84470656	1,653042889
L_TSJ_base	31,25177411	0,217	0,782653702	1,653042889
liso_sup	-29,26351675	0,232	0,73271296	1,653042889
e_peso	-24,9147297	0,266	0,623089518	1,653042889
liso_inf	24,39573753	0,271	0,610769694	1,653042889

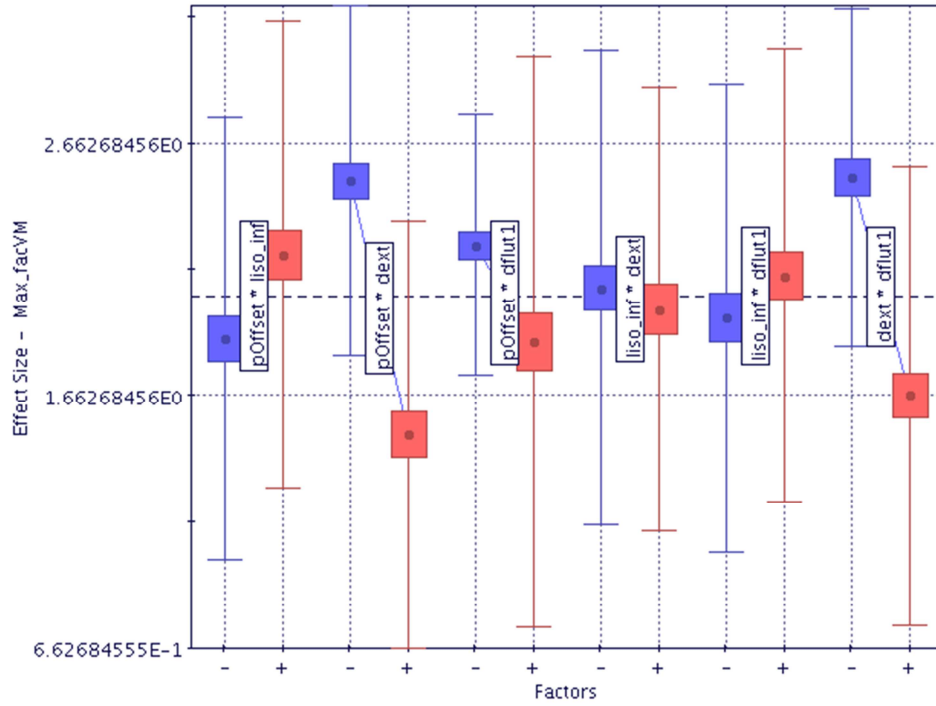
Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Outro aspecto importante a ser avaliado é a interação entre as variáveis. A existência de uma forte interação significa que o efeito de uma variável sobre a resposta depende de outra variável. Assim, é inadequado tirar conclusões com base somente nos efeitos principais. A partir do momento que uma interação significativa é verificada entre as variáveis, os efeitos principais podem estar mascarados e dessa forma pode-se não conseguir explicar o que está ocorrendo com uma determinada variável, já que existe outra modificando seu comportamento.

Das 55 possíveis interações de segundo grau, as mais significativas são ilustradas da Figura 40 a Figura 49. A Figura 40 e a Figura 41 apresentam os gráficos de efeito de interação existentes quando do cálculo do fator de utilização de tensão. Os gráficos do efeito de interação representam as magnitudes dos efeitos de primeira ordem de interação de modo a identificar efeitos mais significativos entre cada fator envolvido.

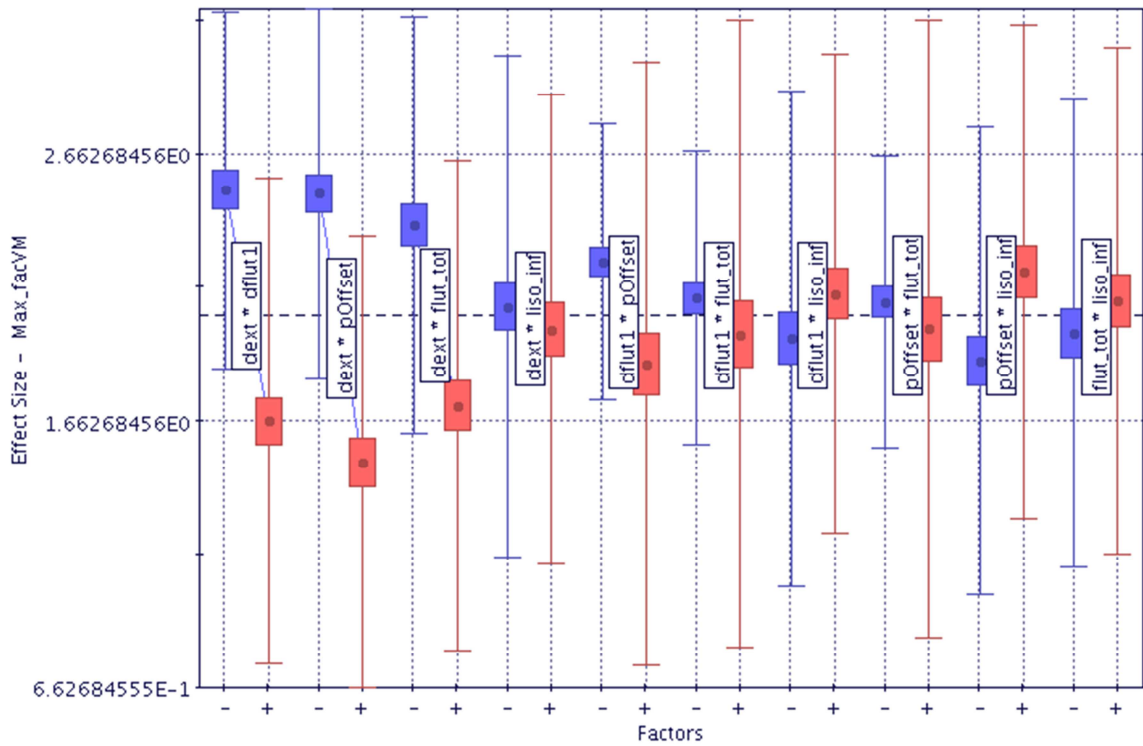
Cada gráfico de efeito principal é baseado nos resultados dos experimentos considerando a variação dos fatores em dois níveis. (alto e baixo, assumindo os valores máximo e mínimo do intervalo de variação de cada variável) onde os valores são codificados como -1 e +1. Nos referidos gráficos o eixo horizontal apresenta para cada par de fatores o referencial para os resultados referentes aos níveis alto e baixo (- e +). O eixo vertical representa a média do parâmetro de resposta para cada nível da interação. Cada caixa representada no gráfico é usada para ilustrar a variação da média entre os dois conjuntos de dados (dos níveis alto e baixo). Uma grande diferença entre os resultados (representada pelo aumento da altura da caixa) implica em uma interação significativa, enquanto uma pequena diferença implica em uma interação não importante. A linha horizontal tracejada representa o valor médio geral de saída, enquanto o ponto no interior de cada caixa representa o valor médio calculado apenas para o nível da caixa. Além disso, as linhas horizontais acima e abaixo de cada caixa representa o desvio padrão calculado para os resultados.

Figura 40 – Interações de maior efeito para o fator de utilização de tensão.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Figura 41 – Interações de maior efeito para o fator de utilização de tensão.

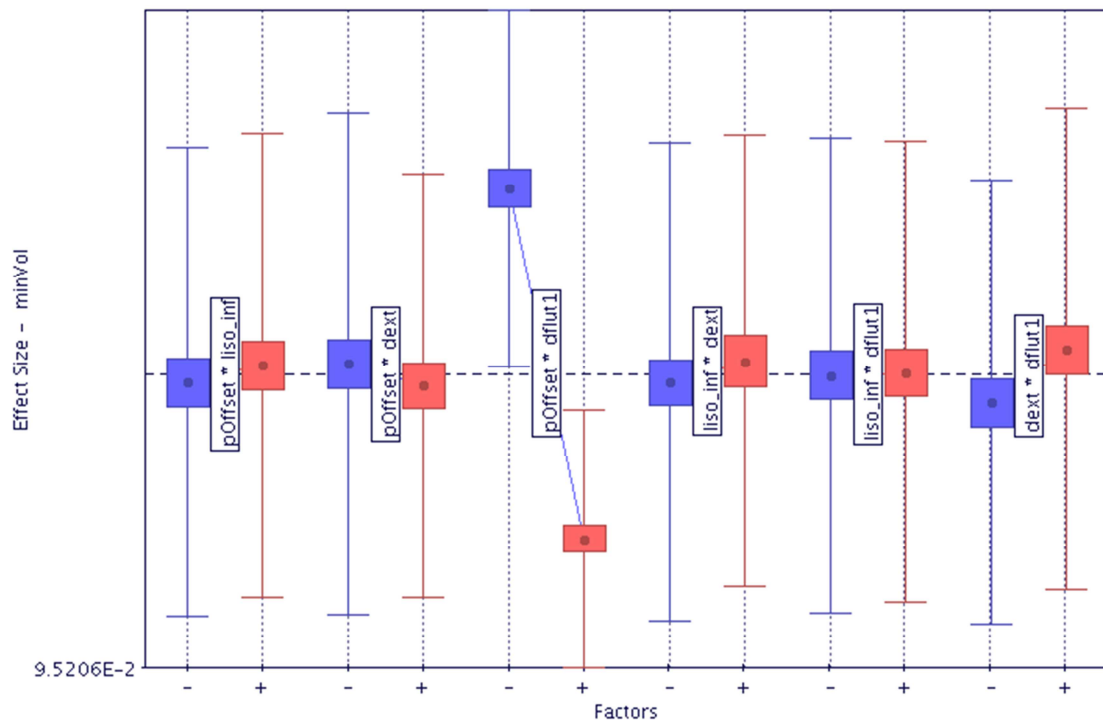


Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Observa-se que, para o cálculo do fator de utilização de tensão, as interações de segunda ordem mais significativas são entre os pares de variáveis: *offset* horizontal e diâmetro externo, diâmetro externo e diâmetro do flutuador, diâmetro externo e proporção de flutuador.

A Figura 42 e a Figura 43 apresentam os gráficos dos efeitos de interação verificados no cálculo do fator de volume.

Figura 42 – Interações de maior efeito para o fator de volume.

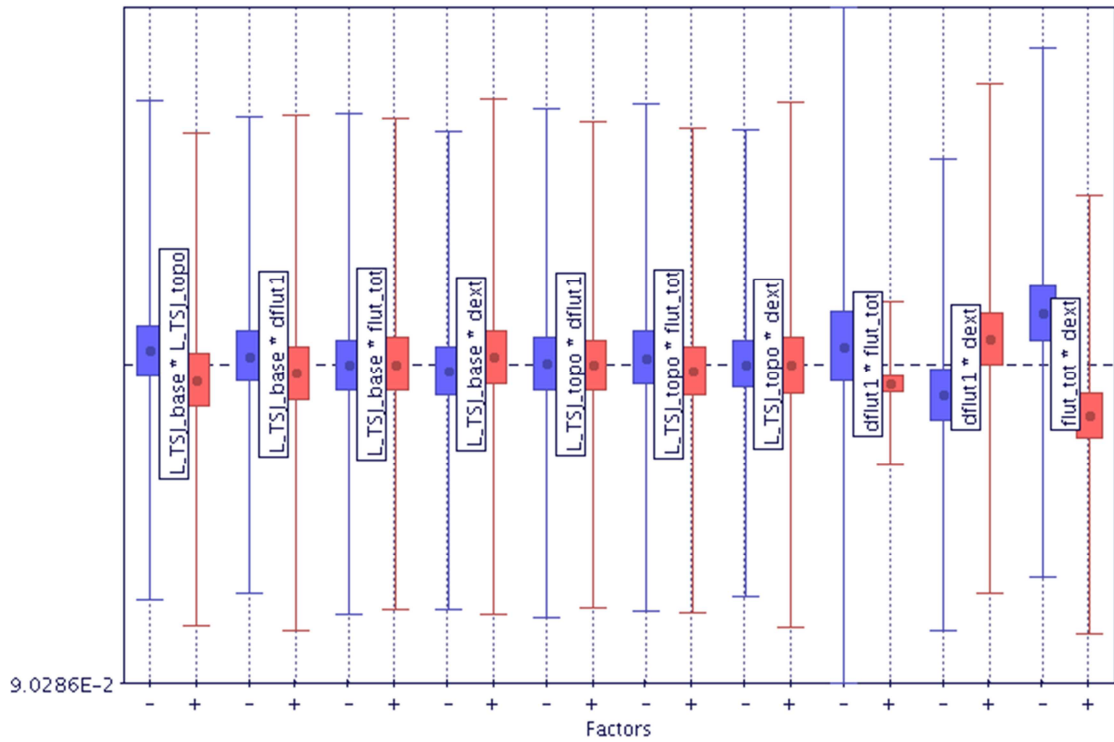


Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Observa-se que, para o cálculo do fator de volume, as interações de segunda ordem mais significativas são entre os pares de variáveis: diâmetro externo e proporção de flutuador, *offset* horizontal e diâmetro do flutuador.

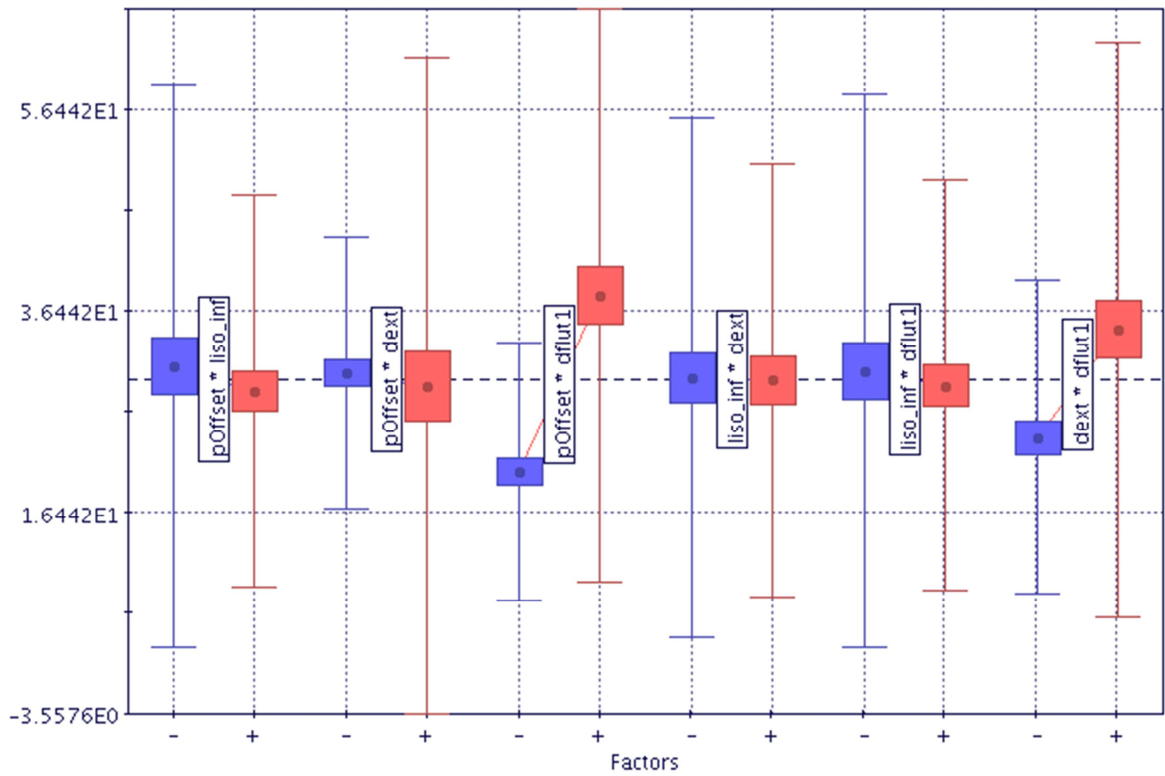
A Figura 44 e a Figura 45 apresentam os gráficos dos efeitos de interação verificados no cálculo do raio de curvatura.

Figura 43 – Interações de maior efeito para o fator de volume.



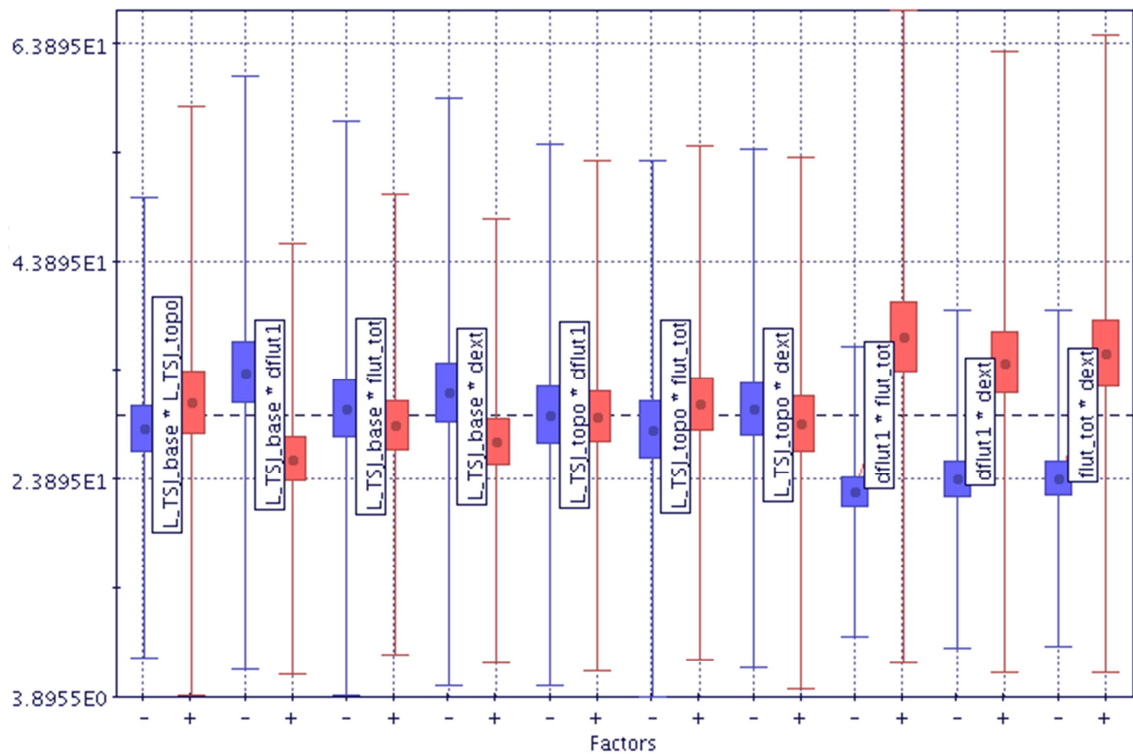
Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Figura 44 – Interações de maior efeito para o raio de curvatura.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Figura 45 – Interações de maior efeito para o raio de curvatura.

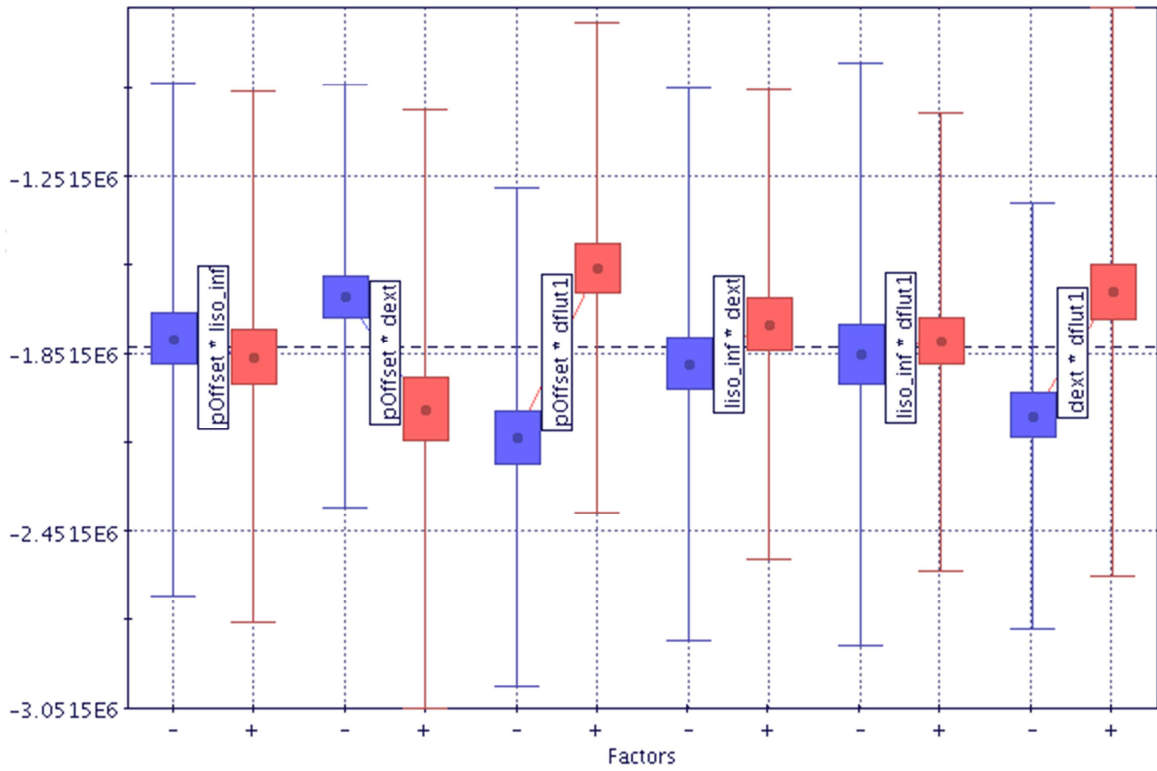


Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Para esse caso, as interações mais significativas são entre os pares de variáveis: diâmetro externo e diâmetro do flutuador, *offset* horizontal e diâmetro do flutuador, diâmetro do flutuador e proporção total de flutuador.

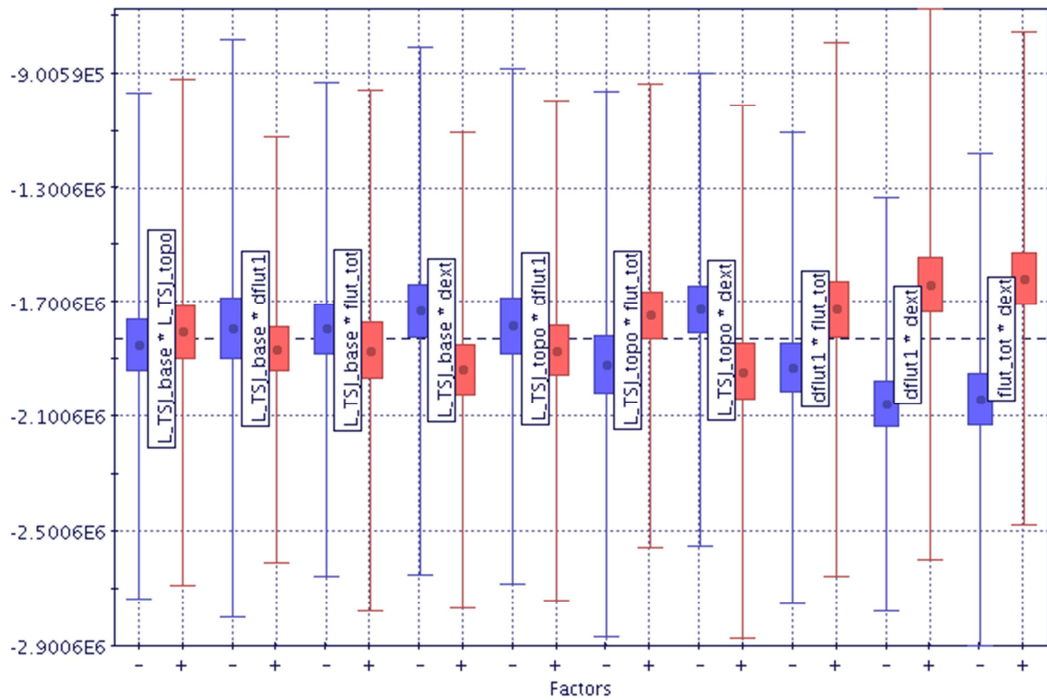
A Figura 46 e Figura 47 apresentam os gráficos dos efeitos de interação verificados no cálculo da tensão combinada de von Mises.

Figura 46 – Interações de maior efeito para tensão combinada de von Mises.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Figura 47 – Interações de maior efeito para tensão combinada de von Mises.

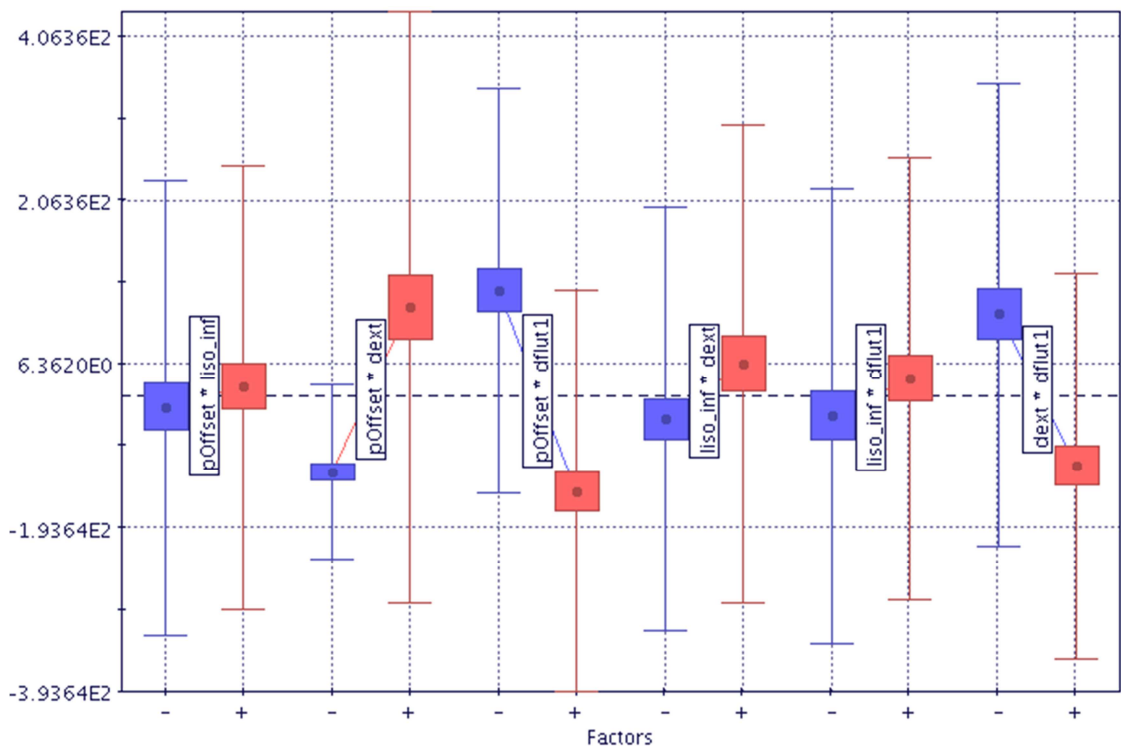


Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Nesses casos, observa-se um efeito de interação mais significativo entre os pares de variáveis: diâmetro externo e diâmetro do flutuador, *offset* horizontal e diâmetro do flutuador, *offset* horizontal e diâmetro externo, diâmetro do flutuador e proporção total de flutuador.

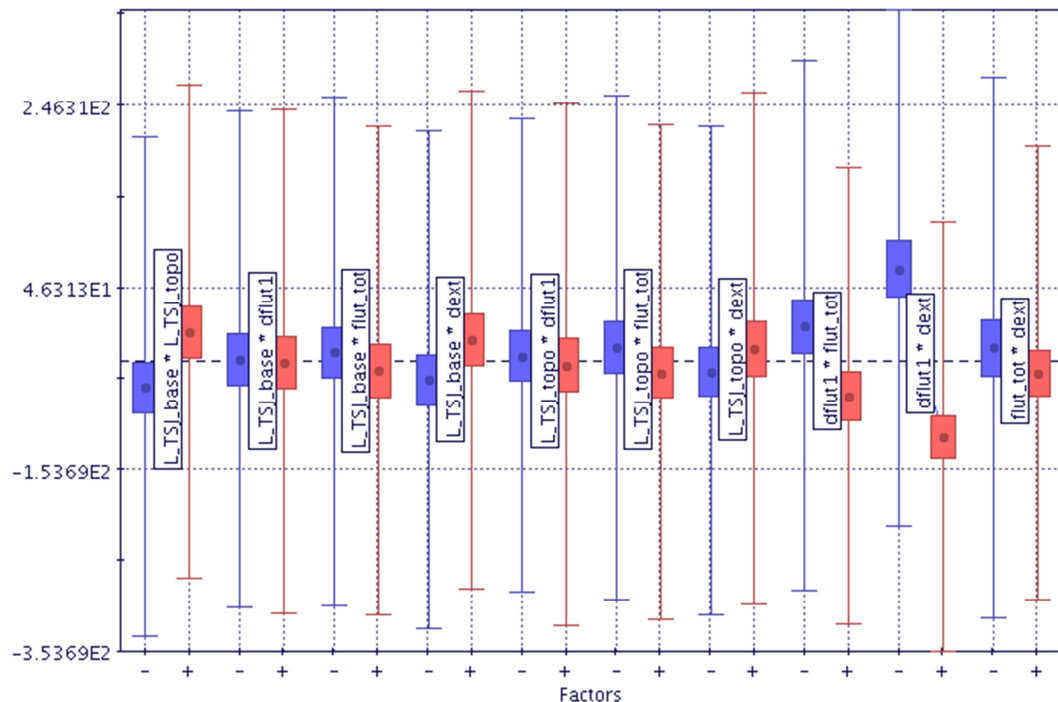
Os efeitos de interação verificados no cálculo da tração efetiva são apresentados na Figura 48 e Figura 49.

Figura 48 – Interações de maior efeito para a tração efetiva.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Figura 49 – Interações de maior efeito para a tração efetiva.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

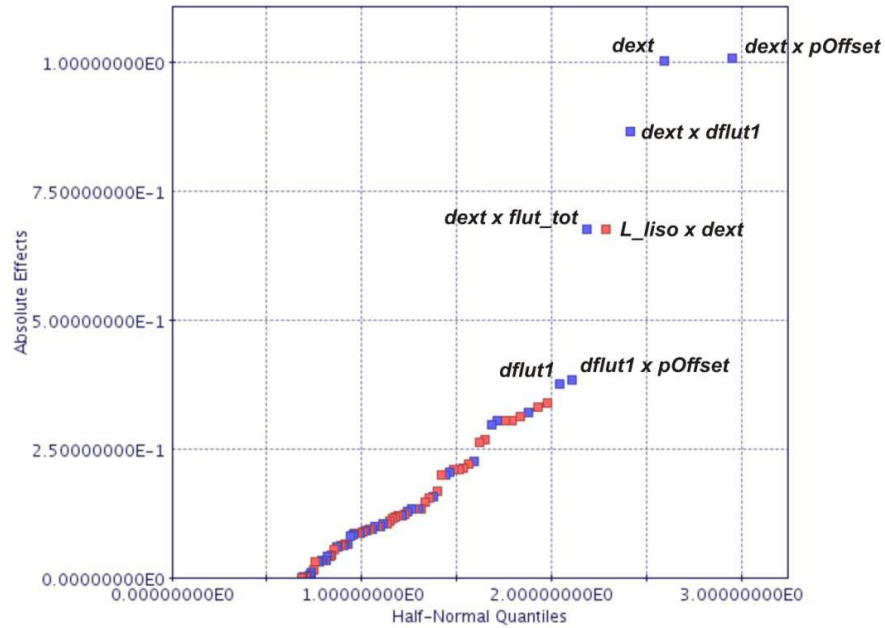
Observa-se um efeito de interação mais significativo entre os pares de variáveis: *offset* horizontal e diâmetro externo, *offset* horizontal e diâmetro do flutuador, diâmetro externo e diâmetro do flutuador.

As demais interações entre as variáveis, para o cálculo das respostas de interesse, não foram significativas. É possível ainda identificar as variáveis significantes por meio dos gráficos de probabilidade normal dos efeitos. Neste tipo de gráfico são plotados os valores absolutos das estimativas de efeitos contra a probabilidade normal cumulativa. Na avaliação do gráfico obtido, um efeito principal ou interação é dito significativo se sua magnitude é grande o suficiente com relação às outras colunas de contraste determinadas no projeto de experimentos. Quando a posição de um efeito está além dos limites de uma linha reta representativa da coluna de contraste dos efeitos não significantes, ele pode ser considerado significativo. De modo geral, os efeitos significantes, no gráfico de probabilidade meia-normal, estão localizados no canto superior direito e os menos significantes encontram-se próximos a linha imaginária de contraste.

Apresentam-se nos gráficos da Figura 50 a Figura 54 as curvas de probabilidade meia-normal dos efeitos em relação às respostas de interesse do

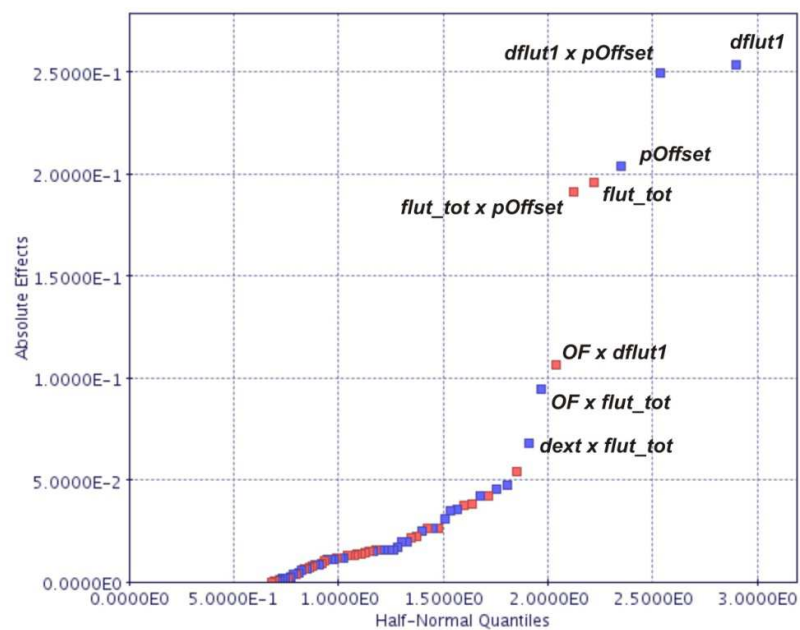
problema avaliado. Nestes gráficos, os efeitos mais significativos para configuração de *riser* vertical complacente encontram-se destacados e identificados.

Figura 50 – Gráfico de probabilidade meia-normal dos efeitos em relação ao fator de utilização de tensão.



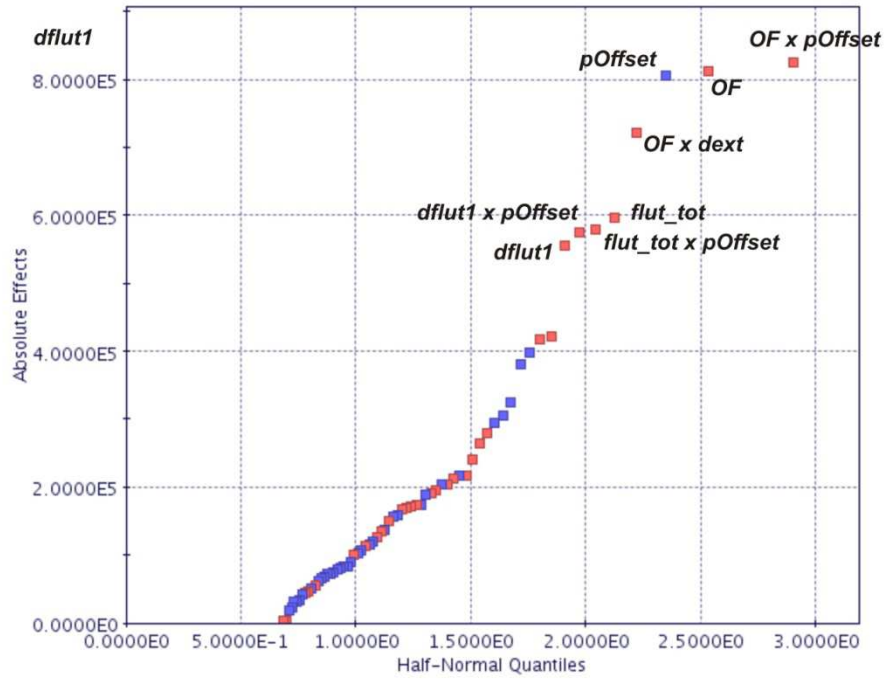
Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Figura 51 – Gráfico de probabilidade meia-normal dos efeitos em relação ao fator de volume.



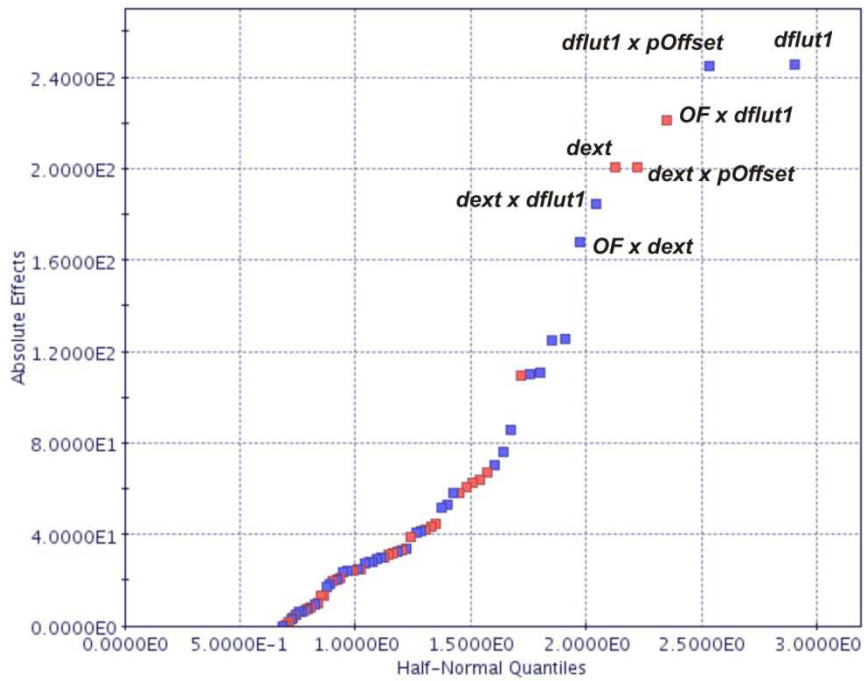
Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Figura 52 – Gráfico de probabilidade meia-normal dos efeitos em relação a tensão combinada de von Mises.



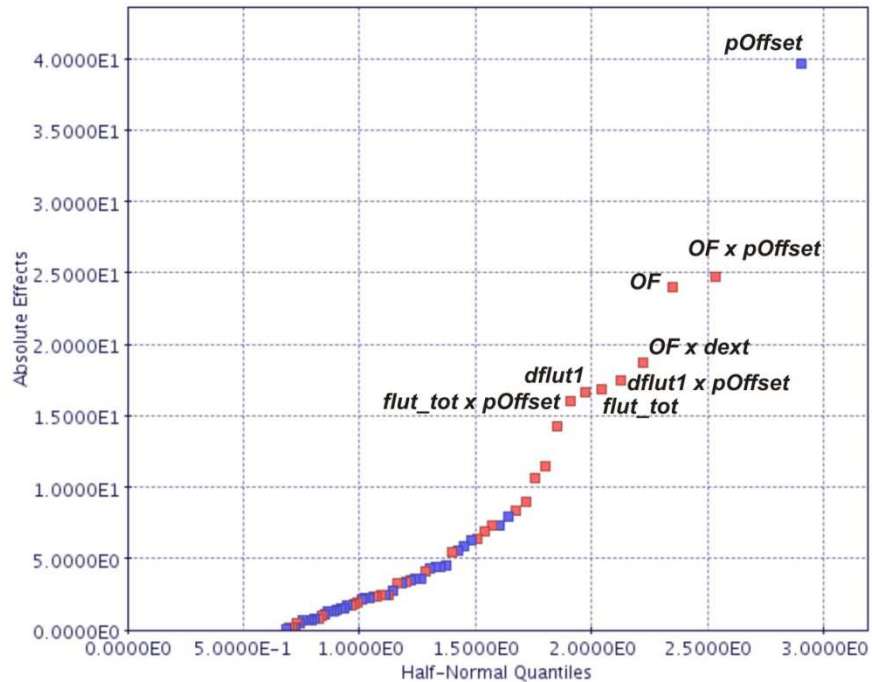
Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Figura 53 – Gráfico de probabilidade meia-normal dos efeitos em relação a tração efetiva.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Figura 54 – Gráfico de probabilidade meia-normal dos efeitos em relação ao raio de curvatura.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Os gráficos das análises de interação entre os fatores envolvidos no dimensionamento de *risers* verticais complacentes demonstram que as variáveis comprimento da *stress-joint* de topo, comprimento da *stress-joint* de base e proporção do trecho de *riser* superior não possuem efeito de interação significativo com as demais variáveis de projeto. Dessa forma, como não há evidências de que essas três variáveis possuem efeito principal e de interação significativos, as mesmas são, para efeito do presente estudo, consideradas constantes e assumem valores que, com base nos resultados das análises até então realizadas, levam ao melhor desempenho da estrutura em termos de tensão e raio de curvatura.

6.5 ANÁLISE DE OTIMIZAÇÃO

Apresenta-se nesta seção os resultados obtidos para análise de otimização de *risers* verticais complacentes. O modelo inicialmente idealizado possui onze variáveis de projeto, conforme apresentado na Seção 5.3.1. Após as análises de planejamento de experimentos, identificaram-se três variáveis não significantes: comprimento da *stress-joint* topo, comprimento da *stress-joint* de base e proporção do trecho de *riser* superior. Logo, para o processo de otimização essas variáveis são

consideradas constantes, reduzindo o número de variáveis de projeto para oito, o que reduz o espaço de busca e aumenta a eficiência do processo.

As funções objetivo e restrições formuladas são as definidas na Seção 5.3 deste trabalho. Em resumo, as restrições levam em consideração os limites impostos para os parâmetros de resposta tensão combinada de von Mises para a parede interna e externa, tração efetiva e raio de curvatura. São consideradas três diferentes abordagens para função objetivo: mono-objetivo com a maximização do fator de utilização de tensão; mono-objetivo com a minimização do fator de volume; e multiobjetivo combinando as duas funções objetivo anteriores.

Para solução do problema, aplica-se o método NSGA-II com população de 30 indivíduos, 100 gerações, probabilidade de cruzamento de 0,9 e probabilidade de mutação de 0,1. Os valores destes parâmetros são definidos com base em valores utilizados na literatura (Tanaka, 2009). A população inicial é definida com base nos resultados do planejamento de experimentos e em análises realizadas previamente, a partir dos quais são selecionadas algumas configurações que se demonstraram viáveis. Dessa forma, a população inicial é composta com estas configurações viáveis e configurações selecionadas aleatoriamente, procurando cobrir ao máximo o espaço de busca.

6.5.1 ANÁLISE MONO-OBJETIVO: MINIMIZAÇÃO DO FATOR DE VOLUME

Em uma primeira abordagem, considera-se como medida objetiva de eficiência o fator de volume (Eq. 22), buscando-se o valor mínimo dessa medida capaz de fornecer uma configuração viável, na qual todas as restrições fossem respeitadas.

Nessa abordagem considera-se o seguinte problema de otimização:

$$\text{achar arg min} \left(f_{obj_I} = \frac{V_{flut} + V_{peso} + V_{riser}}{L_{riser}(d_{flut}^2 - d_{ext}^2)} \right) \quad (30)$$

tal que

$$VME_{100} < 0,8 \sigma_{esc} \quad (31)$$

$$VME_1 < 0,67 \sigma_{esc} \quad (32)$$

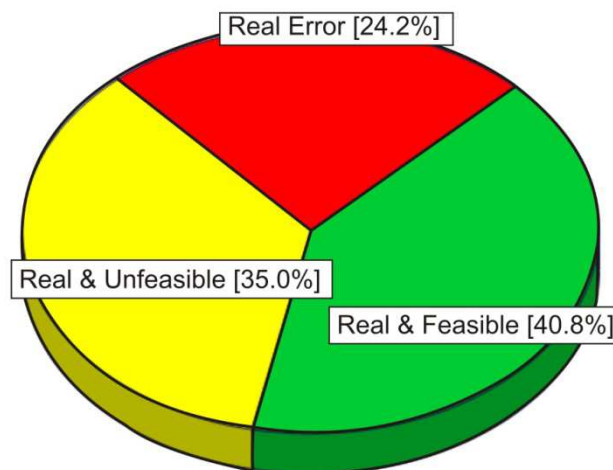
$$FX > 0 \quad (33)$$

$$RC > 90 \text{ m} \quad (34)$$

Onde VME_{100} é a máxima tensão combinada de von Mises ao longo do *riser* para estados de mar centenários, VME_1 é a máxima tensão combinada de von Mises ao longo do *riser* para estados de mar anuais, FX é a mínima tração efetiva ao longo do *riser*, RC é o raio de curvatura mínimo ao longo do *riser* e σ_{adm} é a tensão de escoamento do material. A *stress joint* do topo bem como todo o *riser* são compostos de aço, com tensão de escoamento equivalente a 551580,6 kN/m². A *stress joint da base do riser* é composta por titânio, com tensão de escoamento equivalente a 758000 kN/m².

A Figura 55 apresenta um resumo das simulações realizadas, informando proporcionalmente quantas simulações resultam em configurações viáveis (*Real and Feasible*), quantas resultam em configurações inviáveis, ou seja, violam alguma restrição (*Real and Unfeasible*) e quantas não convergem, resultando em erro (*Real Error*). Os erros desta última categoria são decorrentes da não convergência das simulações numéricas (montagem, estática ou dinâmica), cuja causa não é conhecida.

Figura 55 – Resumo das simulações realizadas.

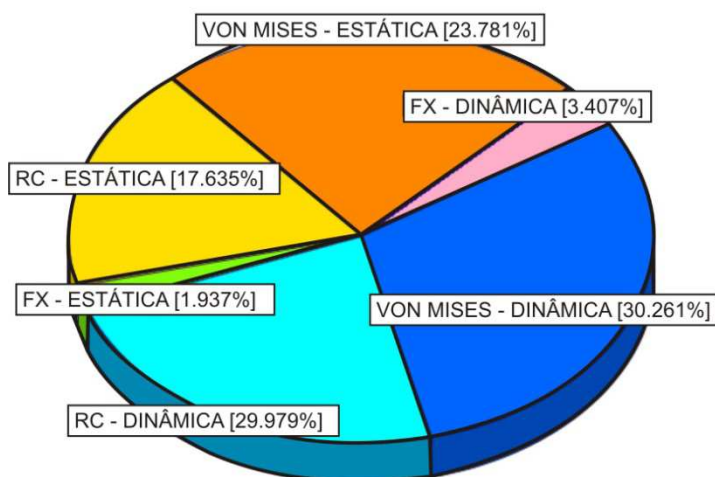


Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Das configurações identificadas como inviáveis, a Figura 56 quantifica proporcionalmente as restrições que são violadas. Observa-se que as restrições de tensão máxima são as mais críticas ao problema, seguidas do raio de curvatura, fator crítico para viabilização das operações de *workover*. Destaca-se a grande quantidade de restrições que são violadas já na análise estática do *riser*, tanto em

termos de raio mínimo de curvatura quanto em tensão máxima. Desta forma, uma possível alternativa para melhorar a eficiência do processo de otimização seria iniciar a exploração inicial do espaço de busca considerando apenas a realização das análises estáticas do modelo. Com isso seria possível identificar as regiões do espaço de busca potencialmente favoráveis às condições ótimas desejadas de maneira mais rápida e com um menor esforço computacional. Em uma segunda etapa seriam então incluídas as análises dinâmicas do *riser* no processo de otimização.

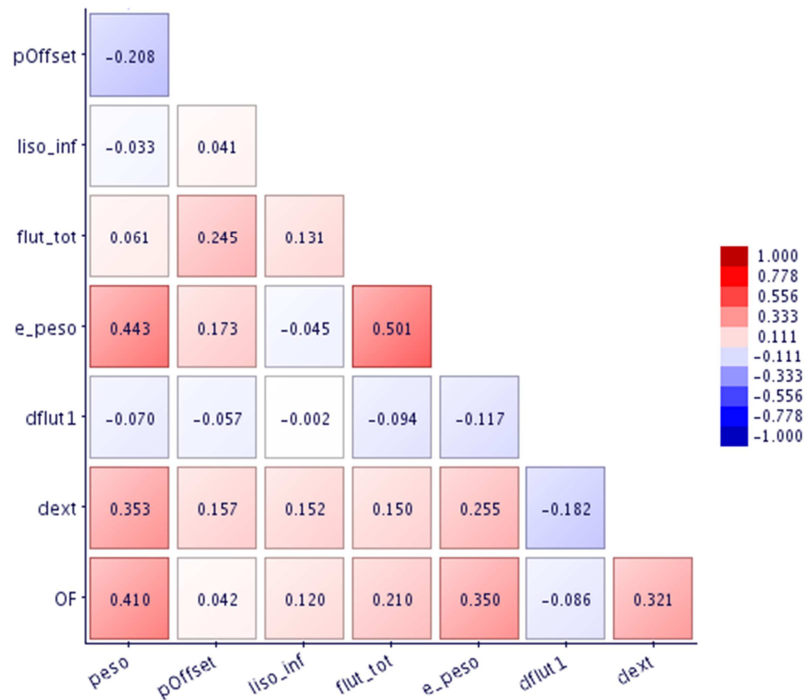
Figura 56 – Proporção das quebras de restrição.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

A Figura 57 apresenta os valores de correlação entre as variáveis de projeto envolvidas no processo de otimização. Todas as correlações apresentam valores baixos, indicando que não há relações lineares significativas entre as variáveis consideradas. Esse tipo de avaliação é importante dentro do contexto das análises de otimização uma vez que relações lineares diretas ou inversas significativas possibilitam a eliminação de variáveis do modelo. De modo geral, são consideradas significativas correlações acima de 0,7.

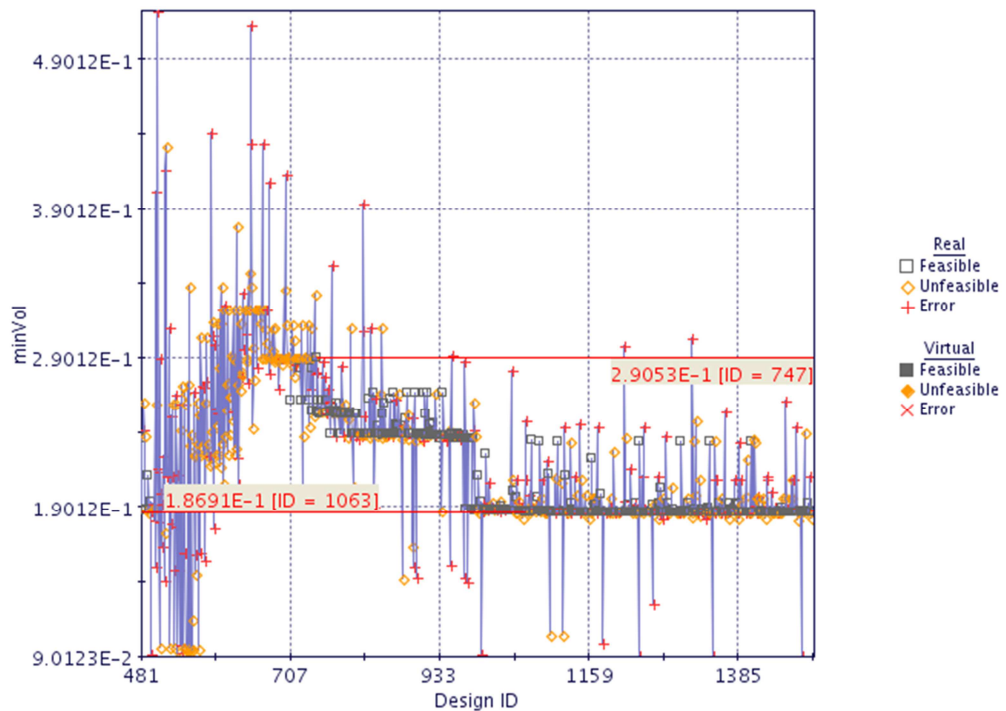
Figura 57 – Correlação entre as variáveis de projeto.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Apresenta-se na Figura 58 o histórico do processo de otimização, na busca pela configuração que resulte no volume mínimo de material, garantindo ainda a integridade estrutural do *riser* bem como as condições de operação impostas. Cabe destacar o ganho obtido durante o processo de busca. Durante o processo de otimização inicialmente encontrou-se uma configuração de *riser* viável, que atendia as restrições estruturais e de operação impostas, resultando em um fator de volume equivalente a 0,2953 (conforme destacado na Figura 58). Após a finalização do processo de busca, a configuração ótima encontrada resulta em um valor de fator de volume equivalente a 0,1869, o que corresponde a um ganho de aproximadamente 37% na redução do volume de material da estrutura.

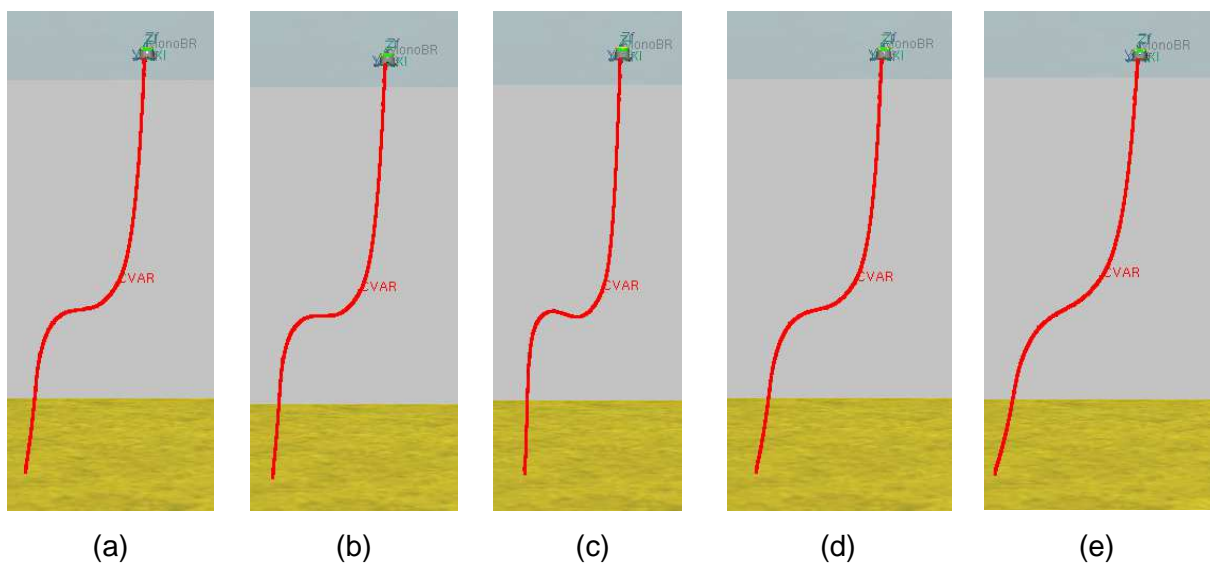
Figura 58 – Histórico do processo de busca da otimização.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

A Figura 59 apresenta a configuração ótima obtida por meio do processo de otimização da configuração de *risers* verticais complacentes formulado. São apresentadas na referida figura a configuração neutra do *riser*, a configuração quando nas posições *near* e *far* em condições de mar anual e centenária.

Figura 59 – Configuração ótima encontrada: (a) posição neutra; (b) *near* anual; (c) *near* centenário; (d) *far* anual; (e) *far* centenário.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

6.5.2 ANÁLISE MONO-OBJETIVO: MAXIMIZAÇÃO DO FATOR DE UTILIZAÇÃO DE TENSÃO

Em outra abordagem, considera-se como medida objetiva de eficiência o fator de utilização de tensão (Eq. 25), buscando-se o valor máximo dessa medida capaz de fornecer uma configuração viável, na qual todas as restrições são respeitadas. Essa abordagem é idealizada no intuito de alcançar o máximo aproveitamento do material, sem desrespeitar as restrições impostas.

Nessa abordagem considera-se o seguinte problema de otimização:

$$\text{achar arg min} \left(f_{obj_{II}} = \min \left(\frac{\sigma_{serv}}{\sigma_{adm}} \right) \right) \quad (35)$$

tal que

$$VME_{100} < 0,8 \sigma_{esc} \quad (36)$$

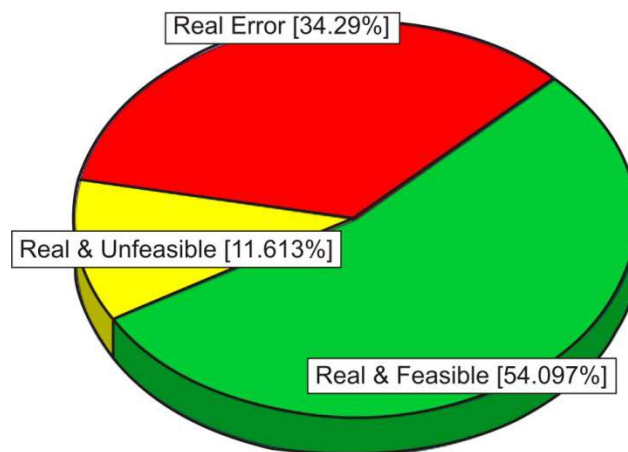
$$VME_1 < 0,67 \sigma_{esc} \quad (37)$$

$$FX > 0 \quad (38)$$

$$RC > 90 m \quad (39)$$

Apresenta-se na Figura 60 um resumo das simulações realizadas.

Figura 60 – Resumo das simulações realizadas.

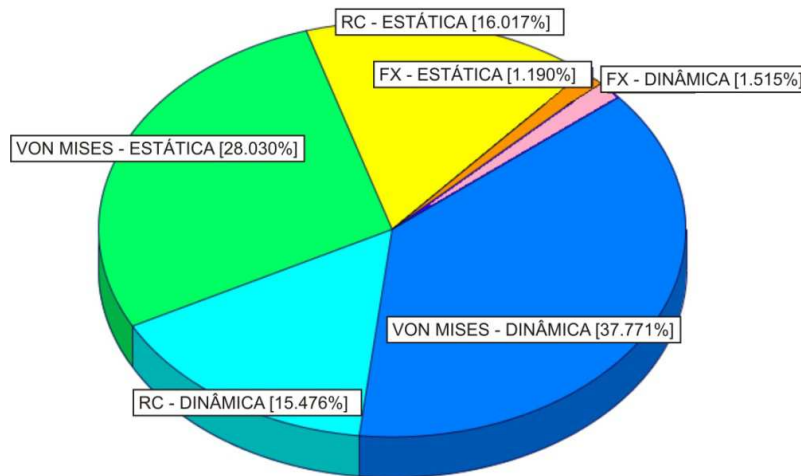


Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Das configurações identificadas como inviáveis, a Figura 61 quantifica proporcionalmente as restrições que são violadas. Assim como verificado para a minimização do fator de volume, as restrições de tensão máxima são as mais críticas ao problema, seguidas do raio de curvatura. Também nessa abordagem

verifica-se a grande quantidade de restrições que são violadas já na etapa de análise estática, tanto em termos de raio mínimo de curvatura quanto em tensão máxima. Desta forma, reforça-se a possibilidade de melhorar a eficiência do processo de otimização a partir da exploração inicial do espaço de busca considerando apenas a realização das análises estáticas do modelo, seguindo-se posteriormente com a inclusão da análise dinâmica ao processo para conclusão da busca pela configuração ótima.

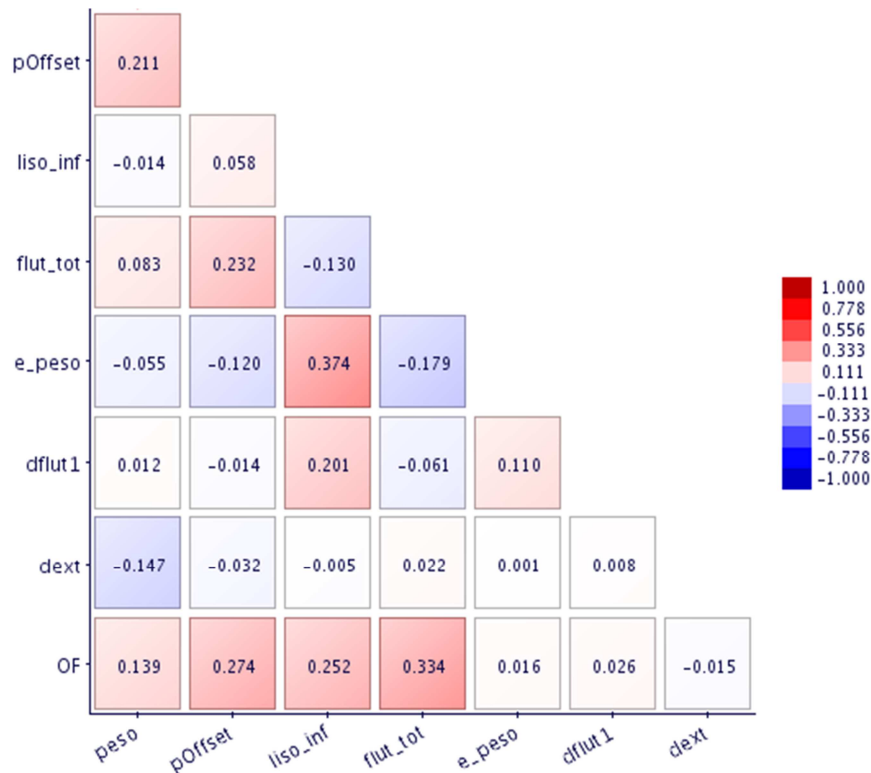
Figura 61 – Proporção das quebras de restrição.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

A Figura 62 apresenta os valores de correlação entre as variáveis de projeto envolvidas na análise realizada. Mais uma vez as correlações apresentam valores baixos, indicando que não há relações lineares significativas entre as variáveis consideradas.

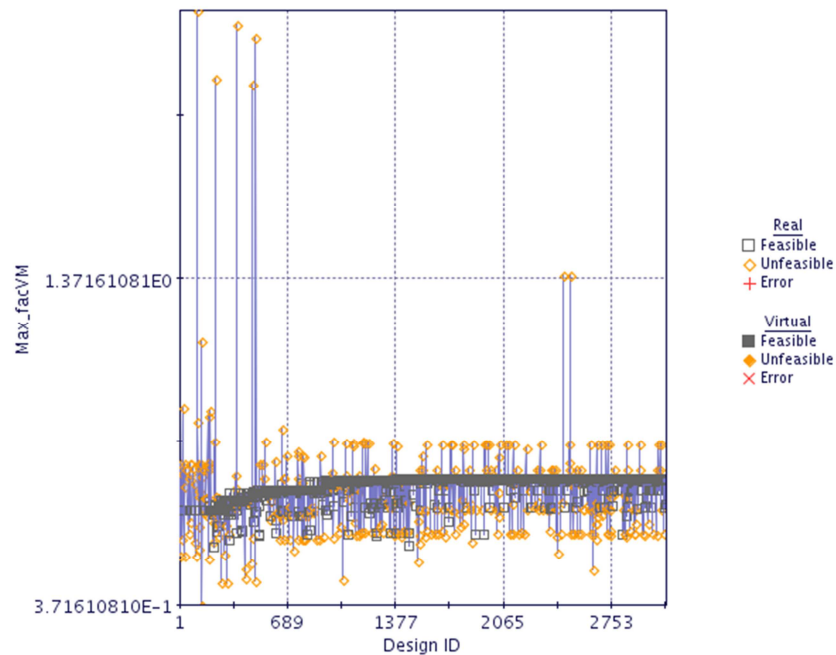
Figura 62 – Correlação entre as variáveis de projeto.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Na Figura 63 apresenta-se o histórico do processo na busca pelo máximo fator de utilização de tensão do *riser*. Observa-se que em torno da milésima simulação o algoritmo de busca já converge para a solução encontrada, entretanto a busca segue até três mil simulações. Há duas possíveis justificativas para esse comportamento. A primeira consiste na definição de uma população inicial muito próxima do ponto ótimo, facilitando o processo de busca. Outra possibilidade é a definição inadequada dos parâmetros definidos para o algoritmo de busca, havendo-se definido uma quantidade de gerações muito grande desnecessariamente. Seria então interessante o desenvolvimento de um estudo para avaliação dos parâmetros mais adequados, capazes de proporcionar uma melhor eficiência do processo de otimização e uma melhor qualidade dos resultados obtidos. Essa melhora pode ser obtida por meio da aplicação de uma metodologia de otimização híbrida bem como por uma abordagem ótima dos parâmetros do algoritmo genético (Leiras, 2010). Sugere-se esse estudo como trabalho futuro capaz de agregar contribuições importantes ao estudo aqui desenvolvido.

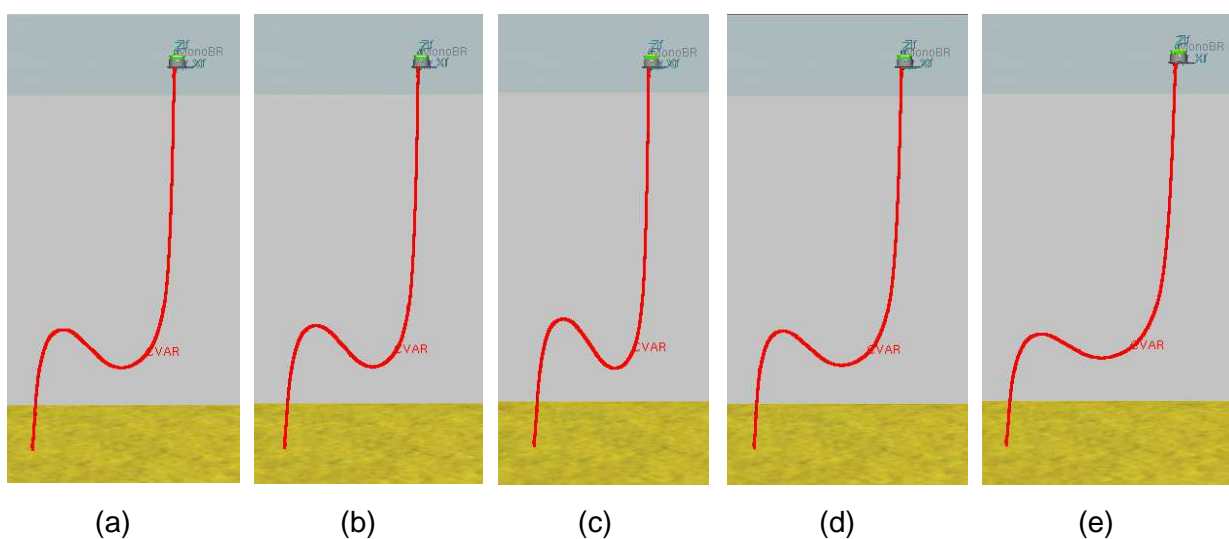
Figura 63 – Histórico do processo na busca pelo ponto ótimo.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

A Figura 64 apresenta a configuração ótima obtida por meio do processo de otimização da configuração de *risers* verticais complacentes formulado. São apresentadas na referida figura a configuração neutra do *riser*, a configuração quando nas posições *near* e *far* em condições de mar anual e centenária.

Figura 64 – Configuração ótima encontrada: (a) posição neutra; (b) *near* anual; (c) *near* centenário; (d) *far* anual; (e) *far* centenário.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

6.5.3 ANÁLISE MULTIOBJETIVO: MAXIMIZAÇÃO DO FATOR DE UTILIZAÇÃO DE TENSÃO E MINIMIZAÇÃO DO VOLUME

Em uma terceira abordagem, considera-se um problema multiobjetivo buscando-se o minimizar o fator de volume e maximizar o mínimo fator de utilização de tensão ao longo do *riser*. Essa abordagem é idealizada no intuito de alcançar o máximo aproveitamento do material e que, ao mesmo tempo, o mínimo volume de material seja necessário para obter uma configuração viável dentro dos critérios estabelecidos.

Nessa abordagem considera-se o seguinte problema de otimização:

$$\text{achar arg min}(f_{obj_III} = [f_{obj_I}, -f_{obj_{II}}]) \quad (40)$$

tal que

$$VME_{100} < 0,8 \sigma_{esc} \quad (41)$$

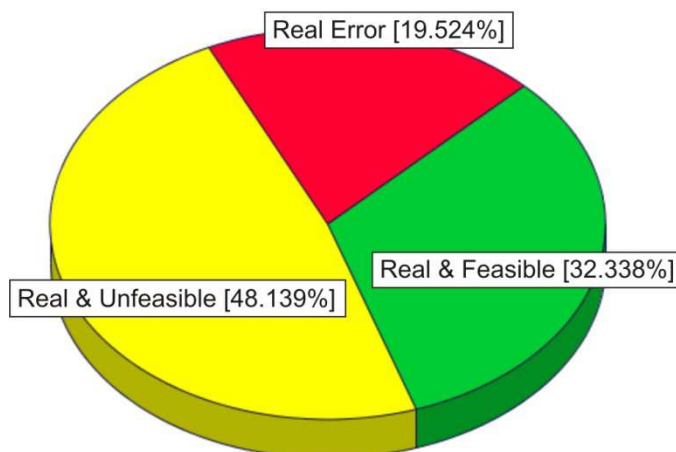
$$VME_1 < 0,67 \sigma_{esc} \quad (42)$$

$$FX > 0 \quad (43)$$

$$RC > 90 m \quad (44)$$

Apresenta-se na Figura 65 um resumo das simulações realizadas.

Figura 65 – Resumo das simulações realizadas.

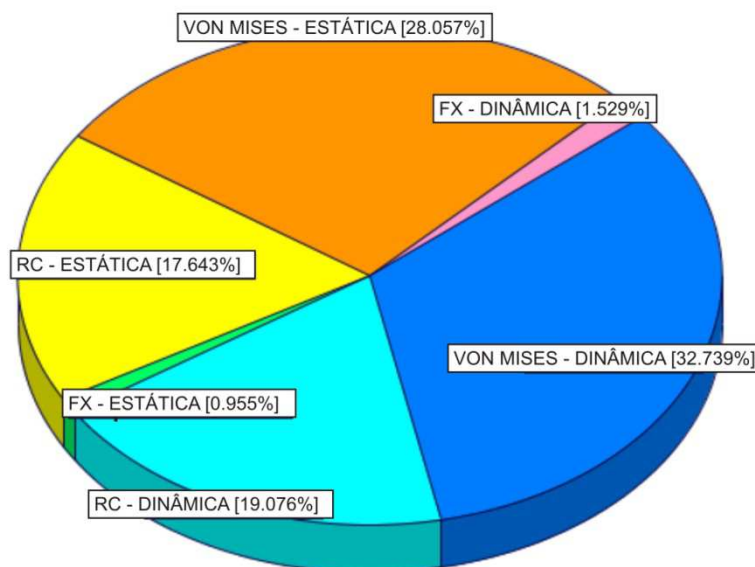


Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Das configurações identificadas como inviáveis, a Figura 66 quantifica proporcionalmente as restrições que são violadas. Assim como verificado para as demais abordagens, as restrições de tensão máxima e raio de curvatura mínimo são

as mais críticas ao problema. Também nesta abordagem verifica-se a grande quantidade de restrições que são violadas já na etapa de análise estática, tanto em termos de raio mínimo de curvatura quanto em tensão máxima.

Figura 66 – Proporção das quebras de restrição.

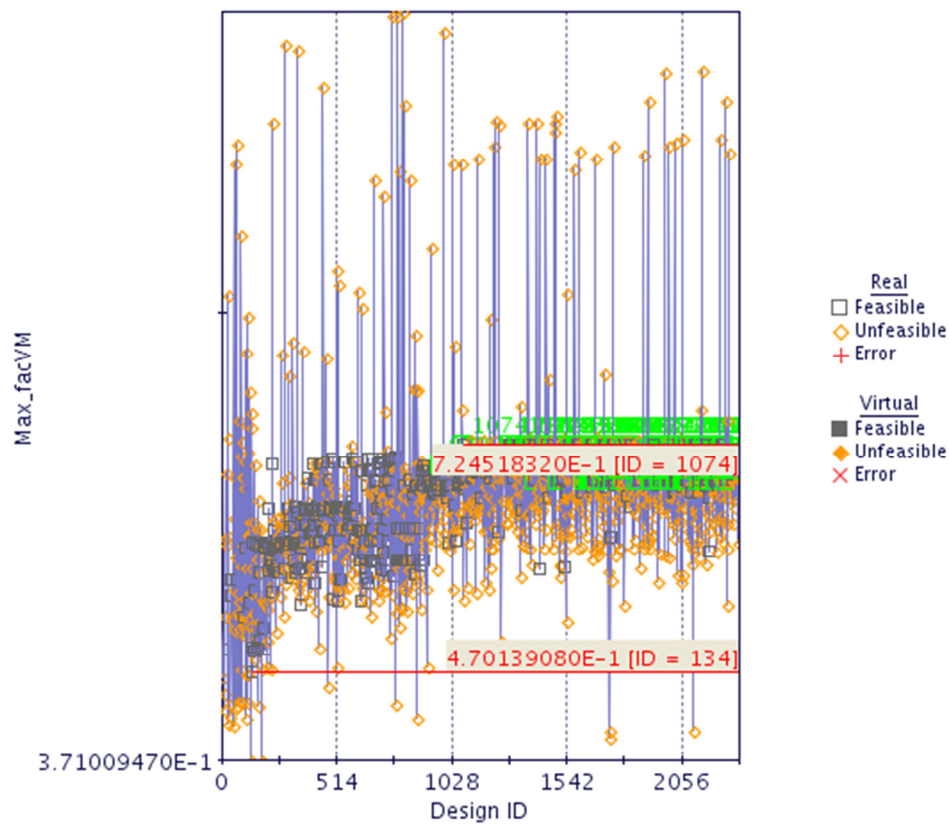


Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Na Figura 67 e na Figura 68 apresenta-se o histórico do processo otimização. Observa-se que o processo de busca inicia com exploração de uma região do espaço de busca com fator de utilização de tensão mais baixo e à medida que esse processo avança são encontradas configurações que resultam em valores mais altos dessa medida, o que é desejado, já que a intenção é maximizar esse fator de modo a garantir o melhor aproveitamento do material. O mesmo ocorre com o fator de volume. Inicialmente a exploração do espaço de busca resulta em configurações com um valor mais alto desse fator e ao longo do processo são encontrados valores mais baixos, conforme desejado.

É importante ressaltar o ganho obtido comparando-se os valores das medidas objetiva referentes à primeira configuração viável encontrada e a configuração ótima. Esses valores encontram-se destacados nas referidas figuras. Para o fator de utilização de tensão observa-se um ganho de cerca de 35%, enquanto para o fator de volume obtém-se um ganho de aproximadamente 46%.

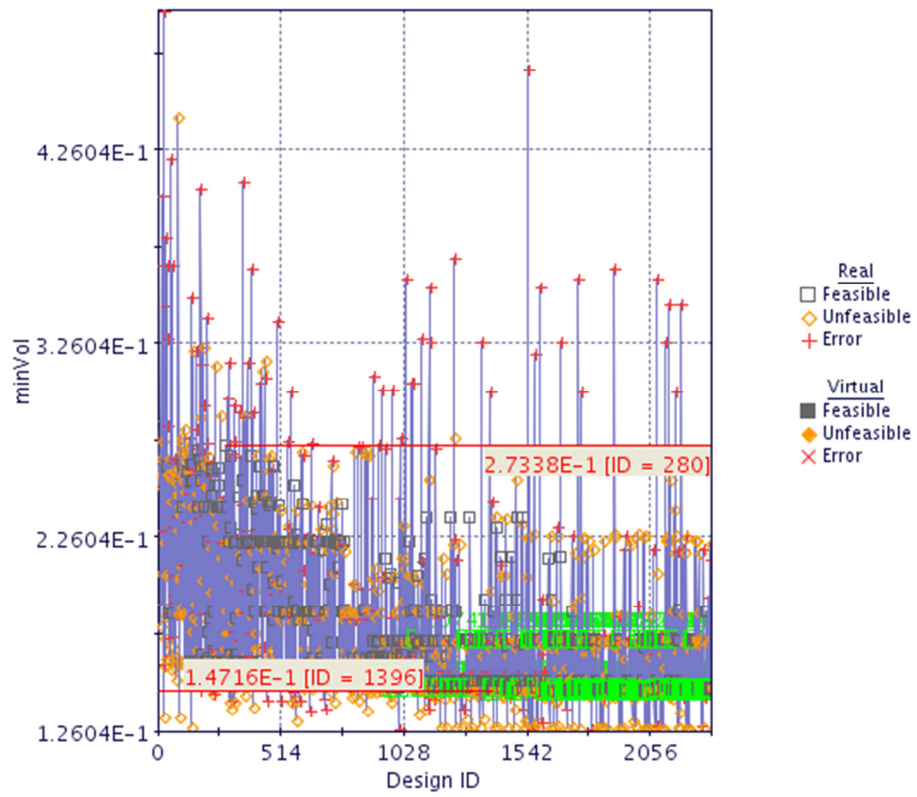
Figura 67 – Histórico do processo na busca pelo ponto ótimo.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

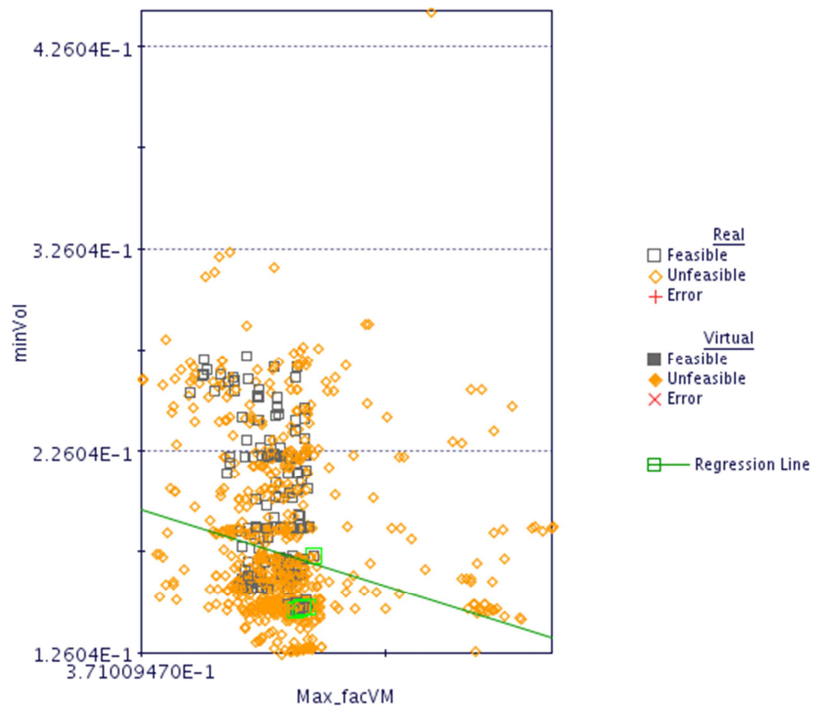
A Figura 69 apresenta o espaço objetivo da abordagem aqui realizada, no qual estão identificadas as configurações viáveis e não viáveis encontradas ao longo do processo de otimização. Na referida figura, as configurações destacadas em verde são aquelas pertencentes à fronteira de Pareto, ou seja, as soluções não dominadas. Diferentemente do esperado, a fronteira de Pareto encontrada não está bem delineada e não atende ao critério de diversidade desejado nas abordagens multiobjetivo em geral. Isso ocorre pelo fato das funções objetivo consideradas não serem conflitantes, tendo sido constatado que quanto menor o fator de volume maior é o fator de utilização de tensão. Com isso, na busca pelo fator de volume mínimo simultaneamente à busca pelo fator de utilização de tensão máximo, converge-se para soluções muito próximas.

Figura 68 – Histórico do processo na busca pelo ponto ótimo.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

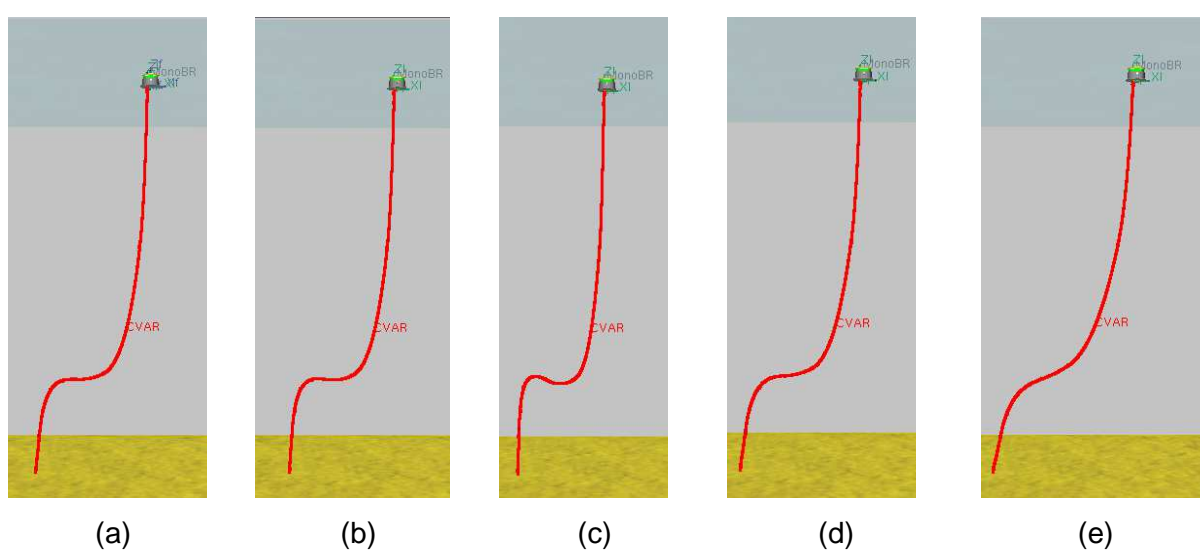
Figura 69 – Espaço objetivo do problema multiobjetivo analisado.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Conforme comentado anteriormente, em problemas multiobjetivo são obtidas diversas soluções de compromisso não dominadas. A escolha por uma solução específica é definida pela consideração de critérios adicionais. A título de exemplificação, das soluções de Pareto no presente caso de estudo, opta-se por aquela que resulta em um maior raio de curvatura mínimo. Essa configuração é apresentada na Figura 70.

Figura 70 – Configuração ótima encontrada: (a) posição neutra; (b) *near* anual; (c) *near* centenário; (d) *far* anual; (e) *far* centenário.



Fonte: Autor desta dissertação (2011)

6.5.4 COMPARAÇÃO DAS ABORDAGENS AVALIADAS

São apresentados na Tabela 13 os dados referentes à configuração ótima encontrada.

Tabela 13 – Dados da configuração ótima encontrada.

	Min. fator de volume	Máx. fator de tensão	Multiobjetivo
L_TSJ_base (m)	20	20	20
L_TSJ_topo (m)	20	20	20
L_liso (%)	60,44	15,66	40
OF (%)	7	22	7
dext (m)	0,33	0,33	0,32
dflut1 (m)	1,55	1,55	1,5
dflut2 (m)	1,25	1,25	1,22
dflut3 (m)	1,1	1,1	1,08
dflut4 (m)	0,95	0,95	0,94
dflut5 (m)	0,8	0,8	0,8

e_peso (m)	0,08	0,11	0,1
flut_tot (%)	34,6	44,33	30
liso_inf (%)	25	40	15
liso_sup (%)	5	5	5
pOffset (%)	40	50	40
peso (%)	5	40	30

Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Na Tabela 14 encontram-se os valores das restrições e das funções objetivo para a configuração ótima encontrada, onde *facVM* consiste no fator de utilização de tensão mínimo, *FX* é a mínima tração efetiva, *RC* é o raio de curvatura mínimo, *VME* é a máxima tensão e *facVol* é o fator de volume para essa configuração.

Tabela 14 – Valores da restrições e da função objetivo para a configuração ótima encontrada.

	Min. fator de volume	Máx. fator de tensão	Multiobjetivo
<i>facVM</i>	0,6224299	0,758727	0,70264
<i>FX (dinâmica) (kN)</i>	49,939755	76,33053	59,8122
<i>RC (dinâmica) (m)</i>	95,138	110,9364	110,42
<i>VME (dinâmica) (kN/m²)</i>	557177,5	426519,9504	494802,2
<i>facVol</i>	0,1869	0,268702	0,238654

Fonte: Autor desta dissertação (2011)

Observa-se que a minimização do fator de volume resultou em uma configuração geométrica com maior proporção de *riser* liso (*L_liso*) (60,44%), ou seja, sem flutuadores ou peso adicional. Essa diferença resultou da redução da proporção de revestimento pesado, quando comparado à configuração resultante da maximização do fator de utilização de tensão – para a configuração resultante da minimização do volume obteve-se uma proporção de revestimento pesado de 5%, enquanto que para a maximização do fator de tensão obteve-se uma proporção de 40%. Verifica-se que a otimização via minimização do fator de volume enfatizou mais a redução da proporção de revestimento pesado do que na redução da proporção de flutuadores. Isso se deve ao fato da redução de flutuadores causar mais impacto nas restrições, a partir do aumento das tensões e redução do raio de curvatura. Ainda comparando os resultados obtidos nas primeiras duas abordagens, observa-se que as variáveis referentes aos diâmetros dos flutuadores e

espessura do revestimento pesado são semelhantes para ambas as configurações ótimas encontradas.

De acordo com a Tabela 14 as restrições impostas não são violadas, uma vez que as trações efetivas encontradas são positivas e os raios de curvatura são maiores que 90 m, conforme previamente estabelecido. As tensões de von Mises máximas também são atendidas. Para as configurações ótimas obtidas as máximas tensões ocorreram na *stress joint* de base, composta por titânio, com tensão de escoamento equivalente a 758000 kN/m². Dessa forma, a tensão admissível estabelecida como 80% da tensão de escoamento, ou seja, 606400 kN/m², não é violada para nenhuma configuração ótima obtida.

7 CONCLUSÕES

Dado o constante aumento das profundidades de exploração, a utilização de configurações convencionais, a exemplo da catenária, tem se mostrado limitada. Dessa forma, para superar tais limitações e viabilizar a exploração em grandes profundidades, configurações alternativas vêm sendo estudadas. Este trabalho abordou uma destas alternativas, o *riser* vertical complacente.

A utilização desse tipo de configuração geométrica de *riser* traz dificuldades adicionais ao projeto, pois cresce muito o número de parâmetros a serem definidos pelo projetista. Com isso, aumenta a quantidade de possíveis soluções para o problema, crescendo, conseqüentemente, o tempo e esforço computacional requeridos para avaliar as possíveis soluções, via tentativa e erro, na busca por configurações viáveis e com boas características técnicas e operacionais. Essa dificuldade motiva o uso de otimização para definição de uma configuração ótima segundo as funções de mérito desejadas, garantindo que a mesma satisfaça todos os critérios de engenharia impostos e que isso ocorra da forma mais eficiente possível.

Tendo isso em vista, o presente trabalho teve como foco a aplicação de técnicas de otimização na busca da configuração ótima de *riser* verticais complacentes. Tal problema foi modelado no programa modeFRONTIER® (modeFRONTIER, 2011) que, acoplado ao Anflex (Anflex, 2009), possibilitou a obtenção da configuração ótima desejada. No modelo formulado foram consideradas análises estáticas e dinâmicas do *riser* sob condições ambientais extremas e de operação. Ressalta-se que a abordagem aqui realizada do projeto de *risers* trata-se apenas de uma pré-análise e não do dimensionamento completo propriamente dito. Demais etapas do projeto podem ser incorporadas ao processo de otimização ou deixadas apenas para uma etapa posterior de verificação final. Este estudo inicial, aqui apresentado, foi realizado no intuito de demonstrar a aplicabilidade da otimização ao projeto de *risers*, com bons indicativos de ganho de eficiência aliados a qualidade de resultados.

Em uma avaliação inicial do problema, previamente à análise de otimização, foi realizada uma análise de sensibilidade do modelo, tendo em vista uma melhor compreensão do comportamento estrutural do *riser* em estudo de modo a identificar

entre as variáveis de projeto inicialmente consideradas quais eram as mais significativas em termos de impacto na resposta de interesse. Por meio desse estudo verificou-se que para os diferentes parâmetros de resposta, diferentes valores de significância são obtidos para as variáveis de projeto, ou seja, cada variável tem um efeito particular em cada resposta de interesse. De modo geral, as variáveis que por meio deste estudo demonstraram ser mais significativas foram o diâmetro externo do *riser*, o diâmetro do flutuador, o *offset* horizontal do poço, o comprimento do trecho de flutuador e o *overlength fraction*.

O diâmetro externo do *riser* possui grande efeito na resposta uma vez que impacta diretamente no peso submerso da estrutura bem como na rigidez da mesma. Com o aumento do diâmetro a rigidez do duto aumenta, causando redução das tensões e das curvaturas ao longo do *riser*. Por outro lado, o aumento do diâmetro externo provoca o aumento do peso submerso da estrutura, aumentando conseqüentemente as tensões ao longo do *riser*. A variação do diâmetro externo possui influência também na força de arrasto, que consiste na força resistente ao movimento relativo entre o *riser* e a água. Com o aumento do diâmetro do *riser*, a área de contato com o fluido externo aumenta, aumentando a parcela de fricção que compõe a força de arrasto, o que contribui com um amortecimento da estrutura. Por fim, o aumento do diâmetro externo do *riser* aumenta o volume de água deslocada, que influencia diretamente na inércia do sistema.

O diâmetro e comprimento dos flutuadores também têm grande impacto no comportamento estrutural do *riser*. Com o aumento do volume do flutuador, causado pelo aumento destas duas variáveis, verifica-se a redução do peso suspenso da estrutura das curvaturas ao longo do *riser* e com isso a redução das tensões e aumento do raio de curvatura. Entretanto o aumento do volume do flutuador resulta no aumento da tração efetiva na região inferior do *riser* o que pode resultar em tensões elevadas. Em relação ao *overlength fraction*, que determina o comprimento total do *riser*, verifica-se que, quando em *near*, quanto mais curta a linha menores são as tensões, uma vez que o raio de curvatura será maior. Em contrapartida, uma linha curta provoca grande esforço de tração no topo do *riser* quando esse se encontra na posição relativa *far*. Dessa forma, é preciso dimensionar o comprimento do *riser* de modo que o mesmo seja longo o suficiente para evitar elevado esforço de tração e atender ao critério de tensão no topo na condição *far* sem gerar grandes curvaturas quando em *near*. Sendo assim, o processo de otimização deve buscar

valores para essas variáveis de modo a obter um equilíbrio desses efeitos, obtendo-se o melhor comportamento do *riser* dentro das medidas objetivas e parâmetros restritivos estabelecidos para o modelo formulado.

Da mesma forma também foi possível identificar as variáveis pouco significantes ao modelo, ou seja, aquelas que causam pouco impacto em todos os parâmetros de resposta avaliados, sendo elas: comprimento da *stress-joint* da base, comprimento da *stress-joint* do topo e proporção do trecho de *riser* superior. Uma vez que possuem pouco efeito na resposta, estas variáveis foram aqui consideradas constantes, o que possibilitou uma redução do espaço de busca do problema de otimização, proporcionando uma diminuição da complexidade do problema e do tempo de obtenção da resposta ótima.

Para a análise de otimização foi aplicado um algoritmo genético com elitismo, o NSGA-II. Optou-se por tal método com base em aplicações bem sucedidas do mesmo em outros estudos já realizados na literatura. Como medidas objetivas de eficiência para guiar o processo de busca, foram avaliadas três diferentes funções objetivo. A primeira abordagem buscou a configuração com o menor volume de material capaz de atender às restrições operacionais e de integridade estruturais impostas. Nessa primeira avaliação, obteve-se uma redução de 37% no volume de material. A segunda consistiu na maximização do menor fator de utilização de tensão ao longo do *riser*. Com esta abordagem buscou-se o aproveitamento estrutural máximo do material, independente da quantidade de material necessário, buscando sempre atender às restrições impostas. Uma terceira abordagem considerou simultaneamente esses dois primeiros objetivos, obtendo ao final do processo uma redução de 46% do volume de material e um ganho de 36% no fator de utilização de tensão. De acordo com os resultados obtidos observou-se que tais objetivos são não conflitantes e que, dessa forma, a redução do volume de material tende a maximizar o fator de utilização de tensão. Ainda assim, para a abordagem multiobjetivo foram obtidas diferentes soluções de compromisso. Entre as soluções obtidas, optou-se por aquela que resultou em um maior raio de curvatura mínimo, no intuito de facilitar as operações de *workover*.

Logo, o projeto de *risers* a partir da aplicação da metodologia de otimização pode resultar em diferentes configurações ótimas. Cabe ao projetista definir qual medida de eficiência deseja otimizar e quais critérios precisam ser considerados no projeto para garantir a viabilidade técnica e econômica da estrutura.

Destaca-se que como contribuição a essa literatura específica de otimização de *risers*, o presente trabalho apresenta o estudo e aplicação da otimização no dimensionamento de uma nova configuração, o CVAR, englobando a avaliação tanto estática quanto dinâmica do *riser*. O problema de otimização foi avaliado a partir de diferentes funções objetivo, uma baseada na minimização do volume dos materiais utilizados, outra baseada em critérios estruturais, avaliando o fator de utilização de tensão dinâmica e uma terceira avaliando uma função multiobjetivo, combinando as funções minimização de volume e maximização do fator de utilização de tensão dinâmica. Uma contribuição adicional do presente trabalho é a análise de sensibilidade quanto ao comportamento do CVAR em termos de suas variáveis de dimensionamento. Essa análise foi realizada por meio de técnicas estatísticas de planejamento de experimentos e análise de significância, o que permitiu compreender melhor o comportamento estrutural do CVAR bem como identificar as variáveis de projeto mais relevantes ao dimensionamento desse tipo de estrutura.

De modo geral, os problemas reais de engenharia são complexos e difíceis de modelar. São geralmente problemas não lineares representados por funções multimodais e não contínuas. No contexto de dimensionamento de estruturas *offshore*, a exemplo dos *risers*, enfatiza-se então a importância do estudo e aplicação de técnicas de otimização. Nessa área, na qual as possibilidades de configuração são inúmeras e onde são necessárias dispendiosas e numerosas simulações numéricas, a abordagem do problema a partir de técnicas de otimização vem a automatizar o processo de projeto. Dessa forma, torna-se possível obter uma resposta considerada ótima em termos de uma determinada função de mérito pré-estabelecida, capaz de garantir a viabilidade técnica e econômica do sistema dimensionado, no menor tempo possível.

7.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho pode ser aprimorado e estendido em diversas maneiras a partir de estudos adicionais e da incorporação de outros critérios ao processo de otimização formulado. Algumas sugestões de trabalhos futuros são listadas na sequência:

1. Avaliação da influência das condições ambientais, como profundidade, *offset* estático, ondas e corrente. A partir desse estudo seria possível identificar as

condições ambientais mais favoráveis para a utilização de *risers* verticais complacentes, podendo-se então definir para qual tipo de locação essa configuração é mais indicada.

2. Avaliação do comportamento de *risers* verticais complacentes acoplados a diferentes tipos de plataforma, no intuito de identificar quais são as mais indicadas para essa configuração específica.

3. Incluir ao processo de otimização as análises de fadiga, instalação, interferência e critérios de confiabilidade, visando obter uma análise mais completa do *riser*.

4. Aplicação da metodologia de superfície de resposta de modo a proporcionar uma maior eficiência ao processo de otimização.

5. Aplicação da análise de robustez para verificação da estabilidade da resposta obtida, visando garantir a obtenção de respostas pouco sensíveis a pequenas variações das variáveis de projeto em torno do ponto ótimo encontrado.

6. Estudo da resolução do modelo formulado a partir de diferentes métodos de otimização, no intuito de identificar qual o método mais indicado em termos de menor custo computacional associado a melhor qualidade dos resultados.

7. Estudo do desempenho dos métodos evolutivos a partir da variação dos parâmetros inerentes ao método (probabilidade de cruzamento e de mutação, número de gerações e tamanho da população), de modo a identificar uma faixa de valores mais adequada para a aplicação em estudo.

REFERÊNCIAS

- ABS - AMERICAN BUREAU OF SHIPPING, 2005. *Guide for Building and Classing Subsea Riser Systems*.
- ALBRECHT, C.H., 2005. *Algoritmos evolutivos aplicados à síntese e otimização de sistemas de ancoragem*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- AMORIM, E.A., 2006. *Fluxo de Potência Ótimo em Sistemas Multimercados Através de um Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo*. Tese de D.Sc., Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, Ilha Solteira, São Paulo, Brasil.
- ANDRADE, E.Q., AGUIAR, L.L., SENRA, S.F., SIQUEIRA, E.F.N., TORRES, A.L.F.L., MOURELLE, M.M., 2010. *Optimization Procedure of Steel Lazy Wave Riser Configuration for Spread Moored FPSOs in Deepwater Offshore Brazil*, “Annual Offshore Technology Conference”, OTC Paper No. 20777, Houston, Texas, EUA.
- ANFLEX, 2009. *Análise Não Linear de Risers e Linhas de Ancoragem*. Versão 7.1.1 r2.2, PETROBRAS / CENPES, Rio de Janeiro, RJ.
- API RP-2RD, 1998. *Design of Risers for Floating Production Systems (FPSs) and Tension-Leg Platforms (TLPs)*, 1º ed., American Petroleum Institute, Washington, EUA.
- API-RP-1111, 1999. *Design, Construction, Operation, and Maintenance of Offshore Hydrocarbon Pipelines (Limit State Design)*. American Petroleum Institute, Washington, EUA.
- ARROYO, J.E.C., 2002. *Heurísticas e Metaheurísticas para Otimização Combinatória Multiobjetivo*. Tese de D.Sc., Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, SP, Brasil.
- AUBAULT, A., CERMELLI, C., RODDIER, D., 2007. *Parametric Optimization of a Semi-Submersible Platform With Heave Plates*. “Proceedings of the 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering”, OMAE paper nº29391, San Diego, California, EUA.

- AUGUSTO, O.B., ANDRADE, B.L.R., ROSSI, R.R., 2002. *Otimização de Recursos para a Operação de Instalação de Âncoras de Equipamentos Offshore*. "Pesquisa Operacional", v. 22, n. 3, p. 305-322.
- AZUMA, R.M., 2011. *Otimização Multiobjetivo em Problema de Estoque e Roteamento Gerenciados pelo Fornecedor*. Tese de M.Sc., Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Departamento de Engenharia de Computação e Automação Industrial, Campinas, SP, Brasil.
- BAI, Y., 2001. *Pipeline and risers*. Elsevier, volume 3; Stavanger University College, Norway; and American Bureau of Shipping, Houston.
- BAIOCO, J.S., 2011. *Síntese e Otimização de Rotas de Dutos Submarinos Considerando Critérios de Estabilidade Hidrodinâmica*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- BARBOSA, A.M., RIBEIRO, L.C., ARANTES, J.M.O., 2010. *Algoritmo Genético Multiobjetivo: Sistema Adaptativo Com Elitismo*, "9th Brazilian Conference on Dynamics, Control and their Applications", Serra Negra, São Paulo, Brasil.
- BARDALES, K.L.N., 2007. *Otimização Energética da Operação de um Sistema Adutor de Água Tratada Utilizando Algoritmos Evolucionários Multiobjetivo*. Tese de M.Sc., Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Campo Grande, MS, Brasil.
- BARDANACHVILI, C.A., 2006. *Otimização Multiobjetivo com Estratégias Evolutivas Aplicada a Projetos Estruturais*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- BELL, J.M., CHIN, Y.D., HANRAHAN, S., 2005. *State-of-the-Art of Ultra Deepwater Production Technologies*, "Annual Offshore Technology Conference", OTC Paper No. 17615, Houston, Texas, EUA.
- BERBERT, P.C., 2008. *Sistema Imunológico Artificial para Otimização Multi-Objetivo*. Tese de M.Sc., Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil.
- BHAT, S., ANDERSEN, D., BASU, S., 2006. *Deepwater Field Development Systems with Compliant Vertical Access Risers*, "Annual Deep Offshore Technology Conference - DOT", Houston, Texas, EUA.

- BRINKMANN, C.R., WHOOLEY, K.T, 2002. *Design Study of a Deepwater Compliant Vertical Access Riser for the Gulf of Mexico*, "Proceedings of the ASME 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering", OMAE Paper No. 28470, Oslo, Noruega.
- BROGAN, M.A., WASSERMAN, K.S., 2003. *Tension Leg Platform Design Optimization for Vortex Induced Vibration*. "OCEANS 2003 IEEE/MTS Proceedings", n. SP2894, v. 5, San Diego, California, EUA.
- BUENO, F., 2009. *Métodos Heurísticos: Teoria e Implementações*. Tutorial, Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC/Araranguá, Brasil.
- BURGOS, D.F.S., 2008. *Técnica de Otimização Multiobjetivo Aplicada ao Projeto Preliminar de Navios Petroleiros*. Tese de M.Sc., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, São Paulo-SP, Brasil.
- CARVALHO JR., S.M., 2002. *Sistema Computacional para Projeto Otimizado de Pontes Estaiadas*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- CASTRO, L.N., VON ZUBEN, F., 2004. *Recent Developments In Biologically Inspired Computing*. Idea Group Publishing.
- CASTRO, R.E., 2001. *Otimização de Estruturas com Multiobjetivos Via Algoritmos Genéticos*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- CIRILLO, A. M.; FERREIRA, D. F., 2003. *Extension of the Univariate Normality Test Based on Quantil-Quantil Correlation Coefficient for the Multivariate Dimension*. *Revista de Matemática e Estatística*, São Paulo, v.21, n.3, p. 67-84.
- COELHO, G. A. G.; AFONSO, S. M. B.; HOROWITZ, B., 2011. *Estudos Iniciais para a Construção de uma Ferramenta de Seleção Automática de Parâmetros dos Algoritmos Genéticos*. *Anais do XXXII CILAMCE*; v. 1, p. 1-11, Ouro Preto, MG, Brasil.
- COELLO, C. A. C., 2006. *Evolutionary Multi-Objective Optimization: A Historical View of the Field*. "IEEE Computational Intelligence Magazine", v. 1, n. 1, p. 28–36.
- COELLO, C.A.C., LAMONT, G.B.L., VELDHUIZEN, D.A.V., 2007. *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*. Springer, 2 Ed.

- COHON, J.L., 2004. *Multiobjective Programming and Planning*. Courier Dover Publications.
- CORTÊS, C.F.M., 2002. *Otimização de Treliças Planas*. Tese de M.Sc., Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Civil, Campinas-SP, Brasil.
- CUCO, A.P.C., SOUSA, F.L., VLASSOV, V.V., NETO, A.J.S., 2011. *Multi-Objective Design Optimization of a New Space Radiator*. “Optimization and Engineering”, v. 12, n. 3, p. 393-406.
- DE JONG, K., 2006. *Evolutionary Computation - a Unified Approach*. MIT Press, Cambridge, Volume 4.
- DEB, K., 2001. *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. John Wiley & Sons, New Jersey.
- DEB, K., PRATAP, A., AGARWAL, S., MEYARIVAN, T., 2002. *A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II*. “IEEE Transactions on Evolutionary Computation”, v. 6, n. 2, p. 182–197.
- DEB, K., 2005. *Optimization for Engineering Design: Algorithms and Examples*. Prentice Hall of India Private Limited, New Delhi. Eighth Printing.
- DORIGO, M., 1992. *Optimization, Learning and Natural Algorithms*, Tese de D.Sc., Politecnico di Milano, Itália.
- DORIGO, M., MANIEZZO, V., COLORNI, A., 1996. *Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents*, “IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics–Part B”, v. 26, n. 1, p. 29–41.
- DNV (DET NORSKE VERITAS), 2001. *Offshore Standard DNV OS-F201 – Dynamic Risers*. Hovik, Noruega.
- EXAME, 2008. *A Bilionária Saga do Pré-sal*. Disponível na internet em: <http://portalexame.abril.com.br/revista/exame/edicoes/0925/negocios/m0166374.html>. Acesso em 22 de setembro de 2010.
- FALKENAUER, E., 1999. *The worth of uniform*, “Proc. IEEE Congress on Evolutionary Computation”, p. 776-782.
- FALLER, A.C., 2009. *Desenvolvimento de uma Plataforma para Otimização da Produção em Tempo Real em Campos de Petróleo Operados por Gas-Lift*.

Monografia de Graduação, Universidade Federal de Santa Catarina, Curso de Engenharia de Controle e Automação Industrial, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

FISHER, R.A., 1971. *The Design of Experiments*. Macmillan, 9 Ed.

FONSECA, C.M.; FLEMING, P.J., 1993. *Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization*. "Proceedings of the International Conference on Genetic Algorithms", San Mateo, USA.

FONSECA, C.M., 2003. *Evolutionary Multi-Criterion Optimization*, Second International Conference, Faro, Portugal, v. 2.

FONSECA, L.G., 2009. *Algoritmos Genéticos Assistidos por Metamodelos Baseados em Similaridade*. Tese de D.Sc., Laboratório Nacional de Computação Científica – Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Petrópolis, RJ, Brasil.

FROUFE, L., 2006. *Análise Comparativa de Critérios de Dimensionamento de Risers Rígidos*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

GÓES, A.R.T., 2005. *Otimização na Distribuição da Carga Horária de Professores – Método Exato, Método Heurístico, Método Misto e Interface*. Tese de M.Sc., Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia – Programação Matemática, Setores de Tecnologia e de Ciências Exatas da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil.

GOLDBERG, D. E., 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley Longman Publishing, 1, Ed, Boston, EUA.

GOMES, M.V.C., 2007. *Otimização Sequencial por Aproximações – Uma Aplicação em Tempo Real para o Refino de Petróleo*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

GRANHERNE, 2009. *Compliant Vertical Access Riser – Risk Assessment Study - Final Report*. Mineral Management Service project number: 536; Granherne project number: j51025. Houston, Texas, EUA.

GRANT, R.G., LITTON, R.W., MAMIDIPUDI, P., 1999. *Highly Compliant Rigid (HCR) Riser Model Tests and Analysis*. "Annual Offshore Technology Conference", OTC Paper No. 10973, Houston, Texas, EUA.

- GRANT, R.G., LITTON, R.W., FINN, L., MAHER, J., LAMBRAKOS, K., 2000. *Highly Compliant Rigid Risers: Field Test Benchmarking a Time Domain VIV Algorithm*. "Annual Offshore Technology Conference - OTC", Paper No. 11995, Houston, Texas, EUA.
- GUARIZE, R., MATOS, N.A.F., SAGRILO, L.V.S., LIMA, E.C.P., 2007. *Neural Networks in the Dynamic Response Analysis of Slender Marine Structures*. "Applied Ocean Research", v. 29, p. 191–198.
- HAFTKA, R. T., GÜRDAL Z., 1992. *Elements of structural optimization*. Springer, Ed 3, Netherlands.
- HAWKINS, D., LYE, L.M., 2006. *Use of DOE Methodology for Investigating Conditions that Influence the Tension in Marine Risers for FPSO Ships*. "1st International Structural Specialty Conference". Calgary, Alberta, Canada.
- HINTON, E., SIENZ, J., 1995. *Fully stressed topological design of structures using an evolutionary procedure*, "Engineering Computations", v. 12, n: 3, p. 229–244.
- HOLLAND, J. H., 1992. *Adaptation in natural and artificial systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor.
- HORN, J., NAFPLIOTIS, N., 1993. *Multiobjective Optimization Using the Niche Pareto Genetic Algorithm*. IlliGAL Report No. 93005, Illinois Genetic Algorithms Laboratory, University of Illinois, Urbana, Champaign.
- I-ET-3A26.00-1000-941-PPC-001, 2008. *Cenpes Metocean Data, Santos Basin BM-S Cluster Region; Units And Production Systems*.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2004. *ISO 13628-11: petroleum and natural gas industries — design and operation of subsea production systems – Part 11: flexible pipe systems for subsea and marine applications*.
- IRANZO, M. M.; HERRERO, J. M.; SANCHIS, J.; BLASCO, X.; GARCIA-NIETO, S., 2009. *Applied Pareto Multi-Objective Optimization by Stochastic Solvers*. "Engineering Applications of Artificial Intelligence", v. 22, p. 455–465.
- ISHIDA, K., OTOMO, K., HIRAYAMA, H., OKAMOTO, N., NISHIGAKI, M., OZAKI, M., 2001. *An FPSO With Surface Wells and Workover System in*

- Deepwater*, “Annual Offshore Technology Conference”, OTC Paper No. 12990, Houston, Texas, EUA.
- KANG, Y., DUAN, M., CHEN, B., 2011. *Optimization Design of Subsea Christmas Tree Pipeline*. “International Journal of Energy Engineering”, v. 1, n. 1, p. 12-18.
- KENNEDY, J., EBERHART, R.C., 1995. *Particle Swarm Optimization*, “Proceedings IEEE, IV Conference on Neural Networks”, p. 1942-1948.
- KONAK, A., COIT, D.W., SMITH, A.E., 2006. *Multi-Objective Optimization Using Genetic Algorithms: A Tutorial*. “Reliability Engineering and System Safety”, v. 91, n. 9, p. 992–1007.
- LARSEN, C.M.; HANSON, T., 1999. *Optimization of Catenary Risers*: “Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering”, v.121, n. 2, p. 90-94.
- LECHETA, E.M., 2004. *Algoritmos Genéticos para Planejamento em Inteligência Artificial*. Tese de M.Sc., Curso de Pós-Graduação em Informática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil.
- LEIRAS, A., 2010. *Otimização de Parâmetros de um Algoritmo Genético*. “RICA - Revista de Inteligência Computacional Aplicada”, nº 6, p.1-7.
- MADEIRA, M.G., 2005. *Comparação de Técnicas de Análise de Risco Aplicadas as Desenvolvimento de Campos de Petróleo*. Tese de M.Sc, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, São Paulo, Brasil.
- MAHFOUD, S W., 1995. *Niching Methods for Genetic Algorithms*. Tese de D.Sc, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- MAISONNEUVE, J.J, HARRIES, S., MARZI, J., RAVEN, H.C, VIVIANI, U., PIPPO, H., 2003. *Towards Optimal Design of Ship Hull Shapes*. “8th International Marine Design Conference IMDC’03”, Atenas, Grécia.
- MARTINS, M.A.L., 2008. *Avaliação das Metodologias de Projeto de Risers Rígidos*. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Alagoas, Maceió-AL, Brasil.
- MARTINS, M.R., BURGOS, D.F.S., 2011. *Multi-Objective Optimization Design of Tanker Ships via a Genetic Algorithm*. “Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering”. v. 133, n. 4.

- MATTA, P.S., 2007. *Aplicação de Algoritmos Genéticos para a Otimização da Produção em Poços de Petróleo Canhoneados*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- MENDONÇA, C.E.L.R., 2004. *Um Sistema Computacional para Otimização Através de Algoritmos Genéticos e Redes Neurais*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MODEFRONTIER, 2011. *The Multi-objective Optimization and Design Environment*. Versão 4.4.
- MONTEIRO, B.F., 2008. *Aplicação do Método do Enxame de Partículas na Otimização de Sistemas de Ancoragem de Unidades Flutuantes para Exploração de Petróleo Offshore*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- MONTGOMERY, D.C., 2001. *Design and Analysis of Experiment*. Nova York, EUA, John Wiley & Sons, 5 Ed.
- MONTGOMERY, D.C., RUNGER, G.C., 2009. *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*. Rio de Janeiro, RJ, LTC, 4 Ed.
- MUNGALL, C., HAVERTY, K., BHAT, S., ANDERSEN, D., SARKAR, I., WU, J., MÅRTENSSON, N., 2004. *Semi-submersible Based Dry Tree Platform with Compliant Vertical Access Risers*, "Annual Offshore Technology Conference", OTC Paper No. 16199, Houston, Texas, EUA.
- MUELLER, K. M., LIU, M., BURNS, S. A., 2002. *Fully Stressed Design of Frame Structures and Multiple Load Paths*. "Journal of Structural Engineering", v. 128, n. 6, p. 806-814.
- MYERS, R.H., MONTGOMERY, D.C., 1995, *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. Toronto, Canada, John Wiley and Sons.
- NICOLA, G., MOGLIE, M., PACETTI, M., SANTORI, G., 2010. *Bioenergy II: Modeling and Multi-Objective Optimization of Different Biodiesel Production Processes*. "International Journal of Chemical Reactor Engineering", v. 8, n A16.

- OLIVEIRA, L.S., SARAMAGO, S.F.P., 2004. *Otimização Multi-Critérios Aplicada a um Problema Dinâmico*. 14° POSMEC – Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. FEMEC/UFU, Uberlândia-MG.
- OLIVEIRA, L.S., 2005. *Uma Contribuição ao Estudo dos Métodos de Otimização Multi-objetivo*. Tese de M.Sc, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.
- OLIVEIRA, M.C., 2008. *Offshore Platforms Sizing Optimization through Genetic Algorithms*, “Deep offshore technology conference - DOT”, Perth, Austrália.
- PEARCE, J.L., SIZER, P.S., GANO, J.C., YONKER, J.H., THURMAN, R.L., O’SULLIVAN, J.F., SIMPSON, D.M., ROBERTS, R.A., HEALEY, A.J., NOOTEBOOM, U.G., 1988. *Method and System for Maintenance and Servicing of Subsea Wells*. United States Patent 4,730,677.
- PINA, A.A., ALBRECHT, C.H., LIMA, B.S.L.P., JACOB, B.P., 2011. *Tailoring the particle swarm optimization algorithm for the design of offshore oil production risers*. “Optimization and Engineering”, v. 12, n. 1-2, p. 215-235.
- PINHO, A.F., MONTEVECHI, J.A.B., MARINS, F.A.S., 2007. *Análise da Aplicação de Projeto de Experimentos nos Parâmetros dos Algoritmos Genéticos*. “Sistemas & Gestão”, v. 2, n. 3, p. 319-331.
- RAO, S.S., 2009. *Engineering Optimization: Theory and Practice*. New Jersey, John Wiley & Sons, 4 Ed.
- RODRIGUES, M.I., IEMMA, A.F., 2009. *Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos*. Campinas, SP, Cárita editora, 2ª Ed.
- RODRIGUES, G.J.O., 2004. *Ferramentas Computacionais para Otimização e Síntese de Sistemas Híbridos de Risers Baseados no Conceito de Bóia de Subsuperfície*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- ROSA, V.R., 2006. *Otimização em Localização de Plataformas de Produção*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- ROYSTON, J. P, 1983. *Some techniques for assessing multivariate normality based on the Shapiro-Wilk W*. “Applied Statistics”, v. 32, n. 2, p. 121–133.

- SAMPAIO, P.R., 2011. *Teoria, Métodos e Aplicações de Otimização Multiobjetivo*. Tese M.Sc., Instituto de Matemática e Estatística da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- SCHAFFER, J.D., 1984. *Multiple Objective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms*, Ph.D. dissertation, Vanderbilt University.
- SHAFIEEFAR, M., REZVANI, A., 2007. *Mooring Optimization of Floating Platforms Using a Genetic Algorithm*. "Ocean Engineering", v. 34, n. 10, p. 1413-1421.
- SHAPIRO, S.S.; Wilk, M.B., 1965. *An analysis of variance test for normality (complete samples)*. "Biometrika", v. 52, n. 3/4, p. 591-611.
- SILVA, W.B., 2008. *Otimização de Sistemas Ativos de Isolamento Térmico Multicamadas*. Tese de M.Sc., Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil.
- SOARES, L.G., 1997. *Algoritmos genéticos: estudo, novas técnicas e aplicações*. Tese de M.Sc., Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.
- SONG, C.Y., LEE, J., CHOUNG, J.M., 2010. *Reliability-Based Design Optimization of an FPSO Riser Support Using Moving Least Squares Response Surface Meta-Models*. "Ocean Engineering", v. 38, n. 2-3, p. 304-318.
- SOUZA, J.N.M., 2010. *Modelagem e Simulação de Escoamento Multifásico em Dutos de Produção de Óleo e Gás Natural*. Tese de D.Sc., Programa de Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos - UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- SPARKS, C.P., 2007. *Fundamentals of Marine Riser Mechanics: Basic Principles and Simplified Analysis*. Pennwell Books, EUA.
- SPOGIS, N., 2007. *Desenvolvimento de um Impelidor de Alta Eficiência Através da Dinâmica dos Fluídos Computacional e Otimização Multi-objetivo*, Tese de D.Sc., Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil.

- SRINIVAS, N., DEB, K., 1994. *Multi-objective Function Optimization Using Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm*, "Evolutionary Computation", v.2, n. 3, p. 221-248.
- TANAKA, R.L., 2009. *Otimização da Configuração de Risers Rígidos*. Tese de D.Sc., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, São Paulo, Brasil.
- TIMMIS, J., 2000. *Artificial Immune Systems: a Novel Data Analysis Technique Inspired by the Immune Network Theory*. Tese de D.Sc., University of Wales, Aberystwyth, Reino Unido.
- TOTAL, 2010. *Dalia, an offshore giant*. Disponível na internet em: <http://www.total.com/en/our-energies/oil/exploration-and-production/projects-and-achievements/dalia-940847.html>. Acesso em 04 de setembro de 2010.
- VAILLANT, A.G., 2007. *Estudo Comparativo de Análises no Domínio do Tempo e da Frequência em Risers Flexíveis*. Tese de M.Sc., Universidade Federal de Ouro Preto – Departamento de Engenharia Civil, Ouro Preto-MG, Brasil.
- VALOR ECONÔMICO, 2010. *Brasil Vira o Grande Pólo do Petróleo em Águas Profundas*. "Revista Brasileira de Tecnologia e Negócios de Petróleo, Gás, Petroquímica, Química Fina e Indústria do Plástico". Disponível na internet em: <http://www.tnpetroleo.com.br/clipping/6091/brasil-vira-o-grande-polo-do-petroleo-em-aguas-profundas>. Acesso em 19 de julho de 2011.
- VIEIRA, I.N., 2009. *Algoritmos Bio-Inspirados Aplicados à Otimização de Risers Rígidos em Catenária*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- VIEIRA, L.T., 2008. *Otimização de Sistemas de Risers para Exploração de Petróleo Offshore Através de Algoritmos Genéticos Paralelos*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- WANG, G.G., DONG, Z., AITCHISON, P., 2001. *Adaptive Response Surface Method - A Global Optimization Scheme for Computation-intensive Design Problems*. "Journal of Engineering Optimization", v. 33. n. 6, p. 707-734.
- WANG, G.G., S. SHAN, S., 2007. *Review of Metamodeling Techniques in Support of Engineering Design Optimization*. "Journal of Mechanical Design", v. 129, n. 4, p. 370-380.

- WASSERMAN, P., 1989. *Neural Computing Theory and Practice*. Van Nostrand Rheinhold, Nova York, EUA.
- YANG, H., LI, H., 2010. *Optimization Design for Deepwater Risers with Fatigue Constraints*. "Proceedings of the Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference". Beijing, China.
- YANG, H.Z., ZHENG, W., 2011. *Metamodel Approach for Reliability-Based Design Optimization of a Steel Catenary Riser*. "Journal of Marine Science and Technology", v.16, p. 202-213.
- ZITZLER, E., DEB, K., THIELE, L., 2000. *Comparison of Multiobjective Evolutionary Algorithms: Empirical Results*. "Evolutionary Computation", v. 8, n. 2, p.173–95.
- ZITZLER, E., THIELE, L., 1999. *Multi-Objective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach*, "IEEE Transactions on Evolutionary Computation", v. 3, n. 4, p. 257-271.