



**Marcus Ferrari Duarte de Oliveira**

**Análise da Aplicação de um Sistema de  
Bombeamento Multifásico Submarino na  
Produção de Petróleo**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientadores: Prof. Marcos Sebastião P. Gomes  
Dr. Elisio Caetano Filho

Rio de Janeiro  
Agosto de 2003



**Marcus Ferrari Duarte de Oliveira**

**Análise da Aplicação de um Sistema de  
Bombeamento Multifásico Submarino na  
Produção de Petróleo**

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

**Prof. Marcos Sebastião P. Gomes**

Orientador

Departamento de Eng. Mecânica - PUC-Rio

**Dr. Elisio Caetano Filho**

Orientador

Petróleo Brasileiro S.A. – Petrobras/Cenpes

**Dr. Iberê Nascentes Alves**

Petróleo Brasileiro S.A. – Petrobras/E&P

**Profa. Monica Feijó Naccache**

Departamento de Eng. Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Luiz Fernando Alzuguir Azevedo**

Departamento de Eng. Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Ney Augusto Dumont**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico

Rio de Janeiro, 08 de Agosto de 2003

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

### **Marcus Ferrari Duarte de Oliveira**

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Fundação Técnico Educacional Souza Marques em 1980, Rio de Janeiro. cursou Engenharia de Petróleo na PUC-Rio em 2000. Participou de diversos congressos na área de petróleo, com participação na OTC 2003 (Oil Technologic Conference) em trabalho apresentado junto com a Petrobrás. Atualmente Gerente Comercial da Kvaerner do Brasil, divisão da Kvaerner Oilfield Products.

#### Ficha Catalográfica

Oliveira, Marcus Ferrari Duarte de

Análise da aplicação de um sistema de bombeamento multifásico submarino na produção de petróleo / Marcus Ferrari Duarte de Oliveira; orientadores: Marcos Sebastião P. Gomes, Elísio Caetano Filho. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, 2003.

169 f. : il. ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Bombeamento multifásico. 3. Bomba multifásica. 4. Bombeamento óleo e gás. 5. Bomba-compressor. I. Gomes, Marcos Sebastião P. II. Caetano Filho, Elísio. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

## Agradecimentos

Aos meus orientadores Dr. Elisio Caetano Filho e Prof. Marcos Sebastião P. Gomes, pela orientação, pelos ensinamentos transmitidos, pela amizade e por todos os momentos de dedicação.

Aos meus pais, Ruy, in memoriam, e Alice, e ao meu irmão Claudius pelo apoio, confiança e ensinamentos.

A minha amada Heloisa e aos meus filhos Marina e Pedro, pelo apoio, confiança e sacrifício.

Aos professores que participaram da Comissão examinadora, a todos professores do Departamento pelos ensinamentos, a todos os funcionários do Departamento e Prof. Sergio Fontoura do Departamento de Engenharia Civil.

Ao Dr Iberê Nascentes Alves e ao Dr Luiz Carlos Fernando Humbert da Fonseca, in memoriam, da PETROBRAS, pelas cartas de apresentação e indicação para o mestrado.

A todos meus amigos, pelo carinho, compreensão e incentivo.

**A Deus por tudo**

**“Felizes os que têm espírito pobre, porque deles é o reino do céus,  
 Felizes os que choram, porque serão consolados,  
 Felizes os mansos, porque possuirão a terra,  
 Felizes os que têm sede de justiça, porque serão saciados,  
 Felizes os misericordiosos, porque alcançarão a misericórdia,  
 Felizes os puros de coração, porque verão a Deus,  
 Felizes os que promovem a paz, porque serão chamados filhos de Deus,  
 Felizes os perseguidos por causa da justiça, porque deles é o reino do céus,  
 Felizes sereis quando vos insultarem e perseguirem e, por minha causa  
 disserem todo o tipo de calúnia contra vós.  
 Alegrai-vos e exultai, porque grande será a recompensa nos céus”**

**“Mateus, capítulo 5”**

À Kvaerner do Brasil Ltda. e a FMC Comércio e Indústria do Brasil S.A. pela oportunidade e apoio no meu desenvolvimento profissional.

À Pontifícia da Universidade Católica, pelo pioneirismo na realização do Curso de Engenharia de Petróleo e a oportunidade de cursar o mestrado,

Aos engenheiros da PETROBRAS, Jacques Braile Saliés, Brenno Romano Motta Filho, Maxwell B. Cerqueira, Farid Salomão Sheicara, Hermes Gomes da Silva Filho, Jorge Oscar de Sant'anna Pizarro, Luiz Alberto S. Rocha, Mauro Roberto Becker, Marco Antonio Nogueira Herdeiro, Jose Roberto F. Moreira, Eduardo Gasperi e Emmanuel F. Nogueira. por terem colaborado com sugestões e informações para este trabalho.

Aos engenheiros, colegas de curso e amigos Luiz Antônio Reis, Bruno Pereira Rosas e Claudio Siqueira Vianna por esses anos de estudo e companheirismo.

Aos engenheiros da Kvaerner do Brasil, Paulo Pereira de Carvalho, Luiz Ranieri Bazzo, Sergio Sabedotti, Marcelo Taulois e John Wagner, e, da FMC, Roberto Martins e Fernando Marcenaro, pelo incentivo e colaboração para este trabalho.

A Petróleo Brasileiro S.A.(PETROBRAS), através do seu Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES), pela oportunidade, colaboração e pelo incentivo à pesquisa universitária.

## Resumo

Oliveira, Marcius Ferrari Duarte de. **Análise da aplicação de um sistema de bombeamento multifásico submarino na produção de petróleo.** Rio de Janeiro, 2003, 169 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Um sistema de produção e escoamento de petróleo, quando equipado com *manifold* submarino, viabiliza a produção conjunta de poços de diferentes capacidades de produção. O equilíbrio conseguido na produção desses poços se faz à custa do estrangulamento (*choking*) dos poços de mais alta capacidade de produção, de forma a propiciar um equilíbrio com aqueles de mais baixa capacidade de produção. Naturalmente as vazões atingidas nessa forma sinérgica são menores do que aquelas que seriam atingidas com a produção em separado desses poços mas, tais menores vazões são economicamente mais atraentes devido às economias atingidas nos custos de investimento (e.g., redução do comprimento total de linhas de produção e do número de *risers*) e das esperadas e normalmente ocorrentes reduções de custo operacional nesses sistemas. Entretanto, a partir da disponibilidade da tecnologia de bombeamento multifásico submarino, na qual se torna possível diretamente transferir energia à misturas multifásicas (óleo, gás e água) em produção, viabiliza-se o estabelecimento de um novo e mais atraente tipo de equilíbrio nesses sistemas. Tal novo equilíbrio, possível pelo uso de sistemas de bombeamento multifásico instalados em *manifold* submarinos de produção, deve propiciar níveis de produção governados inclusive pelos limites impostos pela engenharia de reservatórios e não mais tão somente pelas características físicas dos sistemas (seções de escoamento, distâncias, lâminas d'água, propriedades dos fluidos etc.). A esta forma inédita de obtenção de um novo e mais alto patamar de equilíbrio da produção, a literatura vem utilizando a denominação Estrangulamento Positivo (*Positive Choking*). Assim, baseados no aumento das vazões de produção – antecipação de produção – e no potencial aumento dos fatores de recuperação – maiores volumes produzidos - acredita-se ser tal técnica economicamente atraente quando aplicada em sistemas de produção ainda em implementação, ou mesmo, na implantação da mesma em sistemas já

instalados. O propósito desta tese é o de contribuir na análise técnica e econômica da inédita aplicação de um sistema de bombeamento multifásico submarino num sistema de produção equipado com *manifold*.

### **Palavras-Chave:**

Bombeamento Multifásico Submarino, Bomba Multifásica, Bombeamento de Óleo e Gás, Bomba-Compressor

## Abstract

Oliveira, Marcius Ferrari Duarte de. **Evaluation of a subsea multiphase pumping system applied on petroleum production.** Rio de Janeiro, 2003, 169 p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A subsea oil production system allows simultaneous production of several wells with different flow rates when the system has a subsea manifold. In order to balance the different flow rates, the higher production wells have their flow rates reduced via a choking system. As a result, the total flow is lower than the summation of all individual well flow rates. But, this combined and lower production has a very attractive economics, as it requires lower capital expenditures, mainly due to the shorter overall length of flowlines and lower number of risers and, also due to the expected lower operational costs. Nowadays, however, with the availability of the technology of subsea multiphase pumping system, which enables the transfer of energy to multiphase mixtures (oil, gas and water) under production, becomes possible to achieve an even higher and more attractive plateau in these petroleum production systems. This new equilibrium plateau, made possible by the technology of subsea multiphase pumping, will lead to production levels that will attempt to take benefit of all reservoir allowance and then extending the primary production limit imposed by the production system characteristics (e.g., flowline length, water depth, produced fluid properties etc.). This novel scheme that allows obtaining a now and higher production level is being called in the literature as “Positive Choking“. Therefore, based on the resultant aspects of production flow rate increase – production anticipation – and on the potentially higher recovery factors – larger produced volumes – is what drives the belief that such technology can be economically attractive to new production systems being installed or even in those already in operation. The purpose of this work is to contribute in the technical and economical evaluation of



Multiphase Pumping System application on a subsea production system equipped with a manifold.

**Key-words:**

Subsea Multiphase Pumping, Boosting System, Pump-Compressor, Oil and Gas Pumping

# Sumário

	Página
Capítulo 1 - Introdução	
1.1 – História do Petróleo	20
1.2 - Importância Econômica do Petróleo	22
1.3 – Petróleo – da acumulação à produção	26
1.4 - Sistemas Submarinos de Produção	28
Capítulo 2 – Estado da arte do escoamento multifásico na produção de petróleo	
2.1 - Misturas Multifásicas	37
2.2 – Modelagem para Escoamento Multifásico	41
2.3 – Equação do Gradiente de Pressão	45
2.4 – Algoritmo de Marcha para o Cálculo da Perda de Carga	48
2.5 – Simulador Numérico Computacional	54
2.5.1 – Objetivo Básico do Simulador	54
2.5.2 – Simulador Computacional PIPESIM <sup>TM</sup>	55
Capítulo 3 - Estado da arte da tecnologia de bombeamento multifásico submarino	
3.1 – Introdução ao Bombeamento Multifásico	57
3.2 – Bombas Multifásicas – tipos e características	59
3.3- Programa da PETROBRAS em Bombeamento Multifásico Submarino	65
3.3.1 - O Programa	65
3.3.2 – Sistema de Bombeamento Multifásico Submarino – SBMS 500	67
3.3.2.1 – Configuração Básica do SBMS-500	
3.3.2.2 – Programa de Testes no Sítio de Atalaia	
3.3.2.3 – Programa de Testes no Campo de Marlim	

3.4 - Programa de Capacitação Tecnológica do Governo Norueguês –	
DEMO 2000	76
3.4.1 - O Programa	76
3.4.2 – <i>Subsea Multiphase Pumping Module</i> – SMPM 335	76
3.5 - Aplicações e Benefícios do Bombeamento Multifásico Submarino	81
3.5.1 – Aplicabilidade	81
3.5.2 - Requisitos para Aplicação do Bombeamento Multifásico	
Submarino	83
3.5.3- Benefícios	84
Capítulo 4 – Metodologia da pesquisa	
4.1 – Características do Cenário de Aplicação	87
4.1.1 - Arquitetura do Sistema	88
4.1.2 - Fluidos Produzidos	90
4.1.3 - Reservatório em Produção	91
4.2 - Descrição das Análises de Interesse	92
4.3 – Desenvolvimento das Simulações	93
4.3.1 – Simulação do Sistema de Produção por Surgência Natural	93
4.3.2 - Simulação do Sistema de Produção com	
Bombeamento Multifásico	94
Capítulo 5 – Simulação e análise de resultados	
5.1 – Simulação do Sistema de Produção por Surgência Natural	97
5.1.1 –Surgência Natural – <i>chokes</i> abertos	97
5.1.2 – Surgência Natural – <i>chokes</i> estrangulados	99
5.2 – Simulação do Sistema de Produção com Bombeamento Multifásico Submarino	

(BMS) – arquitetura da instalação	102
5.2.1 – BMS – instalação nas linhas ramais dos poços 5 e 6	102
5.2.1.1 – BMS nas linhas ramais dos poços 5 e 6 – nas ANM’s	102
5.2.1.2 – BMS nas linhas ramais dos poços 5 e 6 – na chegada no <i>manifold</i>	103
5.2.2 – BMS – instalação na linha tronco do <i>manifold</i>	106
5.2.2.1 – BMS na linha tronco – na saída do <i>manifold</i>	106
5.2.2.2 – BMS na linha tronco - na base do <i>riser</i>	109
5.3 – Simulação do Sistema de Produção com Bombeamento Multifásico Submarino (BMS) – influência do índice de produtividade da formação	111
5.4 – Simulação do Sistema de Produção com Bombeamento Multifásico Submarino (BMS) – influência de características de produção	112
5.4.1 – Produção com BMS – influência da razão gás – óleo (RGO)	112
5.4.2 – Produção com BMS – influência da viscosidade do óleo morto	117
Capítulo 6 – Considerações, conclusões e recomendações	
6.1 - Considerações	123
6.2 - Conclusões	123
6.2.1 – Conclusões – seleção da bomba	124
6.2.2 – Conclusões – arquitetura do sistema	124
6.2.3 – Conclusões – características específicas do reservatório	125
6.2.4 – Conclusões – características específicas dos fluidos produzidos	126
6.3 - Recomendações	127
Referências bibliográficas	128
Bibliografia	131
Glossário	133

## Apêndices

A - Memorial Descritivo dos Principais Equipamentos Utilizados em Sistemas Submarinos de Produção de Petróleo	143
B - Programa de Capacitação Tecnológica em Sistemas de Produção em Águas Profundas (PROCAP)	164

## Lista de figuras

	<b>Página</b>
Figura 1.20 – Matriz Energética Primária Mundial – composição	23
Figura 1.21 – Projeção Líquida do Consumo Mundial de Petróleo	24
Figura 1.22 – Projeção da Produção de Petróleo no Brasil	25
Figura 1.23 – Reservas Mundiais de Petróleo e Gás Natural em 2000	25
Figura 1.40 - Sistema Submarino de Produção	29
Figura 1.41 - Árvore de Natal Molhada (ANM) de Produção - vertical	31
Figura 1.42 - <i>Manifold UMC (Underwater Manifold Center)</i>	32
Figura 1.43 – Diagrama Básico de um <i>Manifold</i> Submarino de Produção	33
Figura 1.44 – <i>Cluster</i>	34
Figura 1.45 - Diagrama Básico de uma Planta de Processamento Primário	36
Figura 2.10 - Diagrama de Fases - pressão versus temperatura	38
Figura 2.20 – Arranjos de Fases no Escoamento – vertical ascendente e horizontal	44
Figura 2.40 – Algoritmo de Marcha	51
Figura 2.41 – Curvas de Disponibilidade (IPR) e Requerida (TPR) do Sistema	54
Figura 3.10 – Áreas de Concessões Exploratórias da PETROBRAS	58
Figura 3.11 – Reservas Brasileiras de Hidrocarbonetos	58
Figura 3.20 – Bomba Multifásica Rotodinâmica tipo Hélico-axial – corte esquemático e curvas características	61
Figura 3.21 – Bomba Multifásica Volumétrica tipo Duplo-parafuso – corte esquemático e curvas características	63
Figura 3.30 – SBMS-500	68
Figura 3.31 – Curvas Características da Família - SBSM-500	69
Figura 3.40 – SMPM-335	77

Figura 3.41 – Curvas Características da Família - SMPM-335	78
Figura 4.10 – Diagrama Básico de um Sistema de Produção de Petróleo	87
Figura 5.11 – Surgência Natural <i>Chokes</i> Abertos (pressão <i>versus</i> distância)	99
Figura 5.12 – Surgência Natural <i>Chokes</i> Diferentemente Estrangulados (pressão <i>versus</i> distância)	101
Figura 5.13 – BMS nos Poços 5 e 6 – na saída das ANM's	103
Figura 5.14 – BMS nos Poços 5 e 6 – na chegada ao <i>manifold</i>	105
Figura 5.15 – BMS na Saída do <i>Manifold</i> – <i>chokes</i> abertos	108
Figura 5.16 – BMS na Linha Tronco – na base do <i>riser</i>	110
Figura 5.17 – Variação do Índice de Produtividade da Formação (IP) <i>versus</i> produção de Líquido	112
Figura 5.18 – BMS na Saída do <i>Manifold</i> – influência da RGO (menor 50%)	114
Figura 5.19 – BMS na Saída do <i>Manifold</i> – influência da RGO (maior 50%)	114
Figura 5.20 – BMS na Saída do <i>Manifold</i> - razão gás-óleo (RGO) <i>versus</i> produção de líquido	115
Figura 5.21 – BMS na Saída do <i>Manifold</i> - razão gás-óleo (RGO) <i>versus</i> produção de gás	115
Figura 5.22 – Variação da Viscosidade de Óleo Morto <i>versus</i> Produção de Líquido	118
Figura 5.23 – Surgência Natural & <i>Chokes</i> Abertos - variação da viscosidade de óleo morto – menor 25% (pressão <i>versus</i> distância)	119
Figura 5.24 – BMS na Saída do <i>Manifold</i> & <i>Chokes</i> Abertos - variação da viscosidade de óleo morto - menor 25% (pressão <i>versus</i> distância)	120
Figura 5.25 – Surgência Natural & <i>Chokes</i> Abertos - variação da viscosidade de óleo morto - maior 25% (pressão <i>versus</i> distância)	121

Figura 5.26 – BMS na Saída do <i>Manifold &amp; Chokes</i> Abertos - variação da viscosidade de óleo morto - maior 25% (pressão <i>versus</i> distância)	122
Figura A.1 - Base Guia e Cabeça de Poço	146
Figura A.2 - Diagrama Genérico de uma <i>Árvore de Natal</i>	147
Figura A.3 - ANM-GLL ( <i>guidelineless</i> )	151
Figura A.4 - <i>Árvore de Natal Molhada de Produção</i> – Horizontal 3000 m LDA	153
Figura A.5 - ANM-H de Injeção LDA 2000 m	155
Figura A.6 - ANM de Injeção Convencional (vertical) e Horizontal – comparações	156
Figura A.7 - <i>Pipe Line End and Terminal</i>	159
Figura A.8 – Esquema Típico de Sistema de Controle Submarino em <i>Manifolds</i>	162
Figura A.9 – <i>Manifold</i> Submarino do Campo de Marimbá	163



## Lista de tabelas

	Página
Tabela 2.10 – Intervalo de Valores dos Parâmetros <i>Black-Oil</i>	39
Tabela 2.11 – Propriedades dos Fluidos e Correlações PVT	40
Tabela 3.30 – SBMS-500 Principais Características Técnicas	73
Tabela 3.31 – SBMS-500 Programa de Qualificação e Testes no Sítio de Atalaia	74
Tabela 3.32 – SBMS-500 Programa de Qualificação e Testes no Campo de Marlim	75
Tabela 3.40 – SMPM 335, Principais Características Técnicas	80
Tabela 4.10 – Características da Coluna de Produção	89
Tabela 4.11 – Características das Linhas Ramais, Linha Tronco, <i>Riser</i> , <i>Manifold</i> e UEP	90
Tabela 4.12 – Características dos Fluidos Produzidos	91
Tabela 4.13 – Características do Reservatório em Produção	91
Tabela 4.20 – Correlações Utilizadas na Descrição de Características do Escoamento Multifásico	92
Tabela 4.30 – Características Básicas da Bomba Multifásica	95
Tabela 4.31 – Variação do Índice de Produtividade (IP)	95
Tabela 4.32 – Variação da Razão Gás – Óleo (RGO)	96
Tabela 4.33 – Variação da Viscosidade do Óleo Morto	96
Tabela 5.10 – Dados de Entrada <i>Chokes</i> Abertos	97
Tabela 5.11 – Dados de Entrada <i>Chokes</i> Diferentemente Estrangulados	100
Tabela 5.12 – Dados Comparativos da Produção por Surgência Natural – <i>chokes</i> Abertos e Diferentemente Estrangulados	101
Tabela 5.13 – Dados Comparativos da Produção com BMS – na saída das ANM's e na chegada ao <i>manifold</i> – <i>chokes</i> abertos	105
Tabela 5.14 – Dados de Entrada - <i>chokes</i> igualmente estrangulados	106
Tabela 5.15 – Dados de Entrada - <i>chokes</i> diferentemente estrangulados	107
Tabela 5.16 – Dados de Entrada - <i>chokes</i> abertos e apenas um estrangulado	108
Tabela 5.17 – Dados Comparativos da Produção com BMS – na saída do <i>manifold</i>	109
Tabela 5.18 – Comparação entre BMS na Saída do <i>Manifold</i> e na Base do <i>Riser</i> – <i>chokes</i> abertos	111
Tabela 5.19 – Dados Comparativos da Produção por Surgência Natural & BMS na Saída do <i>Manifold</i> – <i>chokes</i> abertos e com a variação da viscosidade de óleo morto	122

# Nomenclatura

## Latinas

- a - antes
- A - área
- B - fator volume formação
- C - compressibilidade, calor específico
- D - diâmetro
- f - fator de fricção
- g - aceleração da gravidade, fator de conversão gravitacional
- h - entalpia
- H - *holdup* com escorregamento
- J - equivalente mecânico de calor
- L, *l* - comprimento
- P - pressão
- PC - ponto crítico
- Q - quantidade de calor
- q - vazão volumétrica
- T - temperatura
- R - razão de solubilidade
- Z - fator de compressibilidade
- v - velocidade
- w - vazão mássica

## Gregas

- D - diferença, gradiente
- $\gamma$  - densidade
- $\lambda$  - *holdup*
- $\mu$  - viscosidade absoluta
- r* - massa específica
- $\sigma$  - tensão interfacial gás-líquido

## Sobrescritos

- ° - grau

## Subscritos

- b* - bolha, saturação
- c* - crítica, conversão
- ef* - fluido externo
- f* - fluido
- g* - gás
- gd* - gás dissolvido
- gf* - gás livre
- gt* - gás total produzido
- l* - líquido
- m* - mistura
- n* - sem escorregamento
- o* - óleo
- p* - pressão
- s* - solubilidade do gás no óleo, escorregamento (*slip*)
- sg* - superficial do gás
- sl* - superficial do líquido
- sw* - solubilidade do gás na água
- w* - água