

## 4 Metodologia da pesquisa

### 4.1 Características do Cenário de Aplicação

Sem duvida um sistema de bombeamento multifásico irá trazer mais um importante recurso para os engenheiros e as companhias operadoras no desenvolvimento de campos de petróleo. Este estudo visa a análise do emprego de um sistema de bombeamento multifásico submarino de petróleo num sistema de produção, tendo por cenário a utilização de um *manifold* de produção.

Sem alterar o contexto da análise, decidimos adotar um sistema constituído por seis poços de petróleo – número suficiente para exercitarmos as diversidades possíveis e típicas nesses poços - interligados a um *manifold* e sendo a produção exportada para uma UEP, ver Figura 4.10.

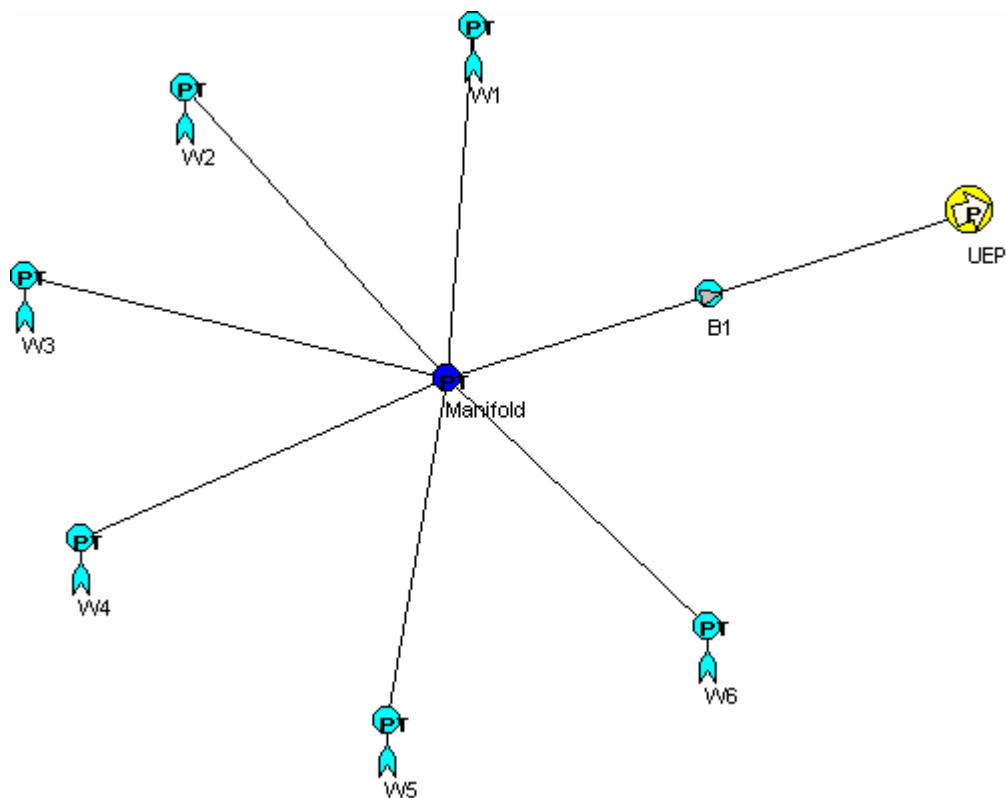


Figura 4.10 – Diagrama Básico de um Sistema de Produção de Petróleo  
(Baker Jardine & Associates Limited, 1993-2000)

Para a caracterização do sistema de produção, consideramos as principais características técnicas usuais no desenvolvimento de um campo de petróleo no Brasil. Desta forma podemos dividir nosso sistema nas seguintes características: arquitetura do sistema (geometria dos poços e do sistema submarino), propriedades dos fluidos produzidos e características dos reservatórios produtores. Vale ressaltar que os dados a serem utilizados; apesar de não necessariamente representarem nenhum sistema específico; têm uma representatividade quanto a sua ocorrência bastante forte no cenário de produção no mar. Igualmente é importante ressaltar que apesar de estarmos definindo valores ou faixas para todos os parâmetros intervenientes nos estudos de simulação a serem realizados, objetivamos buscar explicitar apenas tendências e constatações de caráter qualitativo. E objetivando que tais tendências e constatações possam vir a contribuir nas análises futuras e específicas quando da instalação de qualquer sistema de bombeamento multifásico submarino.

#### **4.1.1 Arquitetura do Sistema**

Estas características se referem à geometria do sistema e podem ser divididas em duas partes distintas: poços (coluna de produção, etc.) e instalações submarinas (linhas; *maniflod*, *riser* e UEP).

- Geometria dos poços

Os poços que na Figura 4.10 estão representados pela letra “W” têm na Tabela 4.10 os dados de suas respectivas colunas de produção, as quais são necessários e suficientes para a análise que efetuaremos.

CARACTERÍSTICAS DA COLUNA DE PRODUÇÃO										
		Poço 1	Poço 2	Poço 3	Poço 4	Poço 5	Poço 6			
Rugosidade	mm	0,183	0,183	0,183	0,183	0,183	0,183	0,183	0,183	
SSSV (profundidade)	M	25	25	25	25	25	25	25	25	
SSSV (diâmetro interno)	mm	96,774	96,774	96,774	96,774	96,774	96,774	96,774	96,774	
SSSV (comprimento)	mm	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	
Temperatura ambiente	°C	4	4	4	4	4	4	4	4	
Coefficiente global de transferência de calor	W/m <sup>2</sup> /K	1,135	1,135	1,135	1,135	1,135	1,135	1,135	1,135	
		Profundidade (m)		Comprimento (m)		Diâmetro da Coluna (pol)		Diâmetro do Revestimento (pol)		Temperatura Ambiente
		Medido	Vertical	Medido	Vertical	Externo	Interno	Externo	Interno	°C
POÇO 1										
ANM	807	807								4
Col 1	822	822	15	15	4,5	3,958	9,625	8,755		4,5
Col 2	2645	2645	1823	1823	5,5	4,96	9,625	9,625		71
POÇO 2										
ANM	798	798								4
Col 1	818	818	20	20	4,5	3,958	9,625	8,755		4,7
Col 2	2644	2644	1826	1826	5,5	4,892	9,625	9,625		70
POÇO 3										
ANM	796	796								4
Col 1	816	816	20	20	4,5	3,958	9,625	8,755		4,7
Col 2	2930	2626	2114	1810	5,5	4,892	9,625	9,625		70
POÇO 4										
ANM	789	789								4
Col 1	812	812	23	23	4,5	3,958	9,625	8,755		4,8
Col 2	2644	2644	1832	1832	5,5	4,96	9,625	9,625		70
POÇO 5										
ANM	779	779								4
Col 1	799	799	20	20	4,5	3,958	9,625	8,755		4,7
Col 2	2936	2634	2137	1835	5,5	4,896	9,625	9,625		70
POÇO 6										
ANM	785	785								4
Col 1	805	805	20	20	4,5	3,958	9,625	8,755		4,7
Col 2	3048	2613	2243	1808	5,5	4,678	9,625	9,625		70

Tabela 4.10 – Características da Coluna de Produção

- Geometria das Instalações Submarinas

Nas Tabelas seguintes apresentamos os dados da arquitetura e de operação das instalações submarinas referentes às linhas que interligam os poços ao *manifold*, a linha tronco (*manifold* até a base do *riser*), *riser*, *manifold* e UEP.

Em relação ao esquematicamente descrito na Figura 4.10, a Tabela 4.11 apresentam os dados referentes às linhas ramais, interligando as ANM's ao

*manifold*, e linha tronco, aquela que interliga o *manifold* à base do *riser*; e, finalmente, as características do próprio *riser*.

CARACTERÍSTICAS DAS LINHAS RAMAIS (ANM - <i>Manifold</i> )								
	Lâmina d' água (m)	Comprimento Medido (m)	Angulo Horizontal (grau)	Diâmetro Linha (pol)		Espessura (mm)	Temp. Amb. °C	U W/m <sup>2</sup> /K;
				Externo	Interno			
Linha 1	807	591	1,45	8,35	6	29,845	4	1,135
Linha 2	798	473	-0,48	8,744	6	34,85	4	1,135
Linha 3	796	380	-0,9	5,996	4	25,35	4	1,135
Linha 4	789	1104	-0,67	8,35	6	29,845	4	1,135
Linha 5	779	1105	-1,19	9,185	6	40,45	4	1,135
Linha 6	785	1111	-0,88	8,74	6	34,798	4	1,135
CARACTERÍSTICAS DA LINHA TRONCO DE PRODUÇÃO ( <i>Manifold</i> - Base do <i>Riser</i> )								
	Comprimento Medido (m)	Ângulo Horizontal (grau)	Diametro Linha (pol)		Espessura (mm)	Temp. Ambiente °C	U W/m <sup>2</sup> /K	
			Externo	Interno				
Linha Tronco	1705	-1,06	13,1	9,5	45,85	4	1,135	
CARACTERÍSTICAS do <i>RISER</i> de PRODUÇÃO								
Altura					840	m		
Comprimento (até sua base/ <i>touch-down point</i> )					1300	m		
Diâmetro Interno					203,2	mm		
Espessura da parede					39,65	mm		
Rugosidade					0,81	mm		
Temperatura ambiente.					4	°C		
UEP								
Lâmina d' água					820	m		
Pressão de separação					10	kg/cm <sup>2</sup>		
Temperatura					85	°C		
MANIFOLD								
Lâmina d' água					780	m		

Tabela 4.11 – Características das Linhas Ramais, Linha Tronco, *Riser*, *Manifold* e UEP

#### 4.1.2 Características dos Fluidos Produzidos

Para este estudo consideraremos como sendo as mesmas, as características dos fluidos produzidos em todos os seis poços, conforme apresentados na Tabela 4.12.

<b>Propriedades <i>Black Oil</i></b>		
<b>Propriedades (Std)</b>		
<i>Water cut</i>	0	%
Razão gás/óleo – RGO	75	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Densidade da água	1,04	g/cm <sup>3</sup>
Densidade relativa do gás	0,67	
Densidade do óleo	19,50	°API
Razão de solubilidade	75	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Pressão de saturação	180	kg/cm <sup>2</sup>
<b>Viscosidade do Óleo Morto</b>		
Temperatura 1	60	°C
Viscosidade 1	44	cP
Temperatura 2	40	°C
Viscosidade 2	114	cP

Tabela 4.12 – Características dos Fluidos Produzidos

### 4.1.3 Reservatório em Produção

Conforme mencionado no Capítulo 2, item 2.1, a composição química dos depósitos petrolíferos varia significativamente com a profundidade e localização (tipo de bacia). Desde que em nosso adotado sistema típico de produção os poços fazem parte de um mesmo reservatório, as características dos dados do reservatório - quando determinadas através dos testes de produção de cada poço em separado - apresentam valores muito aproximados conforme apresentados na Tabela 4.13 abaixo.

<b>Dados de Reservatório</b>							
		<b>Poço 1</b>	<b>Poço 2</b>	<b>Poço 3</b>	<b>Poço 4</b>	<b>Poço 5</b>	<b>Poço 6</b>
<b>Pressão estática (canhoneados)</b>	Kgf/cm <sup>2</sup>	233	231	221	228	221	214
<b>Temperatura</b>	°C	71	70	70	70	70	70
<b>Kickoff - TVD</b>	m			1120		1130	1080
<b>Reservatório - TVD</b>	m	2645	2644	2626	2644	2634	2613
<b>Profundidade medida - MD</b>	m	2645	2644	2930	2644	2936	3048
<b>Índice de Produtividade - IP</b>	m <sup>3</sup> /d/Kgf/cm <sup>2</sup>	25	54	47	61	31	62
<b>Pressão de chegada na UEP</b>	Kgf/cm <sup>2</sup>	10	10	10	10	10	10

Tabela 4.13 – Características do Reservatório em Produção

## 4.2 Descrição das Análises de Interesse

O objetivo deste estudo é o de analisar as principais características de produção do sistema de poços, quando tendo sua produção convergindo para o *manifold* e sendo esta escoada para uma UEP - fazendo ou não uso de sistema(s) de bombeamento multifásico. Para definir os parâmetros a serem utilizados nas simulações (e.g. correlações de escoamento multifásico e parâmetros de reservatório) foram analisados os dados obtidos no teste de produção dos poços. A Tabela 4.20 abaixo apresenta as principais correlações a serem utilizadas. Com relação aos parâmetros do reservatório, foi considerada a situação permanente para a pressão estática, apesar de sabermos que a pressão estática do reservatório é alterada com a entrada em operação de novos poços (produtores e injetores), parada de produção de alguma UEP do campo e da própria alteração na forma de produção dos poços do próprio reservatório afora outros aspectos de natureza da interação rocha-fluido e do próprio tempo de produção. Entretanto, para o escopo da análise em questão, a qual está particularmente focada no impacto a ser provocado pela utilização de um sistema de bombeamento multifásico – ainda que tal utilização esteja sendo considerada de forma pontual e atemporal – a utilização de valores constantes para as características do reservatório foi julgada satisfatória.

<b>Tipos de Escoamento</b>	<b>Correlações Utilizadas<sup>1</sup></b>
Escoamento vertical multifásico -	Begg & Brill Revised (BB)
Escoamento horizontal multifásico -	Begg & Brill Revised (BB)
Viscosidade do óleo morto -	Usado Dados de Laboratório
Viscosidade do óleo vivo -	Chew & Connaly
Pressão de saturação -	Vasquez & Beggs
Base de dados -	Baker Jardine & Associates

Tabela 4.20 – Correlações Utilizadas na Descrição de Características do Escoamento Multifásico

<sup>1</sup> Para maiores informações, acerca dessas correlações, vide a referência PIPESIM.

Neste estudo serão comparadas as simulações dos poços produzindo através de surgência natural e com a utilização de sistemas de bombeamento – esses dispostos em alguns dos poços, no coletor tronco do *manifold* ou na base do *riser* que transfere a produção para a UEP.

Conforme descrito nos capítulos anteriores, o conjunto de variáveis necessárias e suficientes para uma completa descrição, através simulação do comportamento da produção nesse sistema de nosso interesse é consideravelmente grande – ainda se considerarmos que nem todas as variáveis são de valores conhecidos em toda a faixa de estudo, o que nos obriga ao uso de modelos e nem sempre de plena e comprovada universalidade de uso, tal conjunto fica ainda maior e mais diverso. Assim, em consonância com o caráter qualitativo de nossa análise e os objetivos buscados, resolvemos limitar tal análise ao seguinte grupo de funcionais: (1) Índice de Produtividade (IP) dos poços; (2) Geometria do sistema; (3) Viscosidade do óleo morto; e, (4) Razão gás-óleo. Para propiciar as comparações buscadas, serão reportados os resultados dessas simulações para os sistemas de produção concebidos em termos de vazões obtidas. Com base em tais resultados devem ser explicitadas as tendências e constatações buscadas em tal estudo.

### **4.3 Desenvolvimento das Simulações**

#### **4.3.1 Simulação do Sistema de Produção por Surgência Natural**

Neste cenário será simulada a produção do sistema através de surgência natural. Através da análise dos dados apresentados nas Tabelas 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13 o resultado esperado é a produção de quatro poços. Desta forma para obter o balanço energético do sistema de produção, será necessário o estrangulamento destes poços, para a obtenção de um patamar no qual seja possível valores maiores de produção desse conjunto (uma vez que tentativamente os demais poços também participarão da produção do conjunto) – *negative choking*. Entretanto, a partir da disponibilidade da tecnologia de bombeamento multifásico poderemos, em princípio, viabilizar o estabelecimento de um novo e ainda mais atraente patamar para o sistema de produção, com a aplicação da bomba nos dois poços de

menor energia ou até mesmo na linha tronco do *manifold* – *positive choking*. Dessas possibilidades e associadas simulações é que tratam as seções seguintes.

### 4.3.2

## Simulação do Sistema de Produção com Bombeamento Multifásico

### Arquitetura do Sistema

Nesta simulação será dado enfoque para o questionamento da melhor posição das bombas. Aqui compararemos (1) uma bomba na linha tronco do *manifold* (e por conseqüência fazendo uso de *chokes* nos poços mais fortes – aqueles que exibem a maior valor de pressão de chegada no *manifold* - com duas ou mais bombas que estariam instaladas no *header* de alta ou de baixa, neste caso sem utilizar o principio dos *chokes*; (2) compararemos também a localização de uma bomba única na linha tronco do *manifold* com uma bomba instalada na base do *riser*. Assim poderíamos estabelecer a melhor eficiência do sistema em função do posicionamento da bomba.

Como premissa básica utilizaremos em todas as simulações um diferencial de pressão de 40 bar, que julgamos ser mais conservador dos que os valores limites buscados nos reais protótipos desses sistemas em desenvolvimento (i.e., 60 bar), como sendo o valor máximo *maximorum* capaz de ser fornecido pela bomba em utilização – certamente, acaso utilizássemos maiores valores de incremento possível de pressão, os resultados seriam ainda mais evidentes do benefício do uso de tal tecnologia. Entretanto, desde que nossa motivação no estudo é comparativa e qualitativa, tal limitação adotada é julgada admissível. Faremos ainda, a luz das características do referidos protótipos em desenvolvimento, uso de valores limites para a vazão total nas condições de sucção dessa bomba, bem como, do valor total máximo de FVG admissível nessa sucção da mesma. Igualmente é sabido que essas bombas tem valores de eficiência volumétrica não constante. Entretanto, é igualmente sabido que sob médios a altos valores de FVG<sup>2</sup> associados a valores

---

<sup>2</sup> Valores de FVG acima de 70% normalmente já provocam tal comportamento.



médios a altos de taxas de compressão<sup>3</sup>, a eficiência volumétrica dessas bombas multifásicas de duplo parafuso se aproxima da unidade e varia muito pouco. Assim, adotaremos um valor único e unitário para tal eficiência volumétrica durante as simulações e análises em realização. A Tabela 4.30 apresenta as principais características adotadas para a bomba multifásica a ser utilizada neste estudo.

<b>CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DA BOMBA MULTIFÁSICA</b>					
<b>Tipo de Bomba Multifásica</b>	<b>Vazão Volumétrica Máxima (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Fração Volumétrica Máxima (%)</b>	<b>Diferencial de Pressão Máximo (bar)</b>	<b>Eficiência Volumétrica (%)</b>	<b>Potência Máxima (MW)</b>
Volumétrica de Duplo Parafuso	500	95	40	100	1,6

Tabela 4.30 – Características Básicas da Bomba Multifásica

### Característica Específica da Formação

Como não pretendemos fazer nenhuma associação com simulação de reservatório, podemos analisar o comportamento do sistema com a variação do Índice de Produtividade (IP) dos poços, conforme Tabela 4.31 abaixo. Desta forma poderemos analisar o desempenho do sistema de bombeamento multifásico com a variação do IP.

<b>ÍNDICE DE PRODUTIVIDADE (IP)</b> (m <sup>3</sup> /d/kgf/cm <sup>2</sup> )					
<b>POÇO</b>	<b>Medido</b>	<b>- 50%</b>	<b>- 25%</b>	<b>+ 25%</b>	<b>+ 50%</b>
<b>1</b>	25	12,50	18,75	31,25	37,50
<b>2</b>	54	27,00	40,50	67,50	81,00
<b>3</b>	47	23,50	35,25	58,75	70,50
<b>4</b>	61	30,50	45,75	76,25	91,50
<b>5</b>	31	15,50	23,25	32,25	46,50
<b>6</b>	62	31,00	46,50	77,50	93,00

Tabela 4.31 – Variação do Índice de Produtividade (IP)

<sup>3</sup> Tal taxa é definida pela razão entre o valor da pressão de descarga (absoluta) e o valor da pressão de sucção (absoluta). Va lores de 5 a 10 nessa razão são considerados de médios a altos.

## Propriedades dos Fluidos Produzidos

Todas as propriedades físicas e químicas do fluido produzido têm influência na produção de um sistema petrolífero. Entretanto para o nosso estudo dentre o elenco das propriedades, destacamos a razão gás-óleo e a viscosidade do óleo morto para análise do desempenho do bombeamento multifásico.

A partir do resultado obtido no item 4.3.2 analisaremos o desempenho do sistema de bombeamento multifásico com as variáveis (1) Razão gás-óleo e (2) viscosidade do óleo morto conforme as Tabelas 4.32 e 4.33 respectivamente, a seguir.

VARIAÇÃO DA RAZÃO GÁS – ÓLEO (RGO)							
RGO (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	Medido	- 75%	- 50%	- 25%	+ 25%	+ 50%	+ 75%
	75	18,75	37,5	56,25	93,75	112,5	131,25

Tabela 4.32 – Variação da Razão Gás - Óleo

VARIAÇÃO DA VISCOSIDADE DO ÓLEO MORTO							
Viscosidade (cP)	Medido						
	@ 40°C	-75%	-50%	-25%	25%	50%	75%
	114	28,50	57	85,5	142,5	171	199,5

Tabela 4.33 – Variação da Viscosidade do Óleo Morto