

# 1 Introdução

A produção de petróleo em águas cada vez mais profundas tem aumentado substancialmente a distância dos poços produtores para a planta de processamento. Nos grandes campos produtores de petróleo *offshore* (por exemplo, no Golfo do México, Brasil e oeste da África) o processamento primário dos fluidos produzidos, isto é, separação das fases para posterior exportação e remoção de contaminantes, envolve grandes dispêndios de capital e operação. Logo conectar poços satélites a uma unidade central é a única técnica economicamente viável disponível (Hua et al., 2011).

As tubulações que conectam a cabeça dos poços à unidade de processamento são, em geral, muito longas. Isso impõe perdas de carga significativas à corrente produzida e, conseqüentemente, levando a menores produções e a problemas com garantia de escoamento, como deposição de parafinas, por exemplo. Além disso, durante o escoamento, o gás tende a se dissociar do petróleo devido às variações na pressão e temperatura. Estas variações na pressão e na quantidade de gás livre, podem alterar o padrão de escoamento ao longo do duto, podendo gerar golfadas.

Para reduzir estes problemas pode-se adicionar energia de bombeamento diretamente ao escoamento. E, a utilização de bombas que podem fornecer um incremento de pressão aos fluidos produzidos, no leito marinho, sem separação de fases já é um conceito comprovado.

## 1.1

### **Benefícios do Uso de Métodos Bombeados**

Segundo Baruzzi et al. (2001) e Caetano e Kujawski (1999), o bombeamento submarino, além de ser, em alguns casos, o diferencial que torna tecnicamente e/ou economicamente viável a exploração da jazida de petróleo, traz também diversos resultados positivos, dentre os quais se podem destacar:

**Antecipação da produção.** Métodos bombeados promovem um aumento da

vazão de produção, permitindo antecipação de receitas.

**Conhecimento do reservatório.** Sistemas de produção antecipada permitem uma avaliação mais rápida de novos campos.

**Grandes distâncias e águas profundas.** Sendo uma fonte adicional de energia, um sistema de bombeamento submarino pode viabilizar tecnicamente e economicamente a produção em alguns campos marginais que se encontrem distantes de facilidades de produção existentes. Segundo Hua et al. (2011), nos próximos 10 anos, distâncias tão grandes quanto 140 km serão comuns e, em última instância será possível escoar o petróleo desde o leito marinho até a costa, eliminando completamente a necessidade de uma unidade marítima de produção. A Figura 1.1 (*OffShore Magazine* pôster, 2014) mostra os recordes atuais de distância entre a cabeça dos poços e as unidades de produção. A figura mostra limites de aproximadamente 70 km para transporte multifásico de petróleo e 143 km para transporte de gás.

**Fator de recuperação.** O sistema de bombeamento pode possibilitar a adoção de menores pressões de abandono<sup>1</sup>, levando a maiores volumes recuperados e conseqüentemente, maiores fatores de recuperação.

**CAPEX<sup>2</sup>.** Potencial redução de investimentos devido à possibilidade da necessidade de menor número de poços e à maior possibilidade de escoamento da produção a longas distâncias e para outras infraestruturas já existentes.

**Controle de vazão.** Através de sistemas de bombeamento submarino, pode-se manter constante e previsível a produção, reduzindo as flutuações naturais.

**Óleos pesados e de alta viscosidade.** A eficiência do método de elevação por *gas lift*<sup>3</sup> decai com o aumento da viscosidade e densidade dos fluidos produzidos, tendo assim, os sistemas de bombeamento, papel fundamental na viabilização da exploração de campos com fluidos desse tipo.

**Gas lift.** O bombeamento submarino usado em substituição a um sistema de *gas lift* possibilita o redirecionamento da capacidade de compressão da unidade de produção, antes usada para injeção do *gas lift*, para outros fins, como a exportação do gás produzido ou redistribuído entre os outros poços.

---

<sup>1</sup> **Pressão de abandono:** pressão estática do reservatório mínima na qual já não é mais possível produzir um campo de petróleo

<sup>2</sup> **CAPEX:** capital investido na aquisição de equipamentos e bens (*capital expenditure* no acrônimo em inglês)

<sup>3</sup> **gas lift:** método pneumático de elevação artificial de poços de petróleo baseado na diminuição da massa específica do fluido produzido pela injeção de gás na coluna de produção

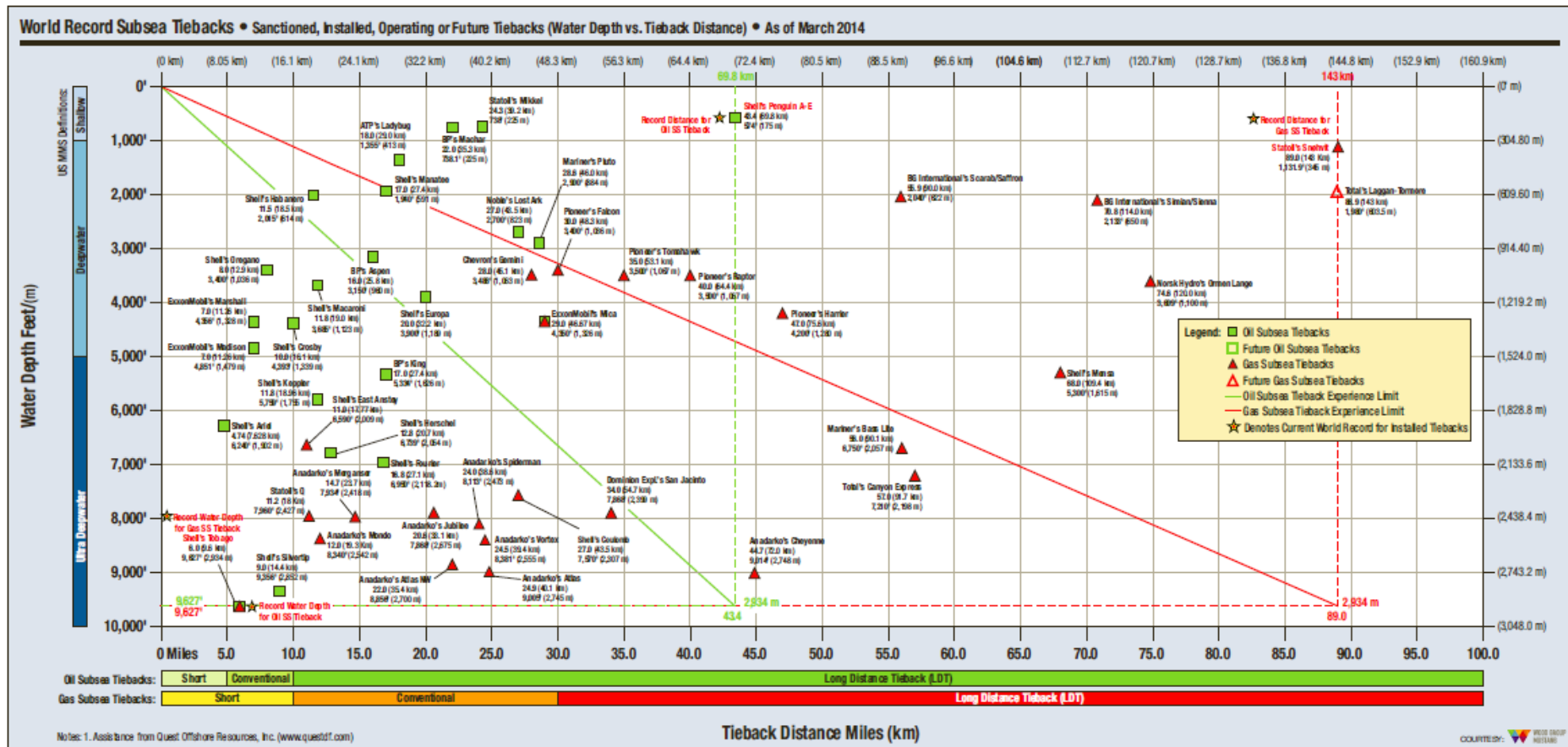


Figura 1.1 - Recordes mundiais de distância entre unidades de produção e poços (*OffShore Magazine* pôster, 2014)

Além das vantagens dos métodos bombeados, citadas acima, as bombas multifásicas submarinas trazem, segundo Hua et al (2011), as seguintes vantagens:

**Redução nos custos de intervenção em poços.** As bombas multifásicas submarinas têm sido instaladas no leito marinho com facilidades para serem removidas e instaladas por barcos de intervenção leve (*light workover*) e não por sondas, que tem um custo operacional significativamente maior. Uma bomba e motor recuperáveis, incluindo a ferramenta de instalação pesam, tipicamente, menos de 35 ton, o que permite a troca do conjunto motor-bomba por um barco de intervenção em menos de 24 horas (Grimstad, 2004). Comparando-se com uma bomba instalada dentro do poço (BCSS<sup>4</sup>), segundo Rodrigues et al (2005), em caso de falha, a interrupção da produção causa uma grande perda de receita e o tempo aguardando por uma sonda disponível para efetuar uma intervenção no poço e troca do conjunto motor-bomba é normalmente longo, na ordem de 25 dias.

**Redução no custo de desenvolvimento.** Estima-se que o custo de uma bomba multifásica seja aproximadamente 70% o de um equipamento de separação convencional (Dal Porto e Larson, 1997). Uma bomba multifásica normalmente aumenta a vazão de produção de um poço em alguns milhares de barris por dia, o que garante um retorno sobre o investimento, tipicamente na ordem de meses (Falcimaigne e Decarre, 2008).

**Permite o desenvolvimento de campos em ambientes hostis.** As bombas multifásicas podem eliminar a necessidade de uma unidade de produção próxima aos poços produtores. Algumas empresas operadoras no Ártico estão considerando o uso desta tecnologia para evitar a necessidade de uma plataforma de produção que poderia ficar rodeada por *icebergues* (Hua et al., 2011).

## 1.2

### Desafios do Bombeamento Multifásico

O bombeamento multifásico da corrente de produção não tratada ainda necessita superar alguns desafios. Dentre os quais se podem destacar:

**Mudanças nas condições de escoamento ao longo da vida do campo.** Um

---

<sup>4</sup> **BCSS:** acrônimo de bomba centrífuga submersa submarina, que é uma bomba centrífuga instalada dentro do poço produtor de petróleo

modelo de bomba é especificado tendo como base a expectativa de produção, o que envolve assumirem-se pressões de fundo, teores de água, frações de gás e outros parâmetros de reservatório. Com o tempo a produção real pode desviar-se destas expectativas iniciais, portanto, um sistema de bombeamento multifásico, deve ser dimensionado para atender a uma grande faixa de parâmetros operacionais para lidar com as variações nas condições de escoamento.

**Efeitos de compressão do gás.** Uma bomba multifásica é essencialmente um híbrido entre uma bomba e um compressor. Os gases são comprimidos até a descarga, o que leva a uma redução na fração volumétrica de gás livre (GVF<sup>5</sup>) e, conseqüentemente, na vazão volumétrica. Com isso há um aumento na massa específica da mistura. Especificamente, com o aumento da pressão, o volume do gás diminui, e aumenta a frequência de colisão entre as moléculas de gás, o que aumenta a temperatura. Normalmente, a bomba é refrigerada pelo fluido que passa em seu interior, mas, em condições de alto GVF, este efeito de compressão de gás pode resultar em um aumento significativo na temperatura. O que pode levar a falhas prematuras no sistema de bombeio.

**Variações no GVF.** Em fluxos transientes, é comum a ocorrência de escoamento no regime de golfadas. Este consiste em fluxos de pistões de líquido alternando com longas bolhas de gás. No regime de golfadas, o fluxo pode ser de somente líquido seguido por um fluxo de somente gás (i.e. o GVF vai de 0 a 100%), causando grandes flutuações na massa específica do escoamento. Isto induz variações abruptas no torque de eixo de bombas, o que pode causar danos ao sistema de bombeio. Para minimizar estes problemas, estas golfadas devem ser amortecidas até um nível aceitável para o sistema, de modo que as grandes bolhas devem ser quebradas em pequenas bolhas, antes de ingressar na sucção das bombas.

Para minimizar o efeito de variação no GVF em fluxos transientes, os sistemas de bombeamento multifásico necessitam de tanques de amortecimento ou misturadores gás-líquido.

Um misturador (ou tanque de amortecimento) é um vaso no qual o fluido (gás e líquido) é misturado e homogeneizado antes de entrar na bomba. Bratu (1995) demonstrou que um misturador pode amortecer variações abruptas no fluxo de entrada e, como resultado, a flutuação no torque de eixo é minimizada com o tempo.

---

<sup>5</sup> GVF – Acrônimo em inglês para *gas void fraction*, fração volumétrica de gás livre

Recentemente, Hua et al. (2011) mostrou que a presença de tanque de amortecimento pode reduzir substancialmente as flutuações. Sendo, portanto, uma solução viável para o problema.

A Figura 1.2 ilustra, na parte superior, o efeito do misturador nas vazões de gás e líquido, enquanto as pressões e o torque de eixo (*shaft torque*) são mostrados na parte inferior. No lado esquerdo são apresentados o comportamento da pressão na entrada e de saída de uma bomba e o torque de eixo sem a presença de um misturador ou tanque de amortecimento. No lado direito é possível comparar o efeito da inclusão de um misturador imediatamente antes de uma bomba. Percebe-se que com o misturador as flutuações de pressão na entrada da bomba e no torque de eixo são consideravelmente amenizadas.

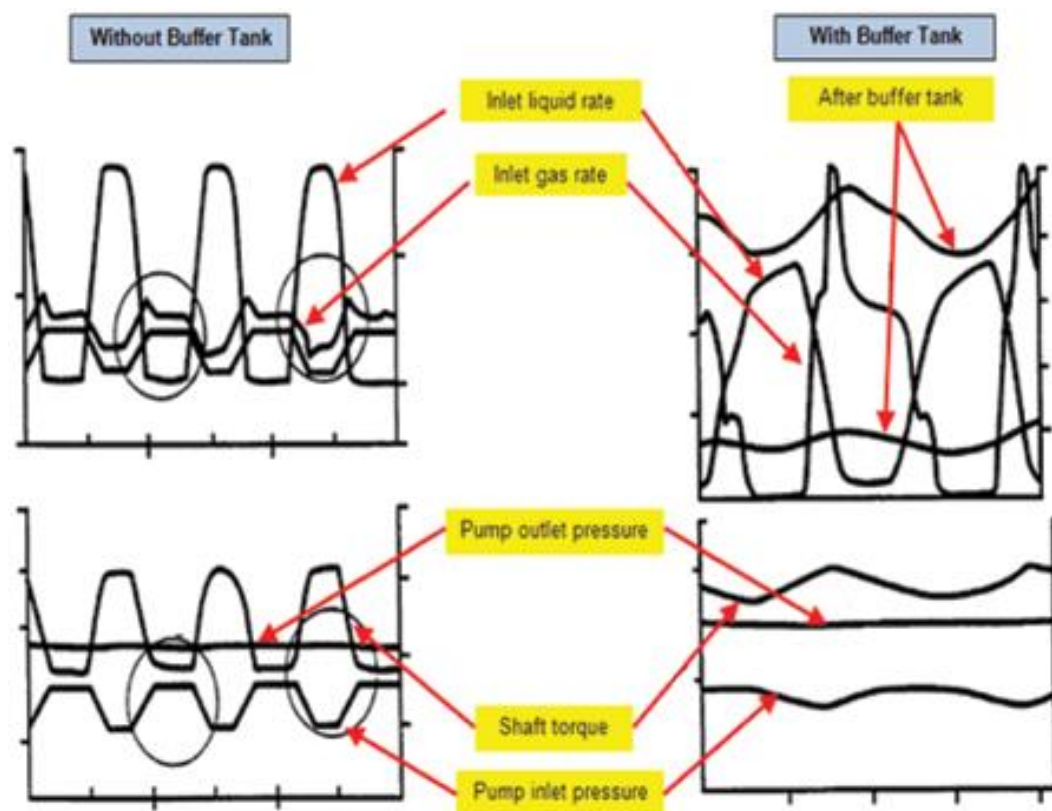


Figura 1.2 - Efeito de um tanque de amortecimento no torque de eixo (Hua et al., 2011)

A necessidade de se utilizar misturadores para que o emprego de bombas multifásicas submarinas seja viável, juntamente com resultados encorajadores encontrados na literatura, é a principal motivação para o desenvolvimento do atual projeto de pesquisa.

### 1.3

#### Objetivo

O presente trabalho visa modelar e investigar numericamente, o escoamento de gás e líquido em um misturador, utilizando o programa comercial CFX da ANSYS, de forma a determinar uma configuração geométrica que seja eficiente no amortecimento de golfadas.

Este projeto se insere numa linha de pesquisa do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, a qual visa desenvolver um protótipo de misturador gás-líquido para ser empregado na sucção de equipamentos submarinos de bombeamento multifásico.

Na próxima seção, a configuração do misturador selecionado para ser investigado neste trabalho é apresentada.

### 1.4

#### O Misturador

A geometria do misturador e os dados experimentais utilizados neste trabalho foram fornecidos pela PETROBRAS, como parte de um acordo de cooperação tecnológica com a PUC-Rio, para o desenvolvimento deste tipo de equipamento.

A Figura 1.3 e a Figura 1.4 mostram o projeto do misturador analisado neste trabalho, com suas dimensões. Este modelo foi construído pelo CENPES (Centro de pesquisas da PETROBRAS), em acrílico, com o objetivo de se investigar o comportamento do escoamento do fluxo bifásico (ar-água) em seu interior. Ele consiste basicamente em dois cilindros concêntricos, sendo o de menor diâmetro fechado na parte superior inserido no de maior diâmetro fechado em ambas as extremidades. No cilindro interno foram feitas diversas configurações de furos, por onde o fluxo multifásico é forçado a passar para poder sair pela parte inferior deste cilindro. O fluxo multifásico entra horizontalmente no misturador, por uma entrada lateral no cilindro externo, localizada próxima ao topo. O que se deseja é que as grandes bolhas, ao entrarem no misturador, sejam forçadas a passar pelos pequenos orifícios do cilindro interno fazendo-as se quebrarem em pequenas bolhas, gerando um fluxo de gás distribuído em pequenas bolhas na saída do misturador.

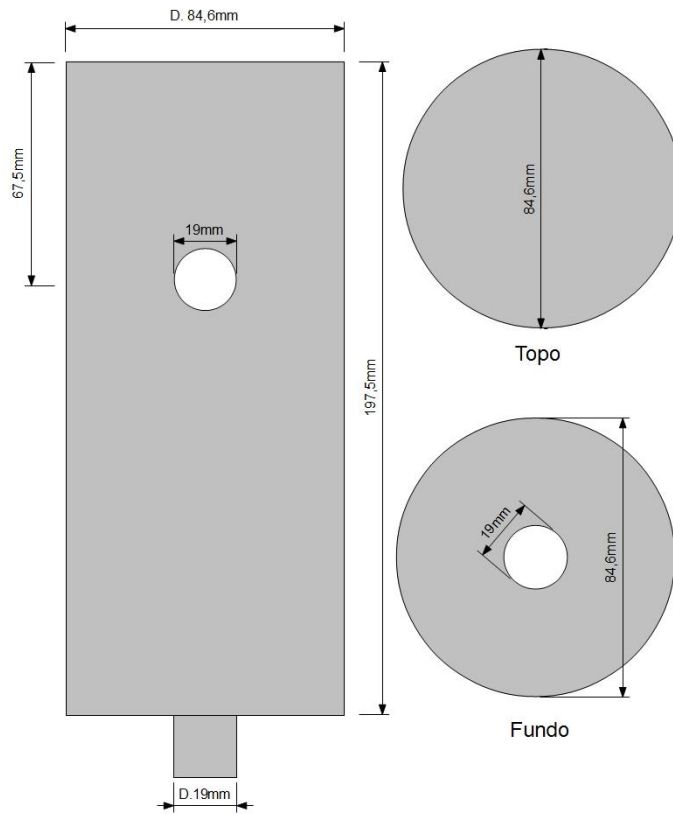


Figura 1.3 - Vista lateral do misturador com dimensões

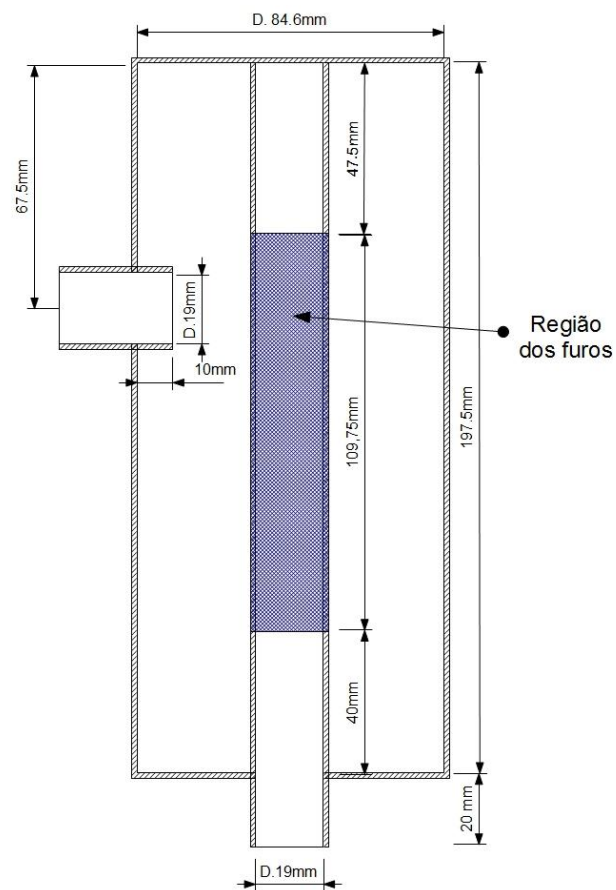


Figura 1.4 - Vista lateral em corte do misturador com dimensões



Outra função deste equipamento é ser uma fonte de líquido para o sistema de bombeamento. Armazenando em seu interior uma quantidade de líquido para, durante os momentos de escoamento de somente gás (em escoamento transiente com golfadas), garantir que o GVF na saída se mantenha, pelo menos por um determinado tempo, dentro do limite tolerável pelo sistema de bombeio.

Neste projeto o tubo interno pode ser substituído para modificar o tamanho e a disposição dos furos internos, conforme ilustrado na Figura 1.5, de forma a verificar a influência da geometria na perda de carga do sistema e no comportamento do escoamento na saída do misturador.

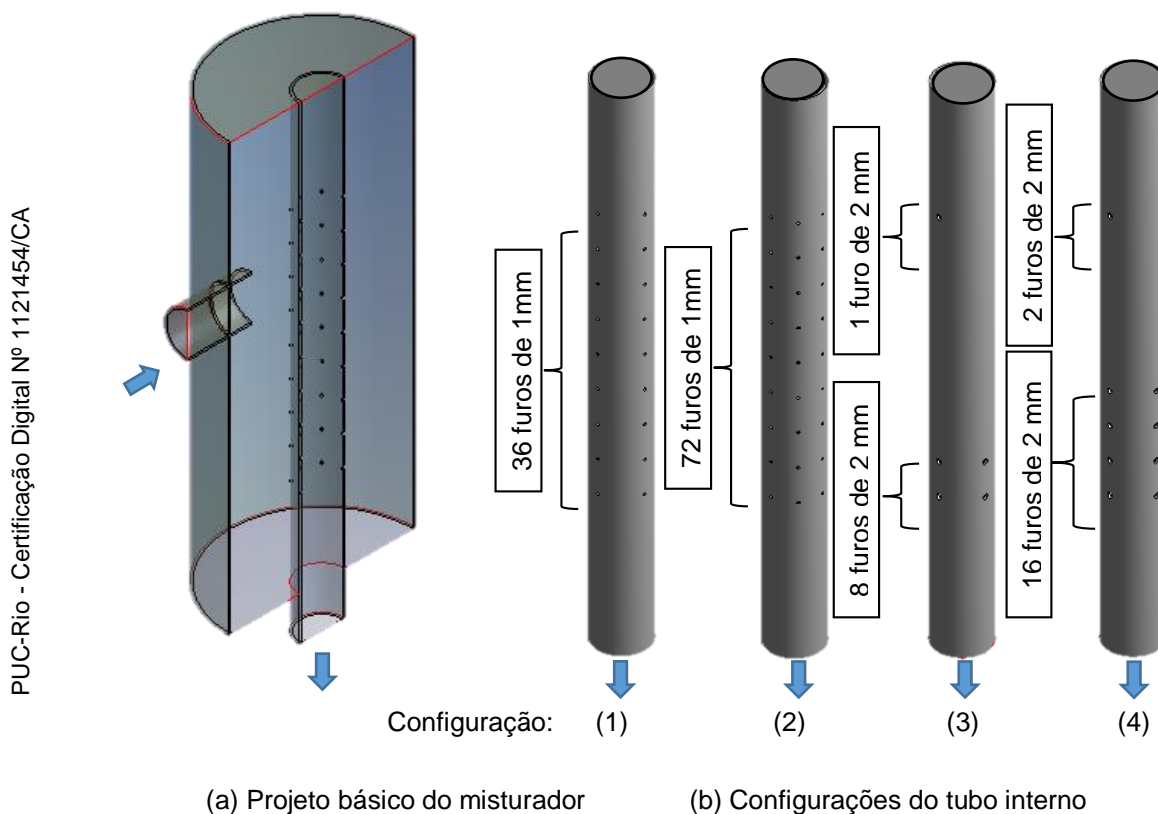


Figura 1.5 - Projeto do misturador

A Tabela 1.1 resume as configurações dos tubos internos informadas pela PETROBRAS e analisadas neste trabalho. As configurações foram projetadas de forma que os pares 1 – 3 e 2 – 4 tivessem a mesma área aberta ao fluxo. As configurações 1 e 2 têm os furos distribuídos uniformemente ao longo do tubo, enquanto as configurações 3 – 4 têm a maior parte dos furos concentradas na parte inferior do tubo.

Tabela 1.1 – Configuração dos furos internos

Configuração	FUROS		
	Diâmetro (mm)	Quantidade	Área aberta (mm <sup>2</sup> )
1	1,0	36	28,3
2	1,0	72	56,5
3	2,0	9	28,3
4	2,0	18	56,5

## 1.5

### Revisão Bibliográfica

Poucos trabalhos foram encontrados na literatura disponível sobre estudos de fluidodinâmica computacional em misturadores gás-líquido, porém foram encontrados diversos trabalhos investigando o comportamento de bolhas dispersas em um meio contínuo fluido, tipicamente ar e água.

Tosta da Silva (2010) investigou numericamente o comportamento de um escoamento bifásico (gás-líquido) através do modelo de um Poço Alojador de Bombeio, que tem geometria semelhante à de um misturador. O modelo utilizado para simulação da fase gás foi de bolhas incompressíveis monodispersas, com diâmetro de 0,5 cm.

Krepper (1999) demonstrou que, mesmo nas condições mais simples em um escoamento vertical bifásico, fortes efeitos tridimensionais são observados. Além disso, verificou que o estabelecimento dos perfis de vazão (regiões com somente gás) é principalmente influenciado pelas forças que agem perpendicularmente à direção do fluxo, i.e., não é influenciado fortemente pela força de arraste.

Krepper (1999) também identificou limites na utilização do modelo de bolhas monodispersas, verificando a necessidade do uso de modelos de bolhas polidispersas que considerem os efeitos de quebra e coalescência das bolhas.

Santos et al. (2007) trabalharam com diversas simulações de colunas de bolhas analisando a influência da fase contínua e de modelos de arraste sobre a hidrodinâmica de colunas de bolhas contendo Água e Ar ou Óleo e Ar. Os modelos utilizados foram os de Grace, Ishii-Zuber e Schiller-Naumann. Eles concluíram que a modelagem da deformação das bolhas para o cálculo do coeficiente de arraste é muito importante, e que os modelos de arraste utilizados para baixas velocidades (2

cm/s) representaram bem os fenômenos envolvidos, onde foi observado boa concordância com os dados da literatura obtidos em Chen et al., (1998).

Para o regime heterogêneo, onde existem mais de uma fase escoando com variações em suas distribuições e velocidades ao longo do escoamento, há trabalhos que desenvolvem modelos tentando correlacionar melhor a área interfacial entre fases, uma vez que as bolhas possuem tamanhos diferentes dando origem a uma distribuição de tamanhos de bolhas. A precisão dos campos do escoamento fica bastante limitada nesse regime caso um modelo de balanço populacional não seja incluído na modelagem, pois o fluxo da fase líquida depende do tamanho das bolhas, especialmente em escoamentos onde o empuxo é uma força dominante (Sha Laari e Turunen, 2006).

Para melhorar a representação destes escoamentos aumentando a precisão da estimativa da área interfacial entre as fases, modelos de balanço populacional são incluídos na solução das equações de transporte utilizando métodos de discretização ou métodos de momento.

Um método bastante utilizado de discretização é o *multi-size-group approach* (MUSIG), Lo (1996). No modelo MUSIG, a hidrodinâmica é simulada baseada na abordagem *Euleriana-Euleriana*. Um único campo de velocidades do gás é obtido para o tamanho médio das bolhas e usado para todos os grupos de tamanhos de bolhas. A distribuição do tamanho das bolhas é obtida ao se resolver as equações de balanço populacional para cada grupo, considerando os processos de quebra e coalescência de bolhas. A área interfacial entre as fases líquida e gasosa é calculada usando o diâmetro médio de Sauter (relação entre o somatório do volume e o somatório da área projetada das bolhas) e a fração volumétrica.

Riera-Ortiz et al (2011) explorou a capacidade dos modelos de turbulência de duas equações ( $k-\varepsilon$  e  $k-\omega$ ), assim como a inclusão das forças de sustentação e dispersão turbulenta na correta predição do *hold-up* de ar em uma coluna de bolhas. Os resultados provaram que os modelos de turbulência sozinhos não são suficientes para modelar quantitativamente as características do escoamento bifásico. Quando não foram consideradas as forças de sustentação e dispersão turbulenta, erros grandes foram encontrados. A inclusão destas forças interfaciais pode reduzir drasticamente o erro na previsão do *hold-up* de ar, resultando em erros inferiores a 1%, comparando-se com dados experimentais, conforme mostrado na Tabela 1.2.

Tabela 1.2 – Erro no *hold-up* de ar (Riera-Ortiz et al, 2011)

Modelo de turbulência	Força interfacial			Erro (%)
	Arraste (Ishii-Zuber, 1979)	Sustentação	Dispersão turbulenta (Lopes de Bertodano, 1991)	
$k-\varepsilon$	X			18,69
$k-\varepsilon$	X	X		0,18
$k-\varepsilon$	X	X	X	0,14
$k-\omega$	X	X	X	4,08

## 1.6

### Organização do Manuscrito

Neste primeiro capítulo apresentou-se uma breve introdução sobre o bombeio multifásico, ressaltando as vantagens de se optar por esta estratégia de produção e mostrando os principais obstáculos para a sua utilização. Ainda neste capítulo é descrito o misturador gás-líquido estudado e o objetivo do presente trabalho, além de uma revisão bibliográfica sobre trabalhos encontrados relacionados ao tema.

O modelo matemático *Euleriano-Euleriano* é descrito no Capítulo 2, bem como as relações de fechamento utilizadas e os métodos de discretização da fase dispersa.

O Capítulo 3 apresenta o método de solução numérica detalhando as técnicas para discretizar as equações através do método de volumes finitos, assim como os critérios e parâmetros utilizados. Este capítulo também aborda o teste de malha realizado.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados encontrados para os diversos parâmetros considerados e estes são comparados com os dados experimentais fornecidos pela PETROBRAS.

No Capítulo 5 é verificado o comportamento do modelo frente à presença de golfadas. Com base nos resultados é proposta uma nova configuração geométrica que se mostra mais tolerante à presença de golfadas.

As conclusões e algumas sugestões de trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 6.