Universidade Federal do Espírito Santo

CENTRO TECNOLÓGICO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

Bruno Peterle Vaneli

VALORIZAÇÃO DO EMPREGO DA HIDRODINÂMICA DE REATORES NOS SETORES

PETRÓLEO & GÁS E DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE ABASTECIMENTO:

UM ESTUDO COMPARATIVO

VITÓRIA-ES

2014

Bruno Peterle Vaneli

VALORIZAÇÃO DO EMPREGO DA HIDRODINÂMICA DE REATORES NOS SETORES PETRÓLEO & GÁS E DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE ABASTECIMENTO: UM ESTUDO COMPARATIVO

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Edmilson Costa Teixeira.

VITÓRIA-ES

2014

BRUNO PETERLE VANELI

VALORIZAÇÃO DO EMPREGO DA HIDRODINÂMICA DE REATORES NOS SETORES PETRÓLEO & GÁS E DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE ABASTECIMENTO: UM ESTUDO COMPARATIVO

Projeto de graduação apresentado à Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção de graduação em Engenharia Ambiental.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Edmilson Costa Teixeira

Universidade Federal do Espírito Santo Orientador

Prof. Dr. Daniel Rigo

Universidade Federal do Espírito Santo Examinador interno

M.Sc. Tercio Dal'Col Sant'Ana

Petrobras

Examinador externo

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Nilzete e Gilson, pelo incentivo e extremo apoio dados desde sempre;

Ao Leandro, pela troca de informações e pelas discussões acaloradas;

Aos meus familiares pelo apoio ao longo dessa caminhada, em especial ao tio Gilberto que cedeu sua casa durante anos;

À Sabrina pela injeção de alegria diária e por toda paciência que teve comigo nesse período;

À Dani e ao Maurício Sartori, por contribuírem na minha formação acadêmica, principalmente na temática da hidrodinâmica de reatores. Sempre atenciosos e com disposição em me ajudar.

Ao meu orientador, professor Edmilson por contribuir na minha formação acadêmica, por acreditar no meu potencial, por todas as dicas e conselhos, pelas valiosas contribuições neste trabalho, pelas oportunidades e amizade;

A todos os amigos de turma, que estiveram ao meu lado durante esses cinco anos de curso, sempre apoiando e contribuindo para um curso mais divertido;

E aos demais amigos que sempre torceram pelo meu sucesso, em especial ao grande Eduardo.

RESUMO

Os conhecimentos sobre hidrodinâmica de reatores são aplicados numa gama de processos, e em vários setores, de forma distinta e por razões também distintas. Assim, podem existir setores que valorizam mais a área da hidrodinâmica de reatores do que outros. O Laboratório de Gestão de Recursos Hídricos e Desenvolvimento Regional da Universidade Federal do Espírito Santo (LabGest) desenvolve pesquisa há muitos anos nesta área do conhecimento, visando contribuir para melhorias em processos de tratamento de águas. Todavia, tem percebido que o setor de tratamento de água de abastecimento relativamente pouco valoriza o que se tem de disponível em termos de aparato técnico-científico desenvolvido na área da hidrodinâmica de reatores. Assim, surge o interesse de verificar se isso também tem sido observado em outros setores, como o industrial. Assim, definiu-se como objetivo deste trabalho identificar e analisar fatores potencialmente determinantes na adoção do aparato técnico - científico da hidrodinâmica de reatores por um dado setor, tomando-se como estudos de caso os setores de tratamento de água de abastecimento e petróleo & gás. O setor de tratamento de água de abastecimento foi tomado como referência de estudo, visto a experiência do LabGest no desenvolvimento de pesquisas nesta área, enquanto que adotou-se o setor petróleo & gás como contraponto. Foi verificado que aspectos econômicos e ambientais são determinantes na adoção do aparato técnico - científico da hidrodinâmica de reatores no setor petróleo & gás. Já no setor de tratamento de água de abastecimento a adoção do aparato técnico – científico está associada principalmente à qualidade da água que deverá ser fornecida aos clientes, que, indiretamente e especialmente, se refere a aspectos de saúde pública. O trabalho aponta algumas medidas que poderão contribuir para uma maior valorização do emprego da hidrodinâmica de reatores no setor de tratamento de água de abastecimento. Entre elas: maior incentivo para que as companhias de saneamento firmem mais parcerias com instituições de ensino e pesquisa; mais investimento no fortalecimento da capacidade técnica disponível; integração da Política de Saneamento Básico com outras políticas ambientais; e promoção de políticas que favoreçam o aumento da competitividade no setor.

Palavras-chave: Hidrodinâmica de reatores, tratamento de água, petróleo & gás.

LISTA DE FIGURAS

| Figura 3.1: a) Escoamento pistão; b) Escoamento pistão com mistura longitudinal; | c) |
|---|-----|
| Mistura completa; d) Volume morto. Fonte: adaptado de Danckwerts (1953) | .11 |
| Figura 3.2: Produção de petróleo no Brasil. Fonte: Adaptado de Mendes et al. (201 | 2) |
| | .17 |
| Figura 3.3: Fluxograma do processamento primário de fluídos. Fonte: Thomas | |
| (2001) | 19 |
| Figura 3.4: Diagrama esquemático de um separador trifásico horizontal. Fonte: | |
| | 21 |
| Jaworski e Meng (2009). | |
| Figura 3.5: Vaso separador e suas quatro seções típicas. Fonte: Thomas (2001) | |
| Figura 3.6: Hidrociclone. Fonte: Nunes (2007) | 24 |
| Figura 3.7: Distribuição radial de pressão no interior de um hidrociclone. Fonte: | |
| Marins (2007) | .25 |
| Figura 3.8: Fluxograma esquemático do SSAO piloto de Marlim. Fonte: Moraes et | al. |
| (2012) | .27 |
| Figura 3.9: Loop de testes para avaliação da movimentação de areia no separador | ſ |
| tubular. Fonte: Moraes et al (2011c) | .38 |
| Figura 3.10: Linhas de corrente dos fluidos, coloridas por tempo de residência. | |
| Fonte: Moraes <i>et al</i> (2011c) | .39 |
| Figura 3.11: Danos potenciais ao meio ambiente devido ao descarte <i>in natura</i> de | |
| lodo de ETAs. Fonte: adaptado de Achon <i>et al.</i> (2005) | 12 |
| | |
| Figura 3.12: Floculador hidráulico do tipo chicanas horizontais. Fonte: Vianna (200 | • |
| | 44 |
| Figura 3.13: Tratamento convencional da água, para fins de potabilização. Fonte: | |
| Pelissari (2006). | 46 |
| Figura 3.14: Floculador tubular helicoidal. Fonte: Silva (2007) | .50 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|-------------------|--|
| В | Largura |
| C (t) | Concentração do traçador no instante t |
| CFD | Computational Fluid Dynamics |
| E (t) | Função densidade de tempo de residência |
| DTR | Distribuição do Tempo de Residência |
| L | Comprimento |
| LDV | Velocimetria por <i>laser</i> |
| Мо | Índice Morril |
| Р | Pressão |
| PIV | Velocimetria por Imagem de Partícula |
| Q | Vazão |
| t | Tempo |
| ti | Tempo inicial de passagem do traçador |
| t10 | Tempo de chegada de 10% da massa de traçador |
| tp | Tempo de passagem da máxima concentração de traçador |
| TMR | Tempo Médio de Residência |
| TMR_{r} | Tempo Médio de Residência real |
| TMR _e | Tempo Médio de Residência estimado |
| Va | Volume ativo do reator |
| V _{real} | Volume real ocupado |
| Vestim. | Volume estimado |
| _2 (Τ | Índice de dispersão |

SUMÁRIO

| 1 | INT | RODUÇAO | 6 |
|---|-------|---|----|
| 2 | ОВ | JETIVOS | 8 |
| | 2.1 | OBJETIVO GERAL | 8 |
| | 2.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 8 |
| 3 | RE\ | /ISÃO BIBLIOGRÁFICA | 9 |
| | 3.1 | HIDRODINÂMICA DE REATORES | 9 |
| | 3.2 | CARACTERIZAÇÃO DO SETOR PETRÓLEO & GÁS | 14 |
| | 3.2.1 | Processamento primário do petróleo | 18 |
| | 3.2.2 | Processamento primário de petróleo submarino | 25 |
| | 3.3 | HIDRODINÂMICA DE REATORES APLICADA AO SETOR PETRÓLEO & GÁS | 28 |
| | 3.3.1 | Separadores gravitacionais trifásicos | 30 |
| | 3.3.2 | | |
| | 3.3.3 | · | |
| | 3.4 | CARACTERIZAÇÃO DO SETOR DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE ABASTECIMENTO | |
| | 3.4.1 | -1 3 | |
| | 3.4.2 | | 42 |
| | 3.5 | HIDRODINÂMICA DE REATORES APLICADA AO SETOR DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE | |
| | | ECIMENTO | |
| | 3.5.1 | | |
| | 3.5.2 | Unidade de contato | 51 |
| 4 | ME | TODOLOGIA | 53 |
| | | VERIFICAÇÃO DO NÍVEL DE APLICAÇÃO, EM CAMPO, DE CONHECIMENTOS SOBRE | |
| | HIDRO | DINÂMICA DE REATORES PELOS DOIS SETORES ESTUDO DE CASO | 53 |
| | 4.2 | AVALIAÇÃO DAS RAZÕES DE UM SETOR VALORIZAR MAIS A ÁREA DA HIDRODINÂMICA D | E |
| | REATO | RES DO QUE O OUTRO | 54 |
| 5 | RES | SULTADOS E DISCUSSÃO | 55 |
| | 5.1 | VERIFICAÇÃO DO NÍVEL DE APLICAÇÃO, EM CAMPO, DE CONHECIMENTOS SOBRE | |
| | HIDRO | DINÂMICA DE REATORES PELOS DOIS SETORES ESTUDO DE CASO | 55 |
| | 5.1.1 | | |
| | 5.1.2 | 5 | |
| | 5.2 | AVALIAÇÃO DAS RAZÕES DE UM SETOR VALORIZAR MAIS A ÁREA DA HIDRODINÂMICA D | E |
| | REATO | RES DO QUE O OUTRO | 62 |

| 6 C | ONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES68 | |
|-----|--|--|
| 6.1 | Conclusões | |
| 6.2 | RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS70 | |
| 7 R | EFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS71 | |

1 INTRODUÇÃO

O diagnóstico de deficiências operacionais e a caracterização de novos equipamentos, em escala piloto ou real, são atividades comuns nas indústrias de processo. Como a maioria dos processos que ocorrem no setor industrial e em outros setores como o de saneamento, por exemplo, é dependente do comportamento do escoamento de fluidos no interior de suas respectivas unidades, é imprescindível que se compreenda as características hidrodinâmicas das mesmas a fim de aperfeiçoar o processo de produção.

Desta forma, a hidrodinâmica de reatores apresenta papel de destaque quando o tema é otimização de processo, auxiliando na maximização de sua eficiência, na minimização de custos de operação e também na minimização da geração de subprodutos indesejáveis que, por sua vez, podem acarretar prejuízos à saúde humana, ao meio ambiente (TEIXEIRA, 1993) e ao próprio processo.

O estudo da hidrodinâmica de reatores é aplicado numa gama de processos, e em vários setores, de forma distinta e por razões também distintas. Assim, podem existir setores que valorizam mais essa área do conhecimento quando comparados a outros. Esta valorização poderá depender de características intrínsecas ao próprio setor.

Em alguns setores, por exemplo, uma das principais razões em se investir na área de hidrodinâmica, implicando na concepção de novas tecnologias ou no aperfeiçoamento de uma já existente, está atrelada à solução de problemas ambientais oriundos do próprio processo. Ao lançar um poluente no meio ambiente, a empresa responsável pode ter sua imagem abalada perante os clientes e a sociedade. Assim, investir no estudo da hidrodinâmica a fim de otimizar seu processo contribuirá para evitar impactos negativos.

Geralmente, a escolha de um determinado aparato tecnológico para um processo leva em consideração aspectos hidráulicos, hidrodinâmicos, químicos, biológicos, entre outros. Porém, como visto no exemplo acima, essa escolha pode depender não só desses aspectos, mas de fatores extras, como a própria questão ambiental citada, além de outros aspectos, como os econômicos.

Dada a relevância da área de dinâmica dos fluidos no que tange à otimização de processos, o Laboratório de Gestão de Recursos Hídricos e Desenvolvimento Regional da Universidade Federal do Espírito Santo (LabGest) desenvolve pesquisa há muitos anos nesta área do conhecimento, atuando concomitantemente nas áreas de floculação, sedimentação e desinfecção, visando contribuir para melhorias nos processos de tratamento de água e efluentes aplicando a estes os conhecimentos sobre hidrodinâmica de reatores.

Todavia, apesar de muito avanço em termos de ciência e tecnologia na área de tratamento de água e efluentes ao longo dos anos, o LabGest tem percebido que este setor relativamente pouco valoriza o que se tem de disponível em termos de aparato técnico-científico desenvolvido na área da hidrodinâmica de reatores. Neste sentido, surge o interesse de verificar se isso também tem sido observado em outros setores, como o industrial. Outro ponto que surge como consequência, se diz respeito às razões / aspectos de um setor dar relativamente maior valor a área da hidrodinâmica de reatores do que outro.

Neste contexto, este trabalho busca estudar se a escolha / definição do que é utilizado, por um determinado setor, em termos de aparato técnico-científico disponível na área da hidrodinâmica de reatores, é dependente de fatores extras, como a questão ambiental supracitada, o fator econômico, dentre outros.

Para isso, tomou-se o setor de tratamento de água de abastecimento como referência de estudo, visto a experiência que o LabGest possui no desenvolvimento de pesquisas nesta área. E como contraponto, adotou-se o setor petróleo & gás. A escolha deste setor industrial se deve às características do mesmo, no qual suas atividades envolvem, entre outras relevantes, elevado capital, tecnologias de ponta e o risco de impacto ao meio ambiente.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Identificar e analisar fatores potencialmente determinantes na adoção do aparato técnico - científico da hidrodinâmica de reatores por um dado setor, tomando-se como estudos de caso os setores de tratamento de água de abastecimento e petróleo & gás.

2.2 Objetivos Específicos

- Verificar o nível de aplicação, em campo, de conhecimentos sobre hidrodinâmica de reatores pelos dois setores estudo de caso.
- Avaliar quais as razões de um setor valorizar mais a área da hidrodinâmica de reatores do que o outro.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A fim de fornecer subsídios para o desenvolvimento e execução dos objetivos propostos, realizou-se revisão/análise bibliográfica utilizando variadas fontes de referência. A revisão bibliográfica encontra-se divida em três grandes tópicos: conhecimentos gerais sobre a área da hidrodinâmica de reatores; caracterização dos setores considerados neste estudo; e hidrodinâmica de reatores aplicada aos setores estudados. Estes tópicos foram necessários para o desenvolvimento do primeiro e segundo objetivos específicos.

No tópico 3.1 é apresentada uma revisão acerca dos conhecimentos gerais sobre hidrodinâmica de reatores. Nos tópicos 3.2 e 3.4 foi realizada uma caracterização do setor petróleo & gás e de tratamento de água de abastecimento, respectivamente, abordando a situação atual no Brasil, as principais características do setor, os principais processos envolvidos nos mesmos, os principais reatores utilizados em seus respectivos processos, entre outras informações. Já nos tópicos 3.3 e 3.5, fezse um levantamento do aparato técnico - científico disponível para ambos os setores, no que se refere à área da hidrodinâmica de reatores.

3.1 Hidrodinâmica de reatores

A hidrodinâmica de reatores é a área do conhecimento que estuda as características e a dinâmica do escoamento de fluidos em unidades de processo. Como a maioria dos processos que ocorrem no setor industrial e em outros setores são dependentes do comportamento do escoamento no interior de suas respectivas unidades, é necessário que se compreenda as características hidrodinâmicas no interior das mesmas a fim de otimizar o processo de produção.

Entende-se por otimização de processo: a minimização de custos de construção e operação do sistema de produção, maximização da eficiência de processo e minimização da formação de subprodutos indesejáveis ao ser humano e ao meio ambiente (TEIXEIRA, 1997). Ou seja, não basta ter alta eficiência de processo se os custos são elevados, se são gerados muitos subprodutos que podem trazer prejuízos à saúde humana e ao meio ambiente.

Uma das formas de se avaliar o comportamento do fluido no interior de unidades de processo se dá por meio do estudo do campo de escoamento do fluido. O campo de escoamento pode ser obtido por meio de técnicas de visualização, ou por meio de medição direta, o que nem sempre é viável, pois os equipamentos que medem velocidade sem provocar perturbação no escoamento, em geral são extremamente caros (TEIXEIRA, 1993). Um exemplo desses equipamentos são *lasers* que podem ser utilizados para o estudo da hidrodinâmica do escoamento em unidades de processo por meio da avaliação do campo de velocidade, turbulência, gradientes e outras propriedades do escoamento sem provocar perturbação no mesmo (técnica não intrusiva).

Algumas técnicas a base de *laser* que vem crescendo bastante são a *LDV* (velocimetria por laser) e a *PIV* (velocimetria por Imagem de partícula) (MARINS, 2007). Porém, essas técnicas sofisticadas de avaliação somente são utilizadas em processos nos quais há a necessidade de se conhecer detalhadamente o que está ocorrendo no escoamento. Estas técnicas mais avançadas são bastante utilizadas no setor petróleo & gás onde altas cifras de dinheiro estão envolvidas de forma que, conhecer detalhadamente as características hidrodinâmicas em um reator pode representar alto ganho financeiro no futuro.

Outra forma de se analisar a hidrodinâmica do escoamento em reatores, com menor custo, se dá por meio da interpretação da curva de Distribuição do Tempo de Residência (DTR), sendo uma técnica de avaliação da hidrodinâmica bastante empregada em estudos acadêmicos na área de saneamento. Esta curva informa as características do padrão de escoamento e do tempo de contato entre fluidos em um recipiente, além de permitir a modelagem do sistema e ajudar na concepção de reatores, a fim de se obter ou manter um padrão de fluxo desejado (BEHIN e AGHAJARI, 2008).

A importância da distribuição dos tempos de residência nos sistemas de fluxo contínuo foi apresentada pela primeira vez por Danckwerts (1953) e uma metodologia para obtê-la é a técnica de traçadores.

A técnica de traçadores consiste na injeção de um traçador em uma determinada seção do reator, geralmente na entrada, onde sua concentração é monitorada em

uma seção à jusante da seção de injeção. Caso, a injeção do traçador for instantânea (função Delta de Dirac), a DTR do reator poderá ser obtida a partir da distribuição de concentrações na seção de monitoramento de forma direta.

Desta forma, adotando o instante de injeção do traçador em t=0, a concentração na seção de monitoramento, em um dado instante t, será $\mathcal{C}(t)$. Assim, pode-se obter a função densidade de tempo de residência, $\mathcal{E}(t)$, definida como a fração de elementos que saem com tempo entre t e t+dt. Considerando uma injeção instantânea, $\mathcal{E}(t)$ pode ser obtida por meio de normalização da concentração de saída em relação à área da curva $\mathcal{C}(t)$, da seguinte forma (DANCKWERTS, 1953):

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^\infty C(t)dt}$$
 (1)

Segundo Danckwerts (1953) quando um fluido escoa de forma contínua em um reator podem ser feitas duas considerações ideais: ou o fluido está completamente misturado no interior do reator de tal forma, que todas as suas propriedades são homogêneas em qualquer ponto a qualquer tempo (mistura completa), ou os elementos de fluido que entram no reator possuem mesma velocidade, seguem caminhos paralelos e retilíneos, saindo todos ao mesmo tempo (escoamento pistão).

De acordo com as características hidrodinâmicas do escoamento, a função E(t) pode se aproximar de uma das curvas apresentadas na Figura 3.1:

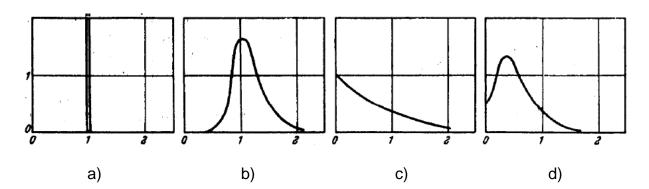


Figura 3.1: a) Escoamento pistão; b) Escoamento pistão com mistura longitudinal; c) Mistura completa; d) Volume morto. Fonte: adaptado de Danckwerts (1953).

- a) Escoamento pistão perfeito: Nunca irá ocorrer com fluidos newtonianos, pois nesses fluidos deverá sempre haver mistura longitudinal devido aos efeitos viscosos e a difusão molecular e turbulenta. É um escoamento ideal;
- b) Escoamento pistão com mistura longitudinal: Este escoamento se aproxima dos escoamentos reais;
- c) Mistura completa: Escoamento no qual o fluido está completamente misturado no interior do reator. É um escoamento ideal;
- d) Volume morto ou zona morta: Curva esperada quando há presença de um volume "morto" ou inútil no reator, no qual o fluido possui um tempo de residência bem superior ao tempo médio de detenção do mesmo. Este escoamento se aproxima de escoamentos reais.

O Tempo Médio de Residência (*TMR*) pode ser calculado a partir da seguinte equação:

$$TMR = \frac{\int_0^\infty tC(t)dt}{\int_0^\infty C(t)dt}$$
 (2)

O limite superior da integral nas equações acima pode ser substituído por algum tempo finito, *T*, a partir do qual o traçador não poderá mais ser detectado. Destarte, segundo Danckwerts (1953), o *TMR* também pode ser obtido a partir de:

$$TMR = \frac{V_a}{Q} \tag{3}$$

Onde, V_a é o volume ativo do reator e Q a vazão na seção do reator.

Acima foram apresentadas as curvas dos escoamentos considerados ideais e dos escoamentos que ocorrem na prática. O grau de desvio entre as características hidrodinâmicas do escoamento ideal e as características observadas na prática é dado pela eficiência hidráulica (TEIXEIRA, 1993). Tais desvios são causados pela existência de curtos-circuitos, zonas mortas, recirculações e mistura, definidos a seguir:

Curtos circuitos: caminhos percorridos por partículas de fluido que resultam em tempos de residência no reator inferiores ao tempo teórico de residência (T).

Zonas mortas: regiões do reator em que os tempos de residência de partículas de fluido no seu interior são, em média, relativamente altos, quando comparados ao valor de T. Estes regimes são caracterizados pela baixa troca com regiões adjacentes.

Recirculações: são trajetórias rotacionais percorridas pelas partículas do fluido dentro do reator.

Mistura: é o espalhamento aleatório de constituintes no volume reacional do reator, causado pela composição de diversos efeitos, tais como a difusão, a advecção diferenciada e as correntes de densidade.

A eficiência hidráulica de uma unidade de fluxo contínuo pode ser avaliada por meio de indicadores de eficiência hidráulica. Com base no conceito físico dos indicadores de eficiência hidráulica presentes na literatura e em análises estatísticas Siqueira (1998), determinou os indicadores mais apropriados para apontar níveis de curto circuito e mistura, são eles:

- a) Tempo inicial de passagem (t_i): tempo inicial de passagem do traçador na saída da unidade. Apenas indica a intensidade de curto-circuito no domínio tempo. Pode ser definido como o tempo no qual a concentração de traçador na saída equivale a 10% de C_0 .
- b) Tempo de chegada de 10% da massa de traçador (t_{10}): o tempo que 10% da massa de traçador injetada leva para deixar a unidade. Trata-se de um bom indicador dos níveis de curto-circuito.
- c) Tempo de passagem da máxima concentração de traçador (tp): tempo de passagem da máxima concentração de traçador na saída da unidade. Para situações com altos índices de curto-circuito, t_p , do ponto de vista físico, é um bom indicador, por resultar em valores relativamente não muito maiores que t_i .

- d) Índice de Dispersão (σ^2): o índice de dispersão (adimensional) é o indicador de mistura que possui o melhor embasamento físico. Está diretamente relacionado com a variância da curva de passagem, portanto indica o grau de espalhamento do traçador no interior da unidade.
- e) Índice de Morril (Mo): o índice de Morril é definido como sendo a razão entre o tempo de passagem de 90% e 10% da massa de traçador na saída da unidade (Mo = t_{90}/t_{10}).

3.2 Caracterização do setor petróleo & gás

O setor petróleo & gás apresenta características bem particulares quando comparado a outros setores, dentre elas destacam-se: o caráter exaurível do recurso petróleo já que é um recurso limitado, o elevado capital de risco devido às complexas atividades envolvidas, a estrutura oligopólica e internacionalizada formada pelas próprias características do setor e a elevada tecnologia envolvida no processo de exploração e produção (CAMPOS, 2007).

O grande volume de capital querido para investimentos e o nível de capacitação tecnológico necessário ao logo de toda a cadeia de produção engloba atividades de amplitude mundial, multiprodutos, o controle de reservas de petróleo, o controle de mercado e também de tecnologia, resultando em alta competitividade, característica forte do setor.

Observa-se que a capacitação tecnológica e o desenvolvimento de tecnologias influenciam na competitividade do setor.

A indústria do petróleo constitui uma cadeia de atividades que vai desde a prospecção de uma jazida até a distribuição de derivados ao consumidor. Consequentemente, caracteriza-se por uma grande heterogeneidade tecnológica e uma vasta gama de processos produtivos. Os principais segmentos deste setor são: à montante, exploração e produção, e, à jusante, transporte, refino e distribuição. Neste trabalho será dado maior destaque às etapas de montante, principalmente ao processamento primário de fluidos. Este destaque ao processamento primário se deve às características desta etapa, dentre elas: elevado capital envolvido, aplicação

de tecnologias de ponta, o risco de impacto ao meio ambiente e por envolver processos de separação de fluidos e sólidos. Características essas, que podem auxiliar no entendimento de como o setor petróleo e gás aplica os conhecimentos sobre hidrodinâmica de reatores.

As complexidades e os altos custos na produção de petróleo em novas fronteiras no mar, sobretudo devido à atual exploração e produção de petróleo em águas profundas, levaram as empresas petroleiras, ao longo do contínuo avanço das explorações offshore, a adotar ações cooperativas, por meio de esforços conjuntos de pesquisa e desenvolvimento, envolvendo as próprias petroleiras, Universidades, instituições de pesquisa, e o investimento na construção de centros de pesquisa próprios.

Os esforços em pesquisa e desenvolvimento destinados à obtenção de novos equipamentos e sistemas para a produção de petróleo em novas fronteiras no mar demandam o concurso de amplo e variado conjunto de disciplinas e ciências, incluindo aí o estudo da hidrodinâmica de escoamento de fluidos e uma infinidade de outros estudos complementares. A complexidade das tecnologias de produção offshore, está associada aos seguintes fatores: ao conjunto de conhecimentos científico e tecnológico de áreas diferentes incorporado em uma mesma tecnologia, à necessidade de realizar melhorias contínuas na tecnologia à medida que as condições de produção do campo petrolífero vão sendo alteradas; e à integração de vários subsistemas (elétrico, mecânico, etc) em um mesmo equipamento.

Segundo Jaworski e Meng (2009), uma maneira de amenizar os custos crescentes da exploração de petróleo e economizar espaço seria melhorar as instalações de produção existentes a fim de aperfeiçoar cada vez mais o processo de produção. Neste ponto se insere a importância do estudo da hidrodinâmica do escoamento no interior das unidades que compõem o processo produtivo, a fim de diagnosticar deficiências operacionais e auxiliar na caracterização de equipamentos mais compactos e de maior eficiência.

De acordo com o World Energy Outlook (2005), a demanda global de energia vai aumentar em cerca de 60% ao longo dos próximos 30 anos, sendo que os combustíveis fósseis (petróleo, gás e carvão) irão continuar dominando o consumo

global de energia. Por consequência do aumento da demanda e do custo de extração, os preços desses hidrocarbonetos deverão permanecer elevados.

Com o aumento da demanda de produção de óleo, os equipamentos nas plantas de processo tendem a crescer e ocupar cada vez mais espaço. Como os custos de construção podem aumentar exponencialmente com o tamanho e o peso do equipamento, a redução da dimensão de equipamentos principalmente em plantas de processo *offshore* onde existem restrições de peso e espaço, tem sido estudada há muito tempo. Somado a isto, existe o fato de que as leis ambientais tendem a se tornar cada vez mais rígidas, principalmente no que se refere ao lançamento de efluentes no mar, exigindo que o processo produtivo seja cada vez mais eficiente (JAWORSKI E MENG, 2009).

Com isso, face aos aspectos econômicos e ambientais, diversos fatores são considerados para planejar um sistema de gerenciamento de efluentes para exploração e produção de petróleo a fim de cumprir a legislação. Dentre esses fatores, cita-se a minimização de custos de construção, operação e manutenção das unidades de tratamento e agregação de valor ao efluente, como por exemplo, a reinjeção em reservatórios e a disposição final adequada (CAMPOS *et al.*, 2012).

Já a otimização de peso e de espaço se tornam variáveis ainda mais importantes quando se trata das unidades de produção para o pré-sal. As grandes jazidas do pré-sal encontram-se a mais de 100 quilômetros da costa, o que implica em algumas condicionantes ao armazenamento e ao transporte do óleo produzido. Devido à distância, as unidades de produção devem ser projetadas para acumular o máximo de óleo para posteriormente ser transportado. Dessa forma, o espaço ocupado pelas plantas de processamento primário deve ser o mais enxuto possível. Além disso, o peso dos equipamentos é uma variável que afeta a estabilidade da plataforma em alto mar sendo priorizada a engenharia de equipamentos mais leves e compactos (OLIVEIRA, 2013).

Com as descobertas, na Bacia de Santos, de reservas gigantes de petróleo na camada geológica do Pré - sal no ano de 2006, as reservas brasileiras aumentaram de modo significativo e, por conseguinte as explorações de petróleo também. Estima-se que, em 2020, a produção proveniente do Pré - sal representará cerca de

47% da produção total de petróleo da Petrobras no Brasil. As rochas do Pré - sal estendem-se por cerca de 800 quilômetros da plataforma marítima brasileira, do norte da Bacia de Campos ao sul da Bacia de santos, compreendendo uma faixa que se estende do litoral sul do Espírito Santo ao estado de Santa Catarina, com largura de até 200 km. Estas rochas estão comprimidas abaixo de uma extensa camada de sal, a 3000 metros abaixo do solo marinho, e apresentam alto potencial para a exploração de petróleo (MORAIS, 2013).

A maior parte da produção de petróleo no Brasil ocorre em alto mar e em águas profundas. A participação do petróleo *offshore* vem crescendo sistematicamente no decorrer dos anos. Atualmente, 91% da produção de petróleo brasileira é realizada no mar. Estima-se que este valor seja de 97% em 2020 (Mendes *et al.*, 2012). A Figura 3.2 apresenta a produção de petróleo no Brasil em milhares de barris por dia (Mbbl/d) até o ano de 2010. E também a estimativa da produção *offshore* em 2020.

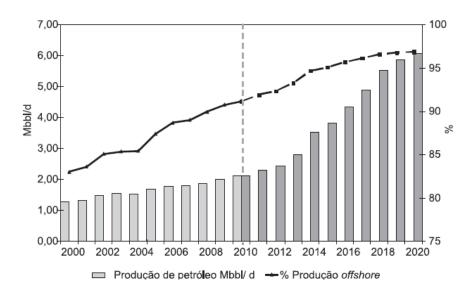


Figura 3.2: Produção de petróleo no Brasil. Fonte: Adaptado de Mendes et al. (2012)

No cenário atual o Brasil vem se mostrando com alto potencial para exploração e produção de petróleo, ganhando cada vez mais destaque no cenário mundial. Os níveis de investimentos feitos pelo setor petróleo & gás no país chamam atenção. Segundo o Plano de Negócios da Petrobras (PN 2014-2018) são previstos investimentos da ordem de US\$ 220,6 bilhões, onde 70% deste valor deverá ser investido na etapa de exploração e produção. Só na etapa de produção deverão ser investido cerca de US\$ 112,5 bilhões (PETROBRAS, 2014).

3.2.1 Processamento primário do petróleo

As misturas emergentes, na produção de petróleo, a partir dos poços, contêm tipicamente óleo, água de formação, gás e sólidos. Como existe interesse econômico na produção de hidrocarbonetos (óleo e gás) a separação primária é fundamental para estabelecer os fluxos de produção de petróleo e de gás, e simultaneamente estabelecer um fluxo de água produzida relativamente limpo a fim de atender à legislação ambiental vigente (JAWORSKI e MENG, 2009). Este ultimo ponto tem obrigado as empresas de exploração e produção de petróleo a melhorar seus sistemas de tratamento de efluentes por meio de investimento no estudo de novas tecnologias de separação.

Na produção primária de fluidos, geralmente utilizam-se, no início do processo, vasos separadores bifásicos e/ou trifásicos podendo ser horizontais ou verticais (NUNES, 1994). Eles são os responsáveis pela separação primária das fases liquidas e gasosa. A partir daí, três correntes efluentes seguem para destinos diferentes:

- a) a fase gasosa com fase líquida (óleo + água) carreada é encaminhada para a UPGN (Unidade de Processamento de Gás Natural), após passar por torres de absorção e/ou adsorção para retirada da fase líquida (desidratação) e de gases ácidos (dessufurização). Em muitos casos, a corrente de gás pode ser queimada devido à inviabilidade econômica do tratamento da mesma;
- b) a fase óleosa com água é encaminhada até os tratadores de óleo, geralmente tratadores eletrostáticos, para a retirada de água e outros compostos químicos (enxofre, sais, etc.) até os limites aceitos para o refino;
- c) e a fase aquosa com óleo passa para o tratamento de água, de onde ela possa ser reinjetada nos poços ou descartada no mar. Nesse tratamento utilizam-se flotadores ou hidrociclones.

No processo de produção do petróleo, a água é um dos contaminantes mais indesejados sobre duas óticas, a econômica e a ambiental: ao ser produzida, a mesma deve ser removida na plataforma de produção, caso contrário aumentará o custo de transporte de fluidos às refinarias, uma vez que será transportado um bem

que não tem valor no processo produtivo de refino. Além disso, por apresentar elevado teor de sal em sua composição, pode causar incrustações no sistema de transporte e dificultar a operação das refinarias. Já do ponto de vista ambiental, o descarte de água produzida sem tratamento adequado pode acarretar impacto no meio ambiente visto a toxicidade de seus constituintes e a quantidade de compostos orgânicos que carrega consigo. Isto sem falar nos componentes que são adicionados a mesma ao longo do processo, como inibidores de corrosão e incrustação, desemulsificantes, polieletrólitos, entre outros.

A fim de evitar estas circunstâncias, os equipamentos de separação de água e óleo devem ser bastante eficientes a fim de reduzir custos e levar em consideração a qualidade da água destinada ao descarte no mar, de tal forma que não se ultrapasse os limites estabelecidos pela Resolução nº 393/2007 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) que estabelece a concentração média mensal (29 mg/l) e máxima diária (42 mg/l) de óleos e graxas da água destinada ao descarte no mar.

A Figura 3.3 resume as principais etapas que ocorrem no processamento primário do petróleo.

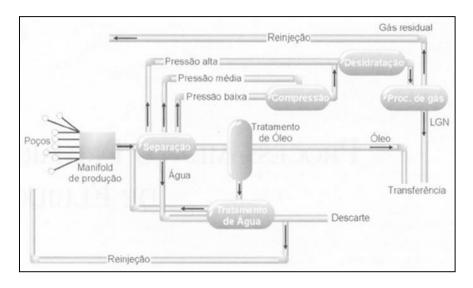


Figura 3.3: Fluxograma do processamento primário de fluídos. Fonte: Thomas (2001).

Segundo Thomas (2001) no processamento primário de fluidos, os principais mecanismos de separação utilizados são:

a) Decantação: por ação da gravidade e diferença de densidades entre os fluidos existentes na mistura:

- b) Separação inercial: os fluidos ao entrarem no separador, se chocam contra defletores, o que provoca uma rápida redução da velocidade e direção, provocando a queda do líquido e a subida do gás;
- c) Força centrífuga: o efeito centrífugo age diferencialmente sobre as fases, fazendo com que a de maior densidade se projete com mais intensidade contra as paredes, tendendo a descer:
- d) Aglutinação das partículas: o contato das gotículas de óleo dispersas sobre uma superfície facilita a coalescência, aglutinação e consequentemente, a decantação dos fluidos mais pesados;

Dentro da etapa de processamento primário do petróleo, alguns reatores chamam atenção pelo número de trabalhos científicos que utilizam os conhecimentos de hidrodinâmica de reatores a fim de contribuir para a melhoria do processo no qual está envolvido. Um deles é o tanque separador trifásico horizontal responsável pela separação inicial da mistura emergente do poço de petróleo e o outro é o hidrociclone, utilizado principalmente no tratamento do fluxo de água contaminada com óleo.

Os separadores gravitacionais trifásicos são equipamentos de grandes dimensões e longo tempo de residência, possuindo vários internos que possibilitem uma boa separação das fases em seu interior. Eles visam efetuar a separação das fases aquosa, oleosa e gasosa, mantendo dentro de limites toleráveis: a quantidade de líquido arrastado no gás; a quantidade de água arrastada no óleo e a quantidade de óleo arrastado na água.

Internamente os separadores são divididos em câmara de separação, onde se localizam as placas paralelas responsáveis pela eficiência de separação entre as fases dispersas de óleo e água, por meio de coalescência das gotas dispersas, e a câmara de óleo que contém a fase oleosa. As câmaras são separadas por uma chicana de altura tal que possibilite um acúmulo de fase aquosa (mais densa) na primeira câmara e a passagem de fase oleosa para a outra, conforme mostra a Figura 3.4 (SILVEIRA, 2006).

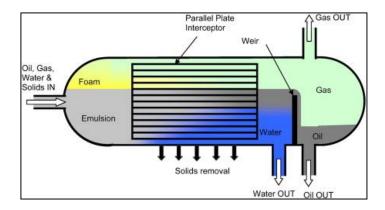


Figura 3.4: Diagrama esquemático de um separador trifásico horizontal.

Fonte: Jaworski e Meng (2009).

Os separadores podem ser bifásicos ou trifásicos, atuando em série ou paralelo. No separador bifásico ocorre a separação gás/liquido, enquanto que no separador trifásico ocorre, a separação água/óleo/gás.

Os vasos separadores são fabricados nas formas verticais e horizontais. Em geral, os separadores horizontais são mais eficientes, pois apresentam uma maior área interfacial que permite uma melhor separação gás/líquido. Esses separadores costumam ser usados em sistemas que apresentam emulsões e altas razões gás/óleo. As desvantagens estão relacionadas ao manuseio dos sólidos produzidos (a geometria dos vasos verticais facilita a remoção) e à menor capacidade de absorver grandes golfadas (variações de fluxo) (THOMAS, 2001).

Um separador típico de produção é constituído de quatro seções distintas, de acordo com a designação do API (*American Petroleum Institute*), como apresentado na Figura 3.5.

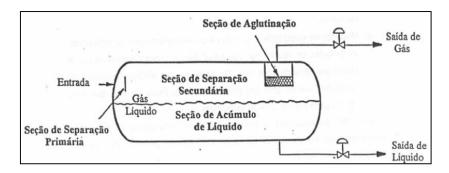


Figura 3.5: Vaso separador e suas quatro seções típicas. Fonte: Thomas (2001).

- a) Seção de separação primária: o fluido choca-se com defletores ou é dirigido por um difusor que lhe impõe um movimento giratório, fazendo com que o líquido se precipite para o fundo do vaso. Nesta seção, a maior parte do líquido é separada, removendo rapidamente as golfadas e as gotículas de maior diâmetro do líquido. Assim, evita-se o retorno do líquido para a fase gasosa.
- b) Seção de acúmulo de líquido: nesta seção ocorre a separação das bolhas gasosas que ficaram no seio do líquido após a separação primária. Para que seja efetiva, o líquido deve permanecer retido durante um determinado tempo (3 4 min.).
- c) Seção de separação secundária: as gotículas menores de líquido carreadas pelo gás após a separação primária são separadas nesta seção. O mecanismo é idêntico ao da seção de acumulação, sendo bastante influenciado pela turbulência do gás.
- d) Seção de aglutinação: as gotículas de líquido arrastadas pela corrente de gás, não separadas nas seções anteriores, são aglutinadas em meios porosos e recuperadas.

Como todo equipamento de processo o separador também apresenta problemas na operação. A seguir são listados os mais comuns (THOMAS, 2001):

- a) Espuma as impurezas presentes no líquido que chega no separador são as principais causadoras de espuma. Quando presente, ela dificulta o controle de nível do líquido dentro do separador, ocupa um volume que poderia estar disponível para a coleta de líquido ou para decantação, e pode ser arrastada pela corrente de gás;
- b) Obstrução de parafinas operações de separação podem ser afetadas por acúmulo de parafina. As placas coalescedoras na seção líquida e os extratores de névoa na seção gasosa são particularmente susceptíveis a estas obstruções;
- c) Areia a areia proveniente do reservatório que eventualmente chega com o líquido no separador causa erosão nas válvulas, obstrução nos elementos internos e acumula-se no fundo do separador, de onde é removida por jatos de água e drenos;

d) Emulsões¹ – a emulsão que se forma na interface óleo/água pode ser particularmente problemática na operação de um separador. Além de causar problemas com o controle de nível, o acúmulo de emulsão diminui o tempo de retenção efetivo, resultando em uma redução na eficiência do processo;

e) Arraste – este é um problema típico operacional. O arraste de óleo pela corrente de gás ocorre quando o nível do líquido está muito alto, quando existe algum dano em algum componente interno, formação de espuma, saída de líquido obstruída, projeto impróprio ou simplesmente porque o vaso está operando com produção superior do projeto.

Ao sair do separador trifásico, a água separada do óleo ainda possui certo resíduo do mesmo, não podendo, pois, ser descartada ou reinjetada sem tratamento. Geralmente na produção *offshore*, este tratamento é realizado em uma bateria de hidrociclones, onde ocorre a recuperação de parte do óleo presente na água. Caso a concentração do óleo na água ainda esteja acima dos níveis permitidos pela legislação ambiental, o que geralmente ocorre, este fluxo de água segue para flotadores a fim de finalizar o tratamento.

O hidrociclone é um dos equipamentos de processo de separação óleo/água mais utilizados na indústria do petróleo atualmente. Ele é composto de trechos cilíndricos e cônicos justapostos que efetua a separação da fase dispersa pela ação do campo centrífugo resultante que, por sua vez, é bem maior que o campo gravitacional.

No início da década de 1980, as operadoras de petróleo utilizavam como solução tecnológica para o tratamento de água, grandes tanques decantadores que ocupavam bastante espaço e o tempo de residência do processo era de aproximadamente meia hora, se tornando uma restrição ao processo de produção. Com a utilização dos hidrociclones, o tratamento da água tornou-se mais eficiente apresentado tempo de residência de cerca de um segundo e meio. Além de ser menor e mais leve (OLIVEIRA, 2013).

¹ Emulsão é uma mistura de dois líquidos imiscíveis, sendo um deles disperso no outro sob a forma de gotículas.

Segundo Marins (2007), as principais vantagens de seu uso são: simplicidade construtiva, baixo custo de investimento e operacional, menor tempo de residência e processo de separação mais eficiente além de menor área requerida. Este ultimo fator, principalmente em planta *offshore*, deve ser destacado visto que o preço por metro quadrado de área de convés para equipamentos é muito elevado. Neste contexto é que se insere, pois, a busca intensa por parte da indústria de petróleo & gás, de equipamentos cada vez mais compactos e com melhor eficiência possível.

O princípio de funcionamento do hidrociclone consiste na entrada tangencial de água oleosa, sob pressão, no trecho de maior diâmetro do hidrociclone, sendo direcionada internamente, em fluxo espiral, em direção ao trecho de menor diâmetro. O fluxo em espiral faz com que a velocidade próxima ao eixo do hidrociclone seja maior que a velocidade próxima a parede. Como a velocidade é inversamente proporcional ao raio, o contínuo decréscimo de diâmetro faz com que este fluxo seja acelerado, gerando uma força centrífuga que empurra o componente mais pesado (água) contra as paredes (NUNES, 2007).

O fluxo axial reverso ocorre na parte central do equipamento devido ao diferencial de pressão existente entre as paredes e o centro do equipamento, que se estabelece em consequência do campo centrífugo, associado à perda de intensidade do vórtice ao longo do escoamento axial. Na Figura 3.6 é apresentada a configuração de um hidrociclone convencional e na Figura 3.7 a distribuição de pressão na direção radial.

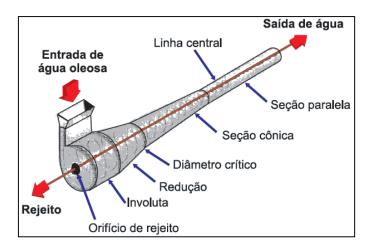


Figura 3.6: Hidrociclone. Fonte: Nunes (2007).

Segundo Marins (2007) na seção transversal próxima à alimentação do hidrociclone, a pressão P1 é maior que P2 devido à aceleração centrífuga (o fluido é empurrado contra a parede pelo efeito do campo centrífugo). O mesmo acontece em relação às pressões P3 e P4 na seção mais afastada da entrada. A baixa pressão produzida na região próxima ao eixo na primeira seção pode ser forte o suficiente para tornar P2 menor que P4, o que resulta num escoamento reverso junto ao eixo.

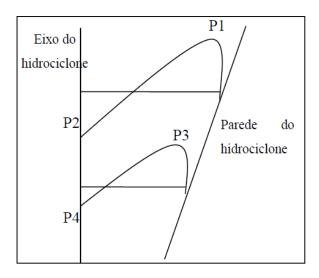


Figura 3.7: Distribuição radial de pressão no interior de um hidrociclone. Fonte: Marins (2007).

3.2.2 Processamento primário de petróleo submarino

A fim de reduzir os custos de produção, minimizar o manuseio superficial dos subprodutos indesejáveis, minimizar o potencial de impacto no meio ambiente, aperfeiçoar a utilização da capacidade de escoamento e processamento primário existentes nas unidades de produção *offshore* e principalmente viabilizar a exploração de campos de petróleo marginais, surge uma nova alternativa ao conceito de processamento primário de petróleo em conveses de plataforma que é o processamento primário de petróleo submarino (MORAES *et al.*, 2011b).

O principal problema na produção de campos marginais que estão distantes de uma plataforma de produção é a elevada perda de carga devido ao escoamento multifásico (gás e líquido). Isto despertou o interesse no estudo de novas tecnologias associadas ao processamento primário submarino já que as tecnologias convencionais de separação gravitacional não podem ser empregadas na produção submarina. Algumas destas tecnologias podem ser mencionadas, como: os

mecanismos de medição multifásicos, bombeamento multifásico e equipamentos de produção mais compactos.

Os sistemas submarinos despontam como um dos principais focos inovativos do setor petróleo & gás, em razão de sua potencialidade em reduzir drasticamente os investimentos em instalações de produção e os custos operacionais a elas associados. Nas duas últimas décadas, grandes foram os investimentos em P&D para o desenvolvimento de equipamentos submarinos para Processamento Primário de Petróleo, os quais possibilitam, para águas rasas, a dispensa parcial ou total de uma plataforma para produção (MENDES et al., 2012).

Além do aspecto econômico, esse tipo de sistema apresenta uma vantagem significativa do ponto de vista ambiental quando comparado aos sistemas em conveses de plataforma. Isto ocorre devido à redução da quantidade de água descartada no mar pela unidade, já que uma parcela desta água será separada no leito submarino e reinjetada no reservatório. Além disto, este sistema de separação poderá ser utilizado em áreas onde as plataformas não apresentem mais viabilidade econômica. contribuindo para 0 aumento da vida útil campo consequentemente, proporcionando um aumento do fator de recuperação.

Um trabalho pioneiro em nível mundial tem sido desenvolvido no Brasil dano início às pesquisas na área de processamento primário de petróleo submarino que é o projeto do Sistema Piloto de Separação Submarina Água - Óleo e Re - injeção d' água do Campo de Marlim (SSAO). Apesar de ser um projeto piloto, existe a grande possibilidade de no futuro ser aplicado em ambientes de águas profundas, fazendo uso de tecnologias nunca antes industrialmente utilizadas. Devido à complexidade do projeto, a falta de tecnologias qualificadas para serem aplicadas e a necessidade de um elevado investimento inicial, um extenso e abrangente programa de qualificação tecnológica foi requerido para subsidiar o projeto do sistema. Este programa envolveu várias atividades, deste o estudo dos principais processos envolvidos, como gerenciamento de sólidos, separação gás-líquido, separação óleo-água, investigação das variáveis relevantes ao processo, até na concepção dos novos equipamentos de separação como os desarenadores, a harpa, o pipe separator e o outlet vessel.

A Figura 3.8 apresenta um fluxograma esquemático do SSAO piloto de Marlim e seus respectivos equipamentos. Segundo Moraes et al. (2012) o fluxo multifásico (gás, água, óleo e impurezas) passa através de um desarenador multifásico de operação contínua, em seguida segue para um separador gravitacional gás - líquido (Harpa), onde parcela do gás no fluxo é reduzida, sendo que o gás removido é enviado diretamente para o vaso de final de linha (outlet vessel). Assim, a corrente constituída de óleo e água entra no separador tubular (pipe separator), onde ocorre a separação entre as duas fases. Ao entrar no vaso de final de linha, as duas fases líquidas estão completamente segregadas.

Neste estágio, o óleo, gás e água residual presentes no *outlet vessel* são misturados e levados até a plataforma, para o processamento. Enquanto que a água separada deixa o vaso final e ingressa no subsistema de tratamento e condicionamento de água para reinjeção onde receberá o tratamento adequado para a sua reinjeção no reservatório. Após, passará por um desarenador para retirada de sólidos remanescentes, e depois por uma bateria de hidrociclones, visando reduzir o teor de óleo residual. Desta forma, com a diminuição do volume de água que chega até a plataforma para tratamento, há a liberação de capacidade de processamento de fluidos no sistema *offshore*.

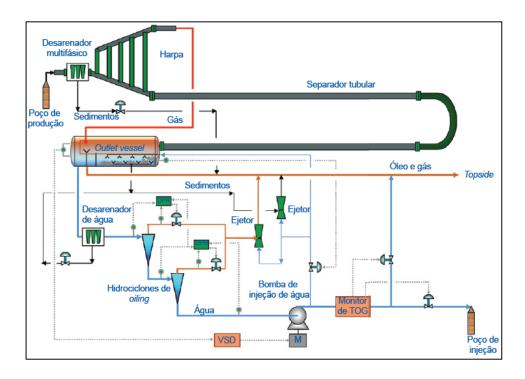


Figura 3.8: Fluxograma esquemático do SSAO piloto de Marlim. Fonte: Moraes et al. (2012).

Moraes *et al.* (2012) destacam que as principais vantagens da utilização do processamento submarino são:

- a) "Desengargala" as plantas de processamento existentes (liberando capacidade de processamento da unidade de produção), levando a uma utilização otimizada da planta;
- b) Contribui para incrementar a produção do campo, pois diminui a contrapressão na cabeça do poço, pelo escoamento de fases separadas e redução da água produzida na linha de produção (no caso de separação e reinjeção da água produzida);
- c) Contribui para um menor impacto ambiental, pela reinjeção dos subprodutos sem valor comercial;
- d) Reduz substancialmente os custos de gerenciamento da água produzida (pela separação e reinjeção de água sem envio às instalações de *topside*²).

3.3 Hidrodinâmica de reatores aplicada ao setor petróleo & gás

O processamento primário do petróleo é uma das etapas críticas da extração de petróleo e gás, pois, separar o petróleo da água produzida, dos sedimentos e sais, tem sido uma tarefa técnica desafiadora para a indústria do petróleo.

Naturalmente, a separação da fase gasosa é relativamente fácil, devido às grandes diferenças de densidade, um dos problemas seria a presença de microgotículas de óleo no fluxo de gás. Igualmente, os sedimentos não apresentam dificuldades de separação, exceto quando o sistema de remoção de sólidos se tornar defeituoso. Assim, a principal dificuldade é uma eficiente separação entre óleo e a água produzida, principalmente quando a razão entre suas densidades se aproximarem da unidade (JAWORSKI e MENG, 2009).

A corrente de água, que é inicialmente separada do óleo nos equipamentos de separação, carrega consigo uma fração de óleo dispersa no meio aquoso. Esta corrente traz certa preocupação para o setor de processamento de fluidos, visto o potencial prejuízo que a mesma pode acarretar ao meio ambiente. Em consequência deste potencial prejuízo, a ação por parte dos órgãos ambientais é intensa no

-

² Processamento primário em conveses de plataforma

sentido de fiscalizar se a água destinada ao descarte ou mesmo ao reuso está de acordo com as normas vigentes.

Visto a necessidade de atendimento aos padrões de lançamento que tendem se tornarem cada vez mais rígidos, o setor petróleo & gás tem investido em pesquisa e desenvolvimento, buscando o aperfeiçoamento do processo de separação dos fluidos produzidos em suas unidades.

Apesar disto, segundo Li *et al.* (2005) a maioria dos métodos de separação água - óleo tem aplicações bastante limitadas, possuem alto custo operacional e de capital, baixa eficiência de separação e processos de separação lenta, ou seja, longo tempo de residência do líquido.

Neste contexto se insere a importância do estudo da hidrodinâmica de reatores no setor de processamento primário de fluidos. A avaliação das características do escoamento como, a análise das curvas de distribuição do tempo de residência dos reatores, do campo de velocidade das fases, da intensidade de turbulência, dos gradientes de velocidade locais permite o diagnóstico de deficiências operacionais, por conseguinte, a proposição de soluções aos problemas.

Sobre a ótica econômica, os conhecimentos sobre dinâmica de fluidos têm sido empregados, por exemplo, na otimização do tamanho dos equipamentos, principalmente em plantas offshore onde o espaço é limitado. Já sobre a ótica ambiental, os conhecimentos sobre hidrodinâmica têm sido aplicados com o objetivo de desenvolver equipamentos que garantam que os lançamentos estarão dentro dos padrões ambientais estabelecidos, ou seja, equipamentos de alta eficiência de separação.

No meio acadêmico são vários os trabalhos científicos que aplicam os conhecimentos sobre dinâmica de fluidos ao setor de processamento primário, visando contribuir para a geração de conhecimento e proposição de novas alternativas / soluções para os problemas oriundos deste setor.

Os tópicos a seguir, trataram de identificar alguns trabalhos científicos na área de hidrodinâmica de reatores aplicados ao processamento primário de fluidos. De modo

mais específico, aos separadores trifásicos e aos hidrociclones que são um dos principais equipamentos presentes nas plantas de processo. Além disto, é abordada a aplicação dos conhecimentos sobre hidrodinâmica no setor de processamento primário submarino de petróleo.

Não obstante, esta análise traz também trabalhos técnicos a fim de verificar, como o setor petróleo & gás vem empregando, em campo, os conhecimentos sobre a hidrodinâmica de reatores de modo a demonstrar o valor que este setor dá a esta área do conhecimento.

3.3.1 Separadores gravitacionais trifásicos

Ao longo do tempo, vários autores utilizaram a técnica de traçadores, a fim de obter a DTR para estudar o comportamento do escoamento no interior de vasos separadores.

Zemel e Bowman (1978) utilizaram a técnica de traçadores radioativos a fim de obter dados de distribuição de tempo de residência em vários separadores gravitacionais primários de água - óleo. Concluíram por meio de seu trabalho que a eficiência hidráulica destes separadores era baixa, com raras exceções. Grande parte dos equipamentos estavam sujeitos a curtos-circuitos de modo que boa parcela de seu volume não estava sendo utilizada de maneira efetiva. Ou seja, os separadores ocupavam um espaço que na prática poderia ser reduzido, economizando espaço.

Simmons *et al.* (2002) fizeram uso da técnica de traçadores colorimétricos a fim de obter dados de DTR em um separador primário horizontal de água-querosene em escala piloto, onde variavam a fração volumétrica de água que entrava no separador e mantinham a vazão total mássica de entrada constante e igual a $4 \text{ kg} \cdot s^{-1}$.

Além de demonstrarem que as medições de DTR são vitais para o entendimento do comportamento do fluido no interior dos separadores e, sobretudo, para a compreensão do desempenho dos mesmos, verificaram que a diferença entre o tempo de residência médio real (TMR_r), obtido a partir de dados de DTR, e o tempo de residência médio estimado (TMR_e), calculado por meio da divisão entre o volume em que cada fase ocupa e sua taxa de escoamento volumétrica, chegava a 60% para o separador estudado.

Este resultado chama atenção para o fato de que estimar o valor do TMR pela razão entre o volume da fase e sua vazão correspondente pode trazer diferenças significativas quando comparado ao TMR_r , uma vez que a altura da interfase óleo-água, utilizada no cálculo do volume útil de ambas as fases, não é constante ao longo do separador, devido a alguns fatores como mistura, turbulência e a presença de uma "rag Layer" entre as duas fases.

Simmons et al. (2004) aplicaram o Alternative Path Model desenvolvido por Simmons et al. (2002) a fim de fornecer uma descrição quantitativa da hidrodinâmica e de mistura dentro de vários separadores.

Este modelo estima a DTR, e os autores verificaram boa concordância entre ele e os dados experimentais. Além disso, algumas das suas variáveis de entrada podem ser usadas para estimar indicadores que fornecem informações úteis a cerca das características hidrodinâmicas no interior do vaso separador. Como por exemplo: o volume de mistura que é o volume ativo de maior turbulência na entrada dos separadores e o número de picos secundários da curva de DTR que é um indicador do grau de zonas mortas e de recirculação.

Como resultado, o modelo mostrou que o desempenho dos separadores analisados é afetado pela configuração interna dos mesmos, observando que a presença de defletores provoca a redução da turbulência do escoamento. Além disso, os autores concluíram que quanto maior a diferença de velocidades entre a fase orgânica e a aquosa, maior era o número de picos secundários. E por fim, ressaltam que separadores com alta relação L/B (comprimento/largura) são mais vantajosos pois o escoamento tem uma maior distância para se estabilizar.

Behin e Aghajari (2008) obtiveram dados de DTR, por meio da técnica de traçador radioativo, em um separador gravitacional de água-óleo, cilíndrico e de fluxo horizontal, em escala piloto, que possuía as seguintes dimensões: 1,2 metros de diâmetro e 5,2 metros de comprimento. Os autores mantiveram a vazão de entrada no separador constante e igual a 5,2 kg/s, e variaram o nível de água no interior do mesmo (0,5 m - 0,9 m). As principais conclusões deste estudo foram que o aumento do nível de água no interior do separador diminuía o TMR da fase orgânica, ao

passo que aumentava o TMR da fase aquosa, ou seja, o aumento do nível de água faz com que o (TMR_e) se aproxime do (TMR_r) na fase orgânica, o oposto ocorre com a fase aquosa. Notaram que a maior eficiência de separação das fases foi obtida para o nível de água de 0,70 metros, onde o padrão de fluxo mais se aproximava do pistão.

Os autores observaram também que o volume "morto" do separador (volume não ativo), praticamente não variou com o aumento do nível de água. A medida que o nível de água aumentava no separador, o volume morto da fase aquosa também aumentava, no entanto, o volume morto da fase orgânica diminuía de maneira proporcional ao da fase aquosa.

Além destas formas mais tradicionais de se avaliar a hidrodinâmica do escoamento, alguns autores têm utilizado ferramentas computacionais, por meio da dinâmica dos fluidos computacional (CFD), para avaliar a influência da configuração interna dos separadores na dinâmica do escoamento.

Wilkinson et al. (2000) investigaram configurações de defletores perfurados para aumentar a eficiência de separação em um separador primário horizontal de águaóleo por meio de modelo físico e numérico (CFD). Segundo os autores, esses dispositivos, melhoram a uniformidade da distribuição de velocidade no interior do separador evitando induzir à dispersão das fases orgânica e aquosa, aproximando o escoamento do fluxo pistão. Frisam ainda que quanto menos regiões de recirculação possuir o escoamento e quanto mais próximo o mesmo estiver do fluxo pistão, melhor separação será obtida.

Ao calcular o desvio padrão das flutuações pontuais de velocidade no tempo em uma determinada seção do separador à jusante do defletor perfurado estudado, os autores verificaram que o tamanho dos orifícios no defletor não exercia influência significativa na uniformização do escoamento frente aquela proporcionada pela área livre do defletor. Também analisaram a influência da distância entre dois defletores perfurados em série no escoamento, e observaram que quão mais próximos estavam, mais uniforme era o escoamento.

Apesar dos benefícios trazidos pelos defletores perfurados na uniformização do escoamento no interior dos separadores e a baixa influência do diâmetro dos orifícios do defletor na mesma, Waldie (1996) alerta que se mal dimensionados, os defletores perfurados podem ocasionar a ruptura de gotas de óleo principalmente devido à turbulência e a outros efeitos gerados pelo aumento da velocidade do fluido nos orifícios do defletor. Ao se romper, as gotas de óleo formam gotas menores dificultando ainda mais sua separação, o que não é desejável.

Outro dispositivo interno muito estudado são as placas paralelas. Segundo Miranda (1977) visto em Jaworski e Meng (2009), elas aumentam a área da superfície horizontal do separador reduzindo a altura na qual as gotículas de óleo devem subir antes de atingirem a superfície de recolhimento, além de tornar o fluxo menos turbulento.

Geralmente, os separadores equipados com as placas paralelas podem ter uma capacidade de processamento três vezes maior do que as unidades convencionais. Além disso, eles podem remover gotículas de óleo livre, com diâmetros menores do que os separadores de óleo/água convencionais (JAWORSKI e MENG, 2009).

Assim, no caso deste equipamento, a hidrodinâmica de reatores tem sido aplicada ao longo dos anos, visando principalmente à redução do tempo de residência e a diminuição de seu tamanho nas plantas de processo e por consequência, a redução de custos e a geração de economia, em termos de peso e espaço.

3.3.2 Hidrociclones

Sabe-se que os hidrociclones são um dos equipamentos mais difundidos na maioria dos ramos das indústrias químicas. Devido a sua elevada capacidade de processamento e de sua compacidade, este equipamento tem sido bastante empregado para efetuar o processo de separação da água e do óleo nas indústrias de processamento de fluidos.

Isto posto, diversos pesquisadores têm se dedicado ao estudo, experimental e numérico, de hidrociclones visando assegurar uma melhor eficiência de processo de separação por meio de modificações em sua própria configuração, como: na forma

do duto de entrada, no diâmetro do corpo do cilíndrico, no tipo de alimentação (tangencial ou axial), na inclinação da seção cônica, entre outras.

Algumas destas pesquisas visam a caracterização hidrodinâmica do escoamento em hidrociclones por meio de modelos CFD. As simulações numéricas de processos reais têm sido importantes em soluções de vários problemas enfrentados pelo setor petróleo & gás, sendo capazes de reproduzirem computacionalmente vários fenômenos, inclusive deficiências operacionais. Contudo, segundo Marins (2007), apesar desses modelos terem evoluído bastante, ainda não são totalmente confiáveis, a menos que sejam devidamente calibrados e validados. Por outro lado, técnicas não intrusivas para caracterização hidrodinâmica de hidrociclones como LDV e a PIV também vêm crescendo bastante.

As diversas pesquisas envolvendo os hidrocilones estão associadas ao complexo escoamento do fluido em seu interior. Este escoamento é caracterizado por zonas de reversão de fluxo, zonas de recirculação, alta preservação de vórtices e alta intensidade turbilhonar devido, principalmente, ao alto nível de turbulência do escoamento.

Marins (2007) desenvolveu um trabalho no qual seu objetivo principal era mostrar a viabilidade técnica do uso do LDV e PIV em hidrociclones. Para isso construiu um modelo de hidrocilone que seria utilizado para separar uma corrente oleosa com alto teor de óleo. Por meio destas técnicas o autor avaliou as componentes axial e azimultal da velocidade média, podendo desta forma calcular a vazão em cada seção do hidrociclone estudado. Além disto, observou que, ao contrário do que outros autores afirmavam, o valor da componente radial da velocidade deve diminuir à medida que o escoamento caminha na direção do eixo do hidrocilone. A técnica *LDV* mostrou-se uma boa ferramenta para investigação de grandesas turbulentas, já a *PIV* mostrou-se uma boa ferramenta de investigação, com respostas rápidas, para sistemas com variadas condições operacionais.

A Petrobras por meio do Cenpes³ realizou experimentos laboratoriais em modelos físicos de hidrociclones, para medição de campo de velocidades e de grandezas

-

³ Centro de pesquisa da Petrobras.

turbulentas, utilizando as técnicas de *PIV* e *LDA*. A finalidade destas medições era de subsidiar a simulação numérica (CFD) auxiliando na seleção de modelos fluidodinâmicos (particularmente os de turbulência) e nas condições de contorno a serem consideradas e implementadas nas simulações. Uma vez definidos o melhor modelo de simulação e as condições de contorno, foram assumidas diversas concepções geométricas de hidrociclone. Desta forma, selecionavam-se as concepções que se mostravam mais promissoras do ponto de vista de eficiência de separação (MORAES *et al.*, 2009).

Como pode ser visto, a Petrobras, por meio do Cenpes, tem investido na Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) sendo uma das maiores utilizadoras de *softwares* de CFD no mundo, para fazer a avaliação da hidrodinâmica dos escoamentos que ocorrem em suas unidades de processo, a fim de saber o quê, como e onde os fenômenos acontecem dentro de seus equipamentos industriais. E também têm investido na obtenção de dados experimentais, por meio de técnicas avançadas de caracterização de escoamento a fim de validar os modelos numéricos para que os mesmos possam ser utilizados com certa confiança.

Moraes et al. (2011a) apresentou um estudo tridimensional de dinâmica de fluidos para escoamento gás - líquido em um ciclone à montante de um vaso separador. Foi observado que a separação das fases no interior do dispositivo não ocorreu devido ao efeito centrífugo pois não foi estabelecido um escoamento rotacional interno, provavelmente devido a um projeto ineficaz do bocal de entrada. Assim, o comportamento hidrodinâmico do escoamento não permitia uma boa separação das fases, fazendo com que pequenas gotas de óleo fossem levadas junto com o fluxo de gás.

O aperfeiçoamento da tecnologia dos hidrociclones ao longo dos anos muito se deve a uma estratégia adotada pela Petrobras que por sua vez, deu muito certo. Esta estratégia foi a parceria firmada com instituições de pesquisas.

Em sua dissertação, Oliveira (2013) destaca algumas parcerias de sucesso entre a empresa e as instituições de ensino/pesquisa para o desenvolvimento da tecnologia do hidrociclone. Uma delas foi a parceria firmada com a Universidade de São Paulo (USP) na década de 80, que tinha por objetivo introduzir melhorias no equipamento

e torná-lo mais eficiente no processo de separação entre água e óleo. As pesquisas realizadas estavam baseadas no estudo da hidrodinâmica do escoamento no interior de hidrociclones convencionais, onde foram introduzidas modificações na geometria do hidrociclone e no sistema de alimentação do mesmo, o que gerou algumas vantagens no escoamento do fluido aumentando, por conseguinte, a eficiência do processo de separação. Desta forma, selecionaram-se as geometrias mais promissoras a fim de depositar as respectivas patentes. Já em meados do ano 2000, foi firmada uma parceria entre a empresa e a Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RJ), a fim de obter melhorias em hidrociclones destinados ao tratamento de água com altos teores de óleo visto que a instituição possuía conhecimento na utilização da técnica PIV para estudar a hidrodinâmica do escoamento nestes reatores.

Além destas parcerias e outras, destaca-se a parceria firmada com o Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia (Coppe), cuja linha de pesquisa se insere no contexto de diminuição do tamanho das plataformas de produção e redução de custo, por meio do desenvolvimento de equipamentos mais compactos. Os separadores desenvolvidos, frutos da parceria, funcionam por efeito ciclônico. A mistura de petróleo, gás, água e sedimentos que sai do reservatório entra em uma tubulação girando como um ciclone e os materiais vão se separando dentro da própria tubulação. Os mais pesados – os sedimentos – passam a correr junto às paredes do tubo, enquanto os mais leves tendem a correr mais próximos do centro. Ou seja, a areia fica nas bordas, em seguida o óleo, a água e, finalmente, bem no centro, o gás natural. Também foi concebida uma válvula ciclônica que, ao contrário das válvulas convencionais utilizadas nos separadores, impede que ocorra a emulsão. Facilitando, pois, o processo de separação de fases (COPPE, 2009).

O investimento em pesquisa visando à melhoria na dinâmica do escoamento no interior dos hidrociclones está associado a dois fatores principais: um do ponto de vista econômico que está atrelado ao desenvolvimento de equipamentos mais compactos, com equilíbrio entre eficiência e capacidade de tratamento, e o outro do ponto de vista ambiental associado aos padrões ambientais de lançamento que tendem se tornarem mais rigorosos, estimulando o desenvolvimento de

equipamentos que deem margem de segurança a fim de evitar possíveis impactos ao meio ambiente.

3.3.3 Processamento primário de petróleo submarino

O processamento primário de petróleo submarino é uma nova alternativa ao conceito de processamento primário de petróleo em conveses de plataforma e carrega consigo a grande possibilidade de no futuro ser aplicado em ambientes de águas profundas, fazendo uso de tecnologias nunca antes industrialmente utilizadas.

Os investimentos em pesquisa nesta área são devidos às grandes vantagens que o processamento primário submarino poderá proporcionar, sobre o âmbito econômico já que tem potencial em reduzir os investimentos em instalações de produção e os custos operacionais a elas associados e sobre o âmbito ambiental, já que é um sistema de produção que reduz a quantidade de água produzida que será descartada ao mar.

O projeto do Sistema Piloto de Separação Submarina Água - Óleo e Re - injeção d' água do Campo de Marlim (SSAO), empregou grande esforço na área de hidrodinâmica de reatores a fim de diagnosticar problemas operacionais nos equipamentos que compõem o sistema, evolvendo vários testes experimentais somados a estudos realizados via CFD (MORAES *et al.*, 2012).

Um dos equipamentos estudados foi o separador gravitacional tubular de óleo - água (pipe separator). Devido a sua configuração e ao longo comprimento, um dos potenciais problemas operacionais seria o depósito de areia dentro do mesmo. Neste sentido, o Cenpes optou por realizar simulações computacionais do escoamento dos sedimentos dentro do pipe separator para verificar o possível acúmulo desses sedimentos em seu interior. Como resultado, as análises computacionais demonstraram que os sedimentos se mantêm em movimento dentro do separador até o vaso de final de linha, não havendo sinais de acúmulo no interior do mesmo. Também foram realizados experimentos para confirmar os resultados das simulações, permitindo inclusive a determinação da velocidade mínima do fluxo a fim de arrastar os sedimentos do separador até o vaso de final de linha. A Figura 3.9 apresenta em destaque o separador gravitacional tubular utilizado nos testes.



Figura 3.9: Loop de testes para avaliação da movimentação de areia no separador tubular.

Fonte: Moraes *et al* (2011c).

No entanto, apesar de não haver acúmulo de sedimentos dentro do separador, os testes realizados pelo Cenpes indicaram um acúmulo de sedimentos na conexão do separador com o vaso de final de linha. Este fato, segundo Moraes et al (2011c), é preocupante visto que poderia acarretar na remistura entre as camadas de água e óleo ora separadas, diminuindo, por conseguinte, a eficiência de separação. Destarte, foi realizado um estudo via CFD com o objetivo de avaliar a hidrodinâmica no interior do dispositivo. As simulações numéricas apontaram a existência de recirculações na região da entrada da corrente de mistura no vaso de final de linha. De acordo com Moraes et al (2011c), isto explicaria o acúmulo de areia na seção de entrada do vaso.

Além disso, uma vez que parte do fluido fica contida no vaso por um tempo maior, devido as recirculações, outra parte é forçada da entrada em curto - circuito até as descargas, diminuindo a eficiência do equipamento. A Figura 3.10 apresenta as linhas de corrente dos fluidos (óleo e água) no interior do vaso de final de linha, diagnosticando as zonas de recirculação.

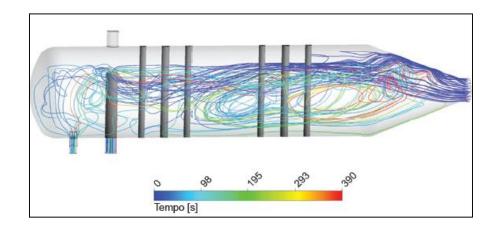


Figura 3.10: Linhas de corrente dos fluidos, coloridas por tempo de residência.

Fonte: Moraes *et al* (2011c).

3.4 Caracterização do setor de tratamento de água de abastecimento

3.4.1 Aspectos gerais do tratamento de água

O setor de tratamento de água de abastecimento no Brasil é dominado pelo setor público, onde as companhias estaduais de saneamento são responsáveis por 70% do tratamento de água no país e os municípios responsáveis por 20%, logo, o setor privado corresponde a 10% deste setor. Desta forma, o setor de tratamento depende em grande parte de recursos públicos, visto que as iniciativas do governo federal, estaduais e municipais são responsáveis por quase 70% do volume de investimentos deste mercado (TAE, 2011).

As atividades deste setor envolvem a captação de água na natureza, a adequação de sua qualidade ao padrão potável e transporte até os consumidores.

Quanto à adequabilidade ao padrão vigente, a água bruta, presente nos rios, lagos e lençóis subterrâneos, contêm uma série de impurezas, como sais dissolvidos, partículas em suspensão além de microrganismos. Devido a isso, grande parte dos corpos hídricos não pode ser utilizada sem tratamento prévio, quando destinados ao abastecimento público, a fim de que se tornem compatíveis com as exigências do consumidor e principalmente, com as exigências da saúde pública. Destarte, a água a ser fornecida a uma população deve atender a um padrão de potabilidade – estabelecido atualmente pela Portaria nº 2914 do Ministério da Saúde. Logo, o maior

interesse do setor de tratamento de água, para fins de abastecimento público, é garantir que esta portaria seja atendida.

A Portaria nº 2914 de 2011 revoga a Portaria nº 518 de 2004 alterando e tornando mais rigorosos os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo e seu padrão de potabilidade. Parâmetros como a turbidez ficaram mais restritivos, além de inclusão de novos parâmetros de monitoramento como as saxitoxinas (BRASIL, 2011). Para as empresas fornecedoras de tecnologias para tratamento de água esta é uma boa notícia visto que as companhias deveram ter que aperfeiçoar seu processo de tratamento a fim de atender a legislação vigente.

De forma geral, o objetivo do tratamento de água é condicionar as características da água bruta, a fim de atender a qualidade necessária a um determinado uso. Ele pode ser parcial ou completo, de acordo com analise prévia de suas características físicas, químicas e biológicas.

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), do ponto de vista tecnológico, água de qualquer qualidade pode ser, teoricamente, transformada em água potável, porém os custos envolvidos e a confiabilidade na operação e manutenção podem inviabilizar totalmente o uso de determinado curso d'água como fonte de abastecimento.

Segundo Achon *et al.* (2013), existem cerca de 7500 estações de tratamento de água (ETA) projetadas no país, onde grande parte delas é convencional, com ciclo completo. Nas estações de ciclo completo, a água bruta passa por diversos processos, onde os principais são: coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção.

Estes processos exigem, individualmente, tecnologia diferenciada, pois deve haver uma condição hidrodinâmica característica a fim alcançar o objetivo proposto para cada um deles. Assim, a eficiência de processo das variadas unidades que compõem o sistema de tratamento de água está associada ao comportamento do fluido no interior das respectivas unidades.

Porém, diferente de outros setores industriais, como o de petróleo & gás, a eficiência de processo no setor de tratamento de água de abastecimento, está muito mais ligada à preocupação em atender aos padrões de potabilidade vigentes, de modo mais amplo à saúde, do que a possíveis ganhos econômicos que a mesma poderá trazer. Além do aspecto associado à saúde, o setor de tratamento de água de abastecimento tem enfrentado, atualmente, questões associadas a impactos ambientais provocados em decorrência de suas atividades.

O sistema de tratamento de água convencional, difundido em todas as regiões brasileiras, gera resíduos complexos em suas estruturas, que são de difícil manejo e disposição. Muitos desses são gerados nos decantadores (lodos) e filtros (água de lavagem).

De acordo com Achon et al. (2005), o impacto ambiental devido aos lançamentos in natura de lodos oriundos de ETAs está vinculado à alta concentração de metais, como alumínio e ferro, que quando dispostos em corpos hídricos, especialmente aqueles com baixa velocidade, podem afetar a vida aquática. Além da presença de matéria orgânica, que favorece a depleção do oxigênio dissolvido, podendo implicar em mortandade dos peixes.

A Figura 3.11 apresenta consequências potenciais devido ao lançamento inadequado de lodos provenientes do processo de tratamento de água.

A maioria das ETAs brasileiras lança seus resíduos em cursos d'água, contrariando a legislação vigente e provocando impactos ao meio ambiente (ACHON et al., 2013). Tomando como base de comparação o setor petróleo & gás, nota-se que neste setor existe uma grande preocupação em atender a legislação ambiental no que se refere ao lançamento de efluentes ricos em óleo no mar, visto o potencial impacto ao meio ambiente, e também devido aos prejuízos que esta ocorrência pode trazer de negativo à imagem da empresa. O impacto ambiental "mancha" a imagem da empresa frente aos clientes e à sociedade em geral, acarretando prejuízos imensuráveis a mesma, sobretudo econômicos.

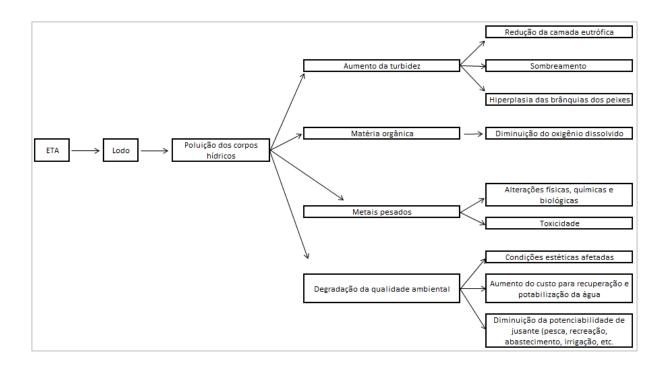


Figura 3.11: Danos potenciais ao meio ambiente devido ao descarte *in natura* de lodo de ETAs. Fonte: adaptado de Achon *et al.* (2005).

3.4.2 Principais etapas do tratamento de água

A seguir são apresentadas as principais etapas que compõem o sistema de tratamento de água convencional.

Coagulação

De acordo com Vianna (2002), a coagulação ou desestabilização inicia-se no instante em que as substâncias coagulantes são adicionadas à água, e dura poucos segundos. Neste processo o coagulante reage com a água formando subprodutos de carga nula e positiva. Os de carga positiva são adsorvidos pela superfície das partículas sólidas (carga negativa), de forma a neutralizá-las, caracterizando a desestabilização por adsorção. Enquanto que os de carga nula, que se apresentam sob o aspecto de pequeno floco gelatinoso precipitável, saturaram a água e arrastam as partículas aprisionadas neste gel, caracterizando a desestabilização por varredura.

Dentre os principais compostos coagulantes/floculantes, destaca-se o sulfato de alumínio, por ser o mais utilizado, devido às vantagens como facilidade de transporte e manuseio e baixo custo.

Devido à rapidez com que se processam as reações de desestabilização das partículas sólidas, o processo de coagulação ocorre em unidades de mistura rápida, para que haja grande transmissão de energia à massa líquida em um curto intervalo de tempo. Desta forma, estas unidades são caracterizadas pelos altos gradientes de velocidade e pelo curto tempo de detenção das partículas. Uma unidade amplamente empregada nesta etapa é a Calha Parshall.

Floculação

A floculação é a etapa do tratamento da água onde partículas coloidais, desestabilizadas por agentes coagulantes no processo de coagulação, se aglutinam formando flocos. Uma vez formados os flocos, estes são removidos, por sedimentação ou flotação. A floculação, portanto, depende da coagulação e é uma das etapas mais importantes do processo de tratamento da água, pois sua eficiência tem implicação direta sobre os processos subsequentes, e consequentemente, na qualidade final da água tratada (SILVA, 2007).

De um modo geral, os reatores responsáveis pela floculação podem ser divididos em dois grandes grupos: os floculadores mecanizados e os floculadores hidráulicos. Estes reatores são caracterizados por serem de mistura lenta a fim de aumentar a taxa de agregação de partículas presentes na água e diminuir ao máximo possível a taxa de ruptura dos flocos ora formados.

Os floculadores hidráulicos constituem os tipos mais largamente utilizados, principalmente nos casos de pequenas e médias estações de tratamento de água, visto que os mecanizados apresentam alto consumo energético. Os floculadores hidráulicos, de modo a obter agitação necessária ao processo de floculação, fazem com que a corrente líquida percorra caminhos com sucessivas mudanças de direção promovidas pela presença de dispositivos internos como: chicanas horizontais, chicanas verticais, pelo posicionamento alternado de orifícios nas paredes do floculador, entre outros. A Figura 3.12 ilustra um floculador hidráulico com chicanas horizontais.

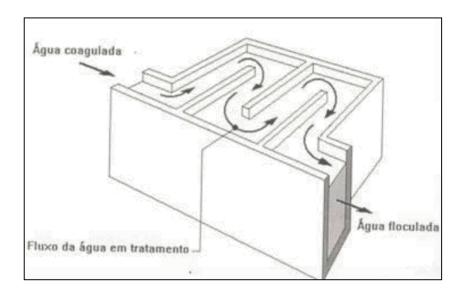


Figura 3.12: Floculador hidráulico do tipo chicanas horizontais. Fonte: Vianna (2002).

O padrão de escoamento no interior de um floculador deve garantir, inicialmente, energia necessária à massa líquida para que haja uma maior probabilidade de choques entre as partículas acarretando em maior formação de flocos e posteriormente, garantir que os flocos ora formados não se rompam.

Decantação

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), decantação é o processo no qual em decorrência da ação da gravidade, as partículas suspensas apresentam movimento descendente em meio líquido de menor massa específica, propiciando a clarificação do meio líquido, ou seja, a separação de fases. A decantação é realizada em reatores denominados de decantadores. Os decantadores geralmente utilizados nas ETAs são o convencional ou o de alta taxa. O segundo se difere do primeiro devido, principalmente, à presença de uma câmara de dutos ou placas planas paralelas com certa inclinação. Estes dispositivos tem a finalidade de tornar mariores a área de sedimentação e a taxa de escomaneto superficial, propiciando a eficência de retirada do lodo e a diminuição da área necessária para sua a contrução da unidade.

O processo de sedimentação também está diretamente relacionado com os padrões de escoamento dentro das unidades. Quanto menor a intensidade de curtos-circuitos e mistura, mais o padrão de escoamento se aproxima do ideal para este tipo de unidade, que é o fluxo pistão (ALMEIDA *et al.*, 1997).

Devido à sedimentação dos flocos, há formação, no interior dos decantadores, de bolsas de lodo. Este resíduo tem trazido problemas às estações de tratamento de água, visto sua dificuldade em gerenciá-lo de forma adequada.

Filtração

A filtração consiste na remoção de partículas suspensas e coloidais e de microrganismos presentes na água que escoa através de um meio poroso. Em geral, a filtração é o processo final de remoção de impurezas realizado em uma estação de tratamento de água e, portanto, principal responsável pela produção de água com qualidade condizente com o padrão de potabilidade (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

A filtração pode ser projetada com filtros rápidos, lentos e pré - filtros. Sendo que o primeiro é o mais utilizado no Brasil, devido às altas taxas de escoamento propiciadas, descendentes ou ascendentes.

Assim como o lodo gerado nos decantadores, a água de lavagem dos filtros é rica em resíduos de processo, e a exemplo do primeiro, também tem se tornado um problema para as estações de tratamento de água, no que tange a sua disposição final.

Desinfecção

A desinfecção da água é a operação necessária para eliminar microorganismos patogênicos não removidos ou inativados nas etapas de coagulação, floculação, decantação e filtração. A desinfecção da água pode ser feita pela adição de produtos químicos, por processos físicos e por radiação. A forma mais comum de desinfecção é por cloração, embora a aplicação de outros métodos como ultravioleta e ozonização esteja crescendo no setor de tratamento de água e efluentes.

Assim como nos outros processos ora descritos, a desinfecção da água é dependente do padrão de escoamento no interior da unidade de tratamento. A baixa eficiência hidráulica da unidade pode prejudicar o processo de desinfecção de maneira que não dê tempo para a água ser desinfetada de forma efetiva ou, pelo contrário, o desinfetante pode permanecer dentro da unidade por mais tempo e

gerar os subprodutos da desinfecção, que são compostos potencialmente cancerígenos (PACHECO et al., 2003).

A Figura 3.13 apresenta um esquema simplificado do processo de tratamento de água convencional.

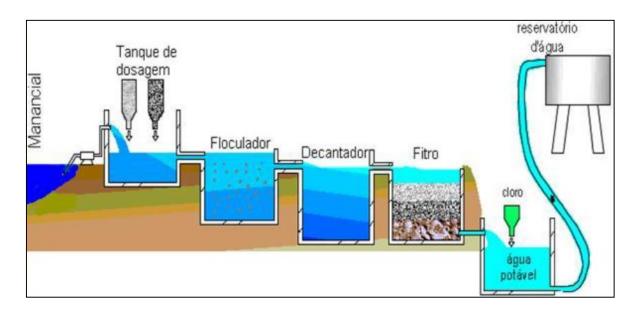


Figura 3.13: Tratamento convencional da água, para fins de potabilização. Fonte: Pelissari (2006).

Além dessas tecnologias mais convencionais utilizadas no tratamento de água e efluentes existem tecnologias mais refinadas como, por exemplo, os processos de separação por membrana. O processo de separação por membranas tem se destacado pelo significativo avanço nas pesquisas sobre o seu desempenho. No entanto, segundo Mierzwa *et al.* (2008) sua aplicação no tratamento de água para consumo humano é muito limitada. Uma das alegações para que esta tecnologia não seja utilizada neste setor é o seu elevado custo, sem que no entanto, isto seja devidamente comprovado.

Mierzwa et al. (2008) apresentaram uma avaliação comparativa preliminar entre os sistemas de água para abastecimento público por ultrafiltração, convencional e convencional com carvão ativado, baseada em um levantamento de custos com fornecedores, companhia de abastecimento e literatura. Demonstraram que o menor custo de produção está associado ao sistema convencional (próximo de R\$ 0,20/m³). Contudo, segundo os autores, considerando-se a produção de água com o mesmo grau de qualidade, onde é necessário implantar sistemas complementares ao

sistema convencional, o sistema de ultrafiltração se mostra bastante competitivo quando da utilização de um sistema de carvão ativado em complementação ao sistema convencional, com um custo de tratamento próximo de R\$ 0,40/m³.

3.5 Hidrodinâmica de reatores aplicada ao setor de tratamento de água de abastecimento

Sabe-se que o desempenho de muitas unidades de tratamento de água e de efluentes tem sido bem inferior ao previsto na fase de projeto, considerando-se conjuntamente os seguintes aspectos: custos operacionais, níveis de tratamento alcançados e geração de subprodutos indesejáveis. Dentre as principais razões disso estão os altos graus de desvio observados entre as características dos escoamentos reais e ideal para uma unidade (TEIXEIRA *et al.*, 2000).

Frequentemente é observado que grande parte do mau funcionamento de estações de tratamento de água está ligada a problemas hidráulicos nas unidades, relacionados principalmente à divisão desigual de vazão entre diferentes módulos de tratamento; curtos circuitos hidráulicos; zonas mortas e características inadequadas do meio filtrante (DI BERNARDO *et al.*, 2011). Aliado a isto, o fato de que a legislação de potabilidade (Portaria nº 2914 do Ministério da Saúde) tenderá ser cada vez mais rigorosa, exigindo que as estações melhorem seu desempenho de processo.

Isto posto, diversos trabalhos têm sido desenvolvidos no meio acadêmico a fim de contribuir para o aperfeiçoamento do processo de tratamento de água e de efluentes, por meio da avaliação da hidrodinâmica do escoamento no interior das unidades de processo. Muitos desses trabalhos foram desenvolvidos no Laboratório de Gestão de Recursos Hídricos e Desenvolvimento Regional da Universidade Federal do Espírito Santo (LabGest) o qual atua principalmente nas áreas de floculação, sedimentação e desinfecção, tentando contribuir para melhorias nos processos de tratamento de água e efluentes aplicando a estes os conhecimentos sobre hidrodinâmica de reatores. Neste contexto, serão citados a seguir alguns dos trabalhos desenvolvidos no LabGest (ALMEIDA et al., 1997; TEIXEIRA et al., 1997; FIGUEIREDO, 2000; FURLANI, 2005; SOUZA, 2005) dentre outros, a fim de revisar

o que se tem de disponível em termos de aparato técnico - científico, aplicável ao tratamento de água sobre a ótica da hidrodinâmica de reatores.

3.5.1 Unidade de sedimentação e floculação

Almeida et al. (1997) estudaram os efeitos da inserção de defletores de escoamento e da relação comprimento/largura sobre o comportamento hidrodinâmico de unidades de sedimentação. Os estudos foram conduzidos em uma unidade experimental trapezoidal. Foram testadas três alturas distintas de defletores que ocupavam toda a largura da seção transversal da unidade, possibilitando o escoamento somente por baixo dos mesmos. Já o aumento da relação comprimento/largura da configuração de referência foi feito através de duas chicanas longitudinais. Para avaliação do comportamento hidrodinâmico da unidade, foram avaliados parâmetros indicativos de curto - circuito e mistura, obtidos por meio de técnica de traçadores. Os autores concluíram que a posição de instalação de defletores bem como sua altura é de fundamental importância para a redução da intensidade de curto - circuito auxiliando também na redução da intensidade de mistura no interior da unidade de sedimentação. Verificaram também que o aumento da relação comprimento/largura é muito efetivo na redução da mistura.

Quanto ao processo de floculação, Souza (2005) estudou o comportamento hidráulico e hidrodinâmico de unidades de floculação hidráulicas chicanadas de escoamento horizontal. No estudo foram avaliadas duas unidades de floculação com três câmaras, diferenciadas apenas pela inclinação de fundo, uma horizontal e a outra inclinada. Segundo a autora, a falta de critérios racionais para a adoção da inclinação de fundo em floculadores de chicanas com escoamento horizontal pode prejudicar a eficiência da floculação. No entanto a NBR 12216/92⁴ recomenda inclinação de fundo apenas para auxiliar na limpeza da unidade, quando na prática, verifica-se a construção deste tipo de floculador sem inclinação de fundo. Os resultados obtidos por Sousa (2005) mostraram que a inclinação de fundo na unidade tem grande influência no comportamento hidráulico do escoamento: os valores de velocidade média e do gradiente médio de velocidade aumentam de montante para jusante nas câmaras de floculação que não possuem inclinação de

⁴ A NBR 12216/92 fornece recomendações acerca do projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público.

fundo, enquanto que o tempo teórico de detenção diminui na mesma direção, fato que pode comprometer a eficiência requerida para a floculação. Tendo em vista a difusão de unidades de floculação que são projetadas sem inclinação de fundo, os resultados encontrados pela autora alertam os profissionais da área de tratamento de água sobre a importância da adoção de inclinação de fundo no floculador.

Segundo Sousa (2005) as unidades de floculação hidráulicas de chicanas são bastante utilizadas em países em desenvolvimento como o Brasil. No entanto, alguns autores (CAMP, 1953; HARHOFF et al., 2001) têm mostrado que unidades deste tipo não seriam as mais indicadas ao processo de floculação. Segundo Camp (1953) tanques chicanados promovem uma maior perda de carga nas mudanças de direção do escoamento, devido à presença das chicanas, acarretando em altos valores de gradientes de velocidade locais e consequentemente em maior probabilidade de ruptura dos flocos ora formados. Além disto, os valores de gradiente de velocidade não são significativos ao longo da câmara. Este fato foi comprovado por Haarhoff e Van der Walt (2001) que utilizaram um modelo numérico calibrado a fim de estudar a hidrodinâmica do escoamento em um floculador hidráulico chicanado de fluxo horizontal. Os autores apresentaram cálculos de gradiente de velocidade, demonstrando que há predominância de gradientes mais acentuados após as mudanças de direção do escoamento provocadas pelas chicanas e baixos gradientes ao longo da câmara da unidade.

Neste contexto, o LabGest em sua linha de pesquisa "Aspectos hidrodinâmicos de processos de tratamento de água e efluentes" vem empreendendo esforços, por meio de modelagem física (PELISSARI, 2006; SILVA, 2007; OLIVEIRA, 2008) e numérica (SARTORI, 2006), para o entendimento hidrodinâmico de uma unidade de floculação que vem se mostrando promissora, devido principalmente ao fato, de que não promove um aumento local no gradiente de velocidade, como as unidades convencionais. Trata-se do floculador tubular helicoidal. Em consequência disto, observa-se que ele apresenta alta eficiência de remoção de turbidez, perfil próximo ao do escoamento pistão, com baixa ocorrência de curtos circuitos e de zonas mortas, além de requerer pequeno espaço para sua instalação. Apesar das vantagens mencionadas, este tipo de reator aparentemente não despertou o

interesse do setor de tratamento de água de abastecimento. A Figura 3.14 ilustra um esquema de um reator tubular helicoidal aplicado à floculação.

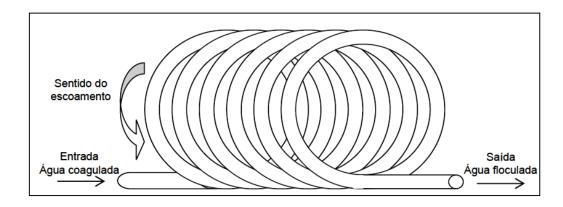


Figura 3.14: Floculador tubular helicoidal. Fonte: Silva (2007).

Sartori (2006) utilizou modelagem numérica computacional (CFD) a fim de compreender a dinâmica do escoamento no interior de floculadores tubulares helicoidais. Em seu estudo foram avaliadas três configurações distintas onde o autor estudou a influência da curvatura, do diâmetro do tubo e da vazão no padrão de escoamento dentro destas unidades. A avaliação dos resultados demonstrou que há certa constância nos valores do gradiente médio de velocidade, o que segundo o autor promoverá uma floculação também mais constante.

Silva (2007) avaliou os efeitos de parâmetros geométricos e hidrodinâmicos de floculadores tubulares helicoidais sobre o seu desempenho de processo, utilizando como ferramenta a modelagem física. A análise dos resultados demonstrou que as melhores eficiências de remoção de turbidez foram obtidas para os menores níveis de energia, concordando com os resultados obtidos por Pelissari (2006) que, por sua vez, estudou diversas configurações deste tipo de unidade de floculação a fim de verificar a eficiência de processo nas mesmas.

Oliveira (2008) avaliou a influência do comprimento deste tipo de reator na eficiência de remoção de turbidez, por meio de modelagem física. Foi verificado, em todas as configurações estudas pela autora, que a eficiência de remoção de turbidez aumentava até um valor máximo e depois decrescia com o aumento do comprimento dos floculadores, indicando que deve existir um comprimento ótimo para o processo de floculação.

3.5.2 Unidade de contato

No que tange ao processo de desinfecção, alguns estudos avaliaram o comportamento hidrodinâmico do escoamento no interior de unidades de contato com a finalidade diagnosticar deficiências operacionais e apontar soluções.

Teixeira et al (1997) realizaram um diagnóstico sobre a eficiência hidráulica de uma unidade de contato de fluxo contínuo, utilizada na desinfecção de água para abastecimento. Os autores adotaram a técnica de traçadores como metodologia de avaliação das características hidrodinâmicas da unidade. A unidade de experimentação foi um modelo reduzido de um dos tanques de contato utilizados na desinfecção de água com cloro da ETA do município de Linhares/ES, tendo-se um fator de escala linear entre o modelo e o protótipo de 1:8. Como resultado do diagnóstico, foram verificadas altas intensidades de curtos-circuitos, indicando o baixo desempenho hidráulico da unidade estudada. Como medida para a sua redução, foi avaliada a adoção de defletores no escoamento. O emprego dos mesmos foi muito eficaz na redução de intensidades de curto - circuitos.

Figueiredo (2000) utilizou do estudo de curvas de passagem de traçador para avaliar a influência da hidrodinâmica em uma unidade de contato para tratamento de água e a interferência de microorganismos no consumo de cloro. Dos resultados obtidos, destaca-se a constatação de que a hidrodinâmica do escoamento interfere no consumo de cloro e que, quanto maior a eficiência hidráulica da unidade, maior é a economia nos custos de operação. Independente do tipo de microorganismo a ser inativado.

Furlani (2005) estudou duas unidades de contato: uma sem chicanas e outra com este dispositivo. Em cada uma das unidades, avaliou-se a influência da hidrodinâmica do escoamento no decaimento de cloro e na oxidação de matéria orgânica em diversos pontos dispostos no interior das respetivas unidades. A autora atrelou o método de visualização do escoamento com a análise da curva de passagem de traçador a fim de facilitar a interpretação dos resultados encontrados. Como conclusão, observou que tanto o decaimento do cloro quanto a oxidação da matéria orgânica ocorreram de forma distinta nos diferentes pontos de monitoramento de ambas unidades. Este fato é devido às características

hidrodinâmicas diferenciadas em cada ponto. Na unidade com a presença das chicanas, foi verificado que o tempo de detenção se aproximou do ideal, aumentando a eficiência de processo. Tempos de residência menores que o ideal tendem a diminuir a eficiência de processo, enquanto que tempos de contato excessivo entre o cloro e matéria orgânica, tendem a facilitar a formação de subprodutos da cloração, os quais são prejudiciais a saúde.

Outros trabalhos na literatura fazem uso do estudo da hidrodinâmica de reatores a fim de diagnosticar deficiências operacionais em unidade de tratamento de água.

Bastos et al. (2000) realizou um trabalho no qual avaliou o desempenho de duas ETAs no estado de Minas Gerais, ambas de ciclo completo: mistura rápida (Calha Parshall, floculação hidráulica, decantação, filtração rápida descendente e desinfecção com cloro. Por meio de ensaios de laboratório obtiveram os parâmetros ótimos para o funcionamento das unidades. E com análise do projeto das estações e medições em campo, foram levantados os parâmetros reais de funcionamento. Dentre os parâmetros analisados encontram-se concentração e dosagem do coagulante, pH, gradientes de velocidade, tempo de detenção e taxa de aplicação superficial dos decantadores. Como resultado da análise, os autores observaram grandes disparidades entre os parâmetros reais, de projeto, e os teóricos, dos diversos processos unitários, indicando o baixo desempenho hidráulico das estações estudadas. Problemas como zonas mortas, curto - circuitos e má distribuição de fluxo entre os decantadores foram verificados.

4 METODOLOGIA

Visando melhorar a apresentação do texto e facilitar o entendimento, a metodologia empregada para se alcançar o objetivo geral deste trabalho encontra-se subdivida por objetivo específico, expondo os meios utilizados para a consecução de cada um deles.

4.1 Verificação do nível de aplicação, em campo, de conhecimentos sobre hidrodinâmica de reatores pelos dois setores estudo de caso.

Para o desenvolvimento deste objetivo foi inicialmente realizado um levantamento do aparato técnico - científico disponível no que se refere à área da hidrodinâmica de reatores para cada um dos setores estudo de caso. Assim, buscou-se por meio de revisão de literatura, as contribuições da comunidade científica ao aperfeiçoamento dos principais processos envolvidos em cada setor.

Feito este levantamento, foi verificado, por meio de artigos técnicos, se os setores estudados aplicam e como aplicam em campo as melhorias propostas pela comunidade científica. Com esta verificação, avaliou-se, por meio de análise comparativa, o grau de valorização que os referidos setores reservam à área da hidrodinâmica de reatores.

Para avaliar o grau de valorização, foram analisados de forma qualitativa alguns aspectos, como:

- a) O papel da hidrodinâmica de reatores nos setores estudos de caso;
- Forma como os conhecimentos sobre hidrodinâmica são aplicados no setor: buscou-se levantar as principais técnicas de análise da hidrodinâmica em unidades de processo dos setores estudos de caso, avaliando o nível de detalhamento e sofisticação das mesmas;
- c) Investimento no desenvolvimento de novas tecnologias: foi analisado o grau de importância que os setores estudos de caso dão ao desenvolvimento de

novas tecnologias e as estratégias que os mesmos têm adotado para atingir este objetivo.

4.2 Avaliação das razões de um setor valorizar mais a área da hidrodinâmica de reatores do que o outro

Neste tópico, buscou-se avaliar as razões pelas quais os setores considerados neste trabalho dão maior ou menor valor à área da hidrodinâmica de reatores quando comparados um ao outro.

Assim, investigou-se, com base em revisão bibliográfica, as principais razões pelas quais o setor de tratamento de água de abastecimento e petróleo & gás utilizam esta área do conhecimento, associando-as com as características particulares de cada um deles.

Para isso, foi levantada na literatura as principais características dos setores estudos de caso, onde foram abordadas questões como: produtos produzidos, principais processos envolvidos, principais tecnologias aplicadas, potenciais impactos ao meio ambiente, aspectos econômicos e de mercado, situação atual do setor, entre outras.

De posse destas informações e das obtidas no tópico 4.1, identificaram-se os fatores que levam os setores a valorizar mais a área da hidrodinâmica de reatores. Após, comparam-se os fatores identificados no setor petróleo & gás com aqueles encontrados no setor de tratamento de água de abastecimento e discutiu-se a influência dos mesmos na adoção do aparato técnico — científico da área da hidrodinâmica de reatores pelos respectivos setores.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No tópico 5.1, baseando-se na revisão da literatura, realizou-se a verificação quanto ao emprego, por parte dos setores considerados neste trabalho, dos respectivos aparatos técnico-científicos disponíveis. A partir daí, avaliou-se o grau de valorização da área da hidrodinâmica de reatores por parte destes setores.

No tópico 5.2, avaliaram-se as razões pelas quais os setores considerados valorizam mais, ou menos, a área da hidrodinâmica de reatores.

5.1 Verificação do nível de aplicação, em campo, de conhecimentos sobre hidrodinâmica de reatores pelos dois setores estudo de caso

5.1.1 O setor petróleo & gás

Como visto no subtópico 3.3.1 da revisão de literatura, existem diversos trabalhos que analisam a dinâmica do escoamento no interior de separadores gravitacionais trifásicos. Todos estes trabalhos estão associados principalmente a dois fatores: o primeiro se deve à importância dos mesmos no processamento primário de fluidos, já que são os principais responsáveis pela separação inicial da mistura emergente dos poços e o segundo, por ser um dos equipamentos de maior porte e peso presentes na plataforma de produção.

Assim, nota-se que é de interesse do setor que estes equipamentos possuam o melhor desempenho possível na separação primária, pois facilitará o tratamento dos fluxos afluentes, e também que sejam otimizados em relação ao porte e peso, visto que um dos principais problemas das operações *offshore* é a restrição de espaço. E é neste contexto que se insere o papel da hidrodinâmica de reatores.

Alguns trabalhos da literatura (MIRANDA, 1977 apud JAWORSKI E MENG, 2009; WALDIE, 1996 e WILKINSON *et al.*, 2000), apontam soluções para a melhoria do desempenho de separadores gravitacionais, por meio de modelagem física ou numérica. Dentre elas destaca-se a proposição de aplicação de dispositivos internos ao vaso separador, como defletores, difusores, placas paralelas coalescedoras, dispositivos de controle de nível entre outras orientações.

O setor petróleo & gás não só emprega este aparato técnico-científico disponível pelo meio acadêmico na área da hidrodinâmica de reatores, como desenvolve através de centros de pesquisa e parcerias, suas próprias tecnologias.

Um exemplo clássico da importância da hidrodinâmica de reatores no setor petróleo & gás está na adoção de uma nova tecnologia para o tratamento do fluxo de água contaminada com óleo destinado ao descarte ao mar. Na década de 1980, a maioria das operadoras de petróleo utilizavam como solução tecnológica para este tratamento, grandes tanques decantadores que ocupavam bastante espaço na plataforma, além do grande tempo de residência requerido, algo em torno de trinta minutos, tornando-se uma restrição ao processo de produção. Estes problemas foram resolvidos pelo emprego dos hidrociclones que ao contrário da tecnologia anterior tornaram o processo de tratamento de água contaminada com óleo mais eficiente, além de possuírem tempo de residência na ordem de segundos, serem mais leves e necessitarem de pequena área de convés (OLIVEIRA, 2013).

Este ultimo fator, segundo Marins (2007), principalmente em planta offshore, deve ser destacado visto que o preço por metro quadrado de área de convés para equipamentos é muito elevado.

O desenvolvimento da tecnologia dos hidrociclones, seu aperfeiçoamento e aplicação ao longo dos anos muito se devem a uma estratégia adotada pelas indústrias de petróleo, particularmente pela Petrobras, que por sua vez deu muito certo. Esta estratégia foi a parceria firmada com instituições de pesquisas. Devido ao complexo escoamento no interior destes equipamentos, caracterizados por zonas de reversão, zonas de recirculação, alta intensidade de turbulência e gradientes de velocidade, as pesquisas realizadas nestas instituições, como a USP e a PUC-RJ, basearam-se no estudo da hidrodinâmica do escoamento no interior de hidrociclones tradicionais a fim melhorar o processo de separação das fases aquosa e orgânica. Como resultado, foram introduzidas modificações na geometria e no sistema de alimentação do mesmo, o que gerou algumas vantagens no escoamento do fluido aumentando, por conseguinte, a eficiência do processo de separação. Desta forma, selecionaram-se as geometrias mais promissoras a fim de depositar as respectivas patentes.

Não obstante, a própria Petrobras por meio de seu centro de pesquisa, o Cenpes, tem investido pesado na área de hidrodinâmica de reatores, empregando técnicas sofisticadas, a base de *laser*, para avaliar a dinâmica do escoamento em suas unidades de processo. Visto o capital envolvido nas atividades do setor, uma pequena melhoria de desempenho de uma determinada unidade de processo pode acarretar lucro no futuro.

Este investimento no emprego de técnicas sofisticadas é subsídio para outra forma de avaliação da hidrodinâmica que, por sua vez, é muito utilizada pela Petrobras. Trata-se da modelagem numérica computacional da dinâmica de fluidos. Moraes *et al.* (2009) apresenta um exemplo de como funciona esta estratégia para o caso de hidrociclones destinados ao tratamento de água contaminada com óleo. Segundo o autor, o Cenpes realiza experimentos laboratoriais em modelos físicos, para medição de campo de velocidades e de grandezas turbulentas, utilizando as técnicas de *PIV* e *LDA*. Nesta etapa são obtidas informações detalhadas do comportamento do fluido no interior da unidade. Com esses dados experimentais em mãos, os modelos numéricos são calibrados e validados. Posteriormente, com o auxílio da modelagem CFD são assumidas diversas concepções geométricas do equipamento estudado. A partir daí, seleciona-se as concepções que se mostram mais promissoras do ponto de vista de eficiência de separação.

Desta forma, a escolha de uma geometria adequada para um determinado tratamento, não depende somente de um bom projeto de engenharia básica, sendo necessário realizar uma bateria de testes com vistas a verificar eventuais melhorias no projeto básico que poderão aumentar a eficiência do processo de separação. Assim, na fase de desenvolvimento, além da etapa de engenharia de projeto existe a etapa de testes que envolvem as seguintes atividades: estudo da fluidodinâmica do escoamento, simulação numérica, seleção de geometrias, construção de protótipos e realização de testes de campo (OLIVEIRA, 2013).

A área da hidrodinâmica também é destaque quando o assunto é processamento primário de petróleo submarino, visto que esta forma de produção tem surgido como possível alternativa ao processamento de petróleo em conveses de plataforma, demandando o uso de tecnologias nunca antes industrialmente utilizadas, já que as

tecnologias tradicionais de separação gravitacional não são aplicáveis neste processo.

Como visto no subtópico 3.3.3, os sistemas submarinos despontam como um dos principais focos inovativos do setor petróleo & gás, em razão de sua potencialidade em reduzir drasticamente os investimentos em instalações de produção e os custos operacionais a elas associados. Nas duas últimas décadas, grandes foram os investimentos em P&D para o desenvolvimento de equipamentos submarinos para processamento primário de petróleo, os quais possibilitam, para águas rasas, a dispensa parcial ou total de uma plataforma para produção.

Neste contexto é que o Cenpes desenvolveu um programa de qualificação tecnológica aplicado ao campo de Marlim, em que as principais atividades estavam voltadas à caracterização de equipamentos por meio de análise física e numérica, onde os conhecimentos sobre hidrodinâmica subsidiavam o desenvolvimento de inovações tecnológicas.

Observa-se que o desenvolvimento de uma tecnologia própria além do aspecto relativo à melhoria de desempenho de processo, redução de custos, possui o aspecto referente à detenção de tecnologia, que atualmente é um fator importante para atingir a liderança de mercado.

De forma geral, nota-se que o setor faz altos investimentos em pesquisa e desenvolvimento visando o aperfeiçoamento do processo de produção e o desenvolvimento de novas tecnologias.

Parte do alto investimento em pesquisa e desenvolvimento verificado no setor se deve à atuação da Agência Nacional do Petróleo (ANP). De acordo com o inciso X da Lei nº 9478/97 que dispõe sobre a política energética nacional e dá outras providências, cabe a ANP "estimular a pesquisa e adoção de novas tecnologias na exploração, produção, transporte, refino e processamento".

Uma das ações realizadas pela ANP a fim de estimular a pesquisa e desenvolvimento no setor foi a adoção da cláusula de investimentos em pesquisa e desenvolvimento que passou a ser incorporada nos contratos da ANP com

operadores concessionários por meio da Resolução ANP nº 33/05. Esta cláusula determina que os investimentos em pesquisa e desenvolvimento são obrigatórios para os concessionários e correspondem ao percentual de, no mínimo 1% (um por cento) da receita bruta proveniente dos campos para os quais a participação especial é devida. Deste valor, 50% (cinquenta por cento) podem ser utilizados em sua estrutura de pesquisa e desenvolvimento e a outra parte em projetos e programas de instituições de pesquisa e ensino credenciadas junto a ANP.

Estima-se que para os próximos anos a Petrobras deva aplicar cerca de US\$ 112,5 bilhões no desenvolvimento da produção, o que também inclui pesquisa e desenvolvimento de equipamentos para o setor (PETROBRAS, 2014).

5.1.2 O setor de tratamento de água de abastecimento

Como pode ser observado no tópico 3.5 da revisão de literatura, diversos trabalhos (TEIXEIRA et al., 1997; BASTOS et al., 2000; TEIXEIRA et al., 2000; DI BERNARDO et al., 2011) têm apontado que o desempenho de muitas unidades de tratamento de água e de efluentes tem sido bem inferior ao previsto na fase de projeto, considerando-se conjuntamente os seguintes aspectos: custos operacionais, níveis de tratamento alcançados e geração de sub-produtos indesejáveis. Isto pode ser explicado devido aos problemas hidráulicos presentes nas unidades de processo, relacionados principalmente à divisão desigual de vazão entre diferentes módulos de tratamento; curtos circuitos hidráulicos; zonas mortas e características inadequadas do meio filtrante.

Todavia, estes problemas poderiam ser minimizados/solucionados se o setor investisse de forma adequada no estudo da dinâmica de fluidos em suas unidades de processo. Neste contexto, se o setor de tratamento de água de abastecimento fosse um setor industrial inserido em um mercado de alta concorrência certamente o não investimento em soluções para os problemas hidráulicos e de processo que assolam grande parte das estações de tratamento de água no país, seria um fator limitante de crescimento do setor.

Nota-se que existem muitas pesquisas desenvolvidas na área da hidrodinâmica de reatores aplicáveis ao tratamento de água cujo objetivo é contribuir para a melhoria

do desempenho de processos. Grande parte dos trabalhos científicos, por meio de diagnóstico de desempenho hidráulico e de processo, sugerem recomendações com vistas à minimização/solução de problemas nas unidades que compõem o sistema de tratamento. Dentre elas destaca-se a instalação de dispositivos internos como placas defletoras e chicanas, que por sua vez, são eficientes principalmente na redução de curtos-circuitos e mistura.

Como já citado, Furlani (2005) observou que em unidades de contato com a presença de chicanas no escoamento, o tempo de detenção se aproximou do ideal, aumentando a eficiência de processo quando comparada a mesma unidade sem o dispositivo. Ou seja, a avaliação da hidrodinâmica do escoamento permitiu inicialmente o diagnóstico de deficiências operacionais e após, permitiu a minimização do problema com a inserção de um dispositivo no escoamento. Apesar da inegável importância da hidrodinâmica para o setor de desinfecção, alguns estudos apontam que a maioria das unidades de contato não fazem uso otimizado de desinfetante, empregando dosagens superiores às necessárias para atender um determinado nível de desinfecção, acarretando na elevação do custo de operação e ainda aumentando a probabilidade de formação de subprodutos, que por sua vez, podem ser prejudiciais à saúde humana (TRUSSELL e CHAO, 1977; HART e GUPTA, 1978 apud FIGUEIREDO, 2000; FURLANI, 2005).

Além disso, existem trabalhos que propõem o emprego de novas tecnologias aos processos de tratamento de água. Um exemplo citado neste trabalho, foi o floculador tubular helicoidal, uma unidade de floculação que vem se mostrando promissora devido principalmente a sua alta eficiência de processo (SILVA, 2007 e OLIVEIRA, 2008).

No Brasil a maior parte dos floculadores utilizados no processo de tratamento de água e efluentes é hidráulico do tipo chicanado, e como apresentado na revisão de literatura os mesmos não são os mais indicados para efetuar o processo de floculação, visto que as bruscas mudanças de direção promovidas pelas chicanas podem acarretar a ruptura dos flocos ora formados (CAMP, 1953 e HARHOFF *et al.*, 2001). Neste contexto, se insere a tecnologia do floculador tubular helicoidal que possui vantagens de aplicação frente ao convencional, entre as quais destacam-se:

a alta eficiência de remoção de turbidez, perfil próximo ao do escoamento pistão, com baixa ocorrência de curtos circuitos e de zonas mortas, além de requerer pequeno espaço para sua instalação (SARTORI, 2006; PELISSARI, 2006; SILVA, 2007; OLIVEIRA, 2008).

Este é um exemplo de que existem novas tecnologias disponíveis, aguardando para serem testadas em escala piloto e real. Cita-se também que existem diversas tecnologias emergindo no mercado de tratamento de água e efluentes como: novos processos de desinfecção, processos de separação por membrana entre outras atividades inovadoras. Neste sentido, questiona-se até onde o setor de tratamento de água de abastecimento absorve as contribuições dadas pela área de hidrodinâmica de reatores e as tecnologias inovadoras que possuem potencial de aplicação.

Como apresentado anteriormente, grande parte das estações de tratamento de água possuem problemas hidráulicos que afetam o desempenho global de processo. Fazendo-se uma comparação com o setor petróleo & gás, de modo mais específico ao setor de processamento primário de petróleo, nota-se a disparidade que existe entre estes setores quando da aplicação dos conhecimentos sobre hidrodinâmica de reatores em seus processos e o valor dado pelo setor a esta área.

No setor de processamento primário de petróleo, as deficiências operacionais são estudadas detalhadamente, por meio de técnicas avançadas de análise do escoamento, a base de *laser* que, além disto, fornecem dados experimentais para as simulações numéricas computacionais, onde os reatores não são tratados como "caixa preta", e variáveis como gradientes de velocidade, intensidade de turbulência e dissipação de energia são todas levadas em consideração na análise. No setor de tratamento de água de abastecimento, não se observa este tipo de detalhe no que se refere ao estudo da dinâmica de fluidos em suas unidades de processo e quando feito, normalmente estilo "caixa preta". E também, aparentemente, não há grande preocupação em aumentar o desempenho hidráulico e de processo das unidades se comparado ao setor petróleo & gás.

Outro aspecto relevante é o baixo investimento em pesquisa e desenvolvimento no setor de tratamento de águas de abastecimento cuja consequência é a utilização de

tecnologias ultrapassadas e menos eficientes do ponto de vista operacional (ABES, 2013). Assim, observa-se que a pesquisa, o desenvolvimento e a inovação ainda não estão consolidados como estratégia empresarial das companhias de tratamento de água de abastecimento, o que justifica a baixa competitividade do setor.

Neste quesito, o setor petróleo & gás está bem à frente, haja vista que possui parcerias consolidadas com instituições de pesquisa, além de desenvolver programas de qualificação tecnológica, investindo na concepção de novos equipamentos o que resulta, geralmente, em inovações tecnológicas e aumento da competitividade. As parcerias firmadas com universidades, centros ou institutos de pesquisa, podem desonerar as companhias de saneamento de investimento em instalações, equipamentos e recursos humanos para a realização de atividades essenciais, além de contribuírem para a solução de problemas operacionais e para o desenvolvimento de novas tecnologias nos processos de tratamento de água que, por sua vez, podem contribuir para o aumento de sua competitividade. Além disso, como visto no tópico 5.1.1, no setor petróleo e gás é obrigatório o investimento em pesquisa e desenvolvimento, diferente do que ocorre no setor de tratamento de água de abastecimento. Neste sentido, é importante que haja maior incentivo por parte do Estado para que as companhias de saneamento adotem cada vez mais esta estratégia: investir mais em pesquisa e desenvolvimento e em parcerias com instituições de ensino e pesquisa.

Desta forma, observa-se que o setor petróleo & gás, relativamente valoriza mais a área da hidrodinâmica de reatores quando comparado ao setor de tratamento de água de abastecimento. Não que esta área seja mais importante para um ou outro, mais porque existem razões distintas dos setores considerados valorizarem mais ou menos a área de dinâmica de fluidos. Estes fatores serão explicitados no tópico 5.2.

5.2 Avaliação das razões de um setor valorizar mais a área da hidrodinâmica de reatores do que o outro

Observa-se que no setor petrolífero é grande o volume de capital requerido para investimentos e o nível de capacitação tecnológico necessário ao longo de toda cadeia de produção, englobando atividades de amplitude mundial, multiprodutos,

além de ser um setor altamente competitivo. Esta competitividade está associada ao controle de reservas de petróleo, ao controle de seus mercados e da tecnologia que é aplicada em toda a cadeia do processo produtivo. A busca por maior competitividade faz o setor realizar grandes investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação.

No cenário atual o Brasil vem se mostrando com alto potencial para exploração e produção de petróleo, ganhando cada vez mais destaque no cenário mundial. Isto se deve em grande parte aos investimentos aplicados em pesquisa e desenvolvimento que propiciaram capacitações em recursos humanos e acumulação de conhecimento técnico, o que permitiu que ao longo do tempo houvesse o desenvolvimento de inovações em equipamentos e processos para produção do petróleo (MORAIS, 2013).

O investimento em ciência e tecnologia na área da hidrodinâmica de reatores também entra neste contexto, pois tem papel importante no setor de processamento primário de fluidos. Como neste setor é colossal o capital envolvido, tudo indica que qualquer ganho em termos de desempenho de processo poderá resultar em redução de custos e geração de lucro no futuro. Isso tornará a empresa mais forte no mercado por diversas razões, entre elas: aperfeiçoamento dos equipamentos de processo, reduzindo seu tamanho e peso; aumento da eficiência de separação de fluidos, acrescendo a fração de óleo recuperada e reduzindo os riscos de impacto no meio ambiente devido ao descarte da água contaminada com óleo; aumento de capacidade de processamento ou no desenvolvimento de novas tecnologias.

A redução de custos no processo de produção do petróleo principalmente offshore está vinculada à redução da dimensão e peso de equipamentos nas plantas de processo (MARINS, 2007; JAWORSKI E MENG, 2009; MORAES et al., 2011b; OLIVEIRA, 2013). Deste modo, é intensa a busca, por parte deste setor, de equipamentos mais compactos, leves e com o melhor desempenho possível. Além da questão econômica propriamente dita, de redução de custos e aumento de lucratividade, também há interesse na questão ambiental envolvida em todo o processo de produção de petróleo, principalmente no que se refere ao descarte da

água contaminada com óleo. Sobre estas duas óticas o papel da hidrodinâmica de reatores no setor de processamento primário de fluidos se destaca.

O valor dado pelo setor à área da hidrodinâmica de reatores tem propiciado a ele consequências positivas, dentre elas o surgimento de tecnologias inovadoras que visam atender seus anseios econômicos e ambientais.

O surgimento de novas tecnologias como a do hidrociclone que se tornou fundamental na etapa de tratamento de água contaminada com óleo, trouxe várias vantagens frente aos imensos decantadores que eram utilizados até a década de 80, onde o processo de separação entre água e óleo requeria longo tempo de residência. Dentre estas vantagens, destacam-se, do ponto de vista econômico, o baixo custo de investimento e operacional, a menor área exigida devido a sua compacidade, além do menor tempo de residência requerido. Além disso, por ser uma tecnologia aplicada ao processo de tratamento de água contaminada com óleo, há interesse do setor de que esta tecnologia tenha maior eficiência de separação possível, entre as razões, principalmente, para que no final de todo o processo de tratamento, o efluente de água contaminada com óleo esteja sempre dentro dos padrões de lançamento estabelecidos pelo órgão ambiental, visto os prejuízos ambientais que o mesmo pode acarretar. Prejuízos estes que se ocorridos, poderiam também trazer impactos negativos à imagem da empresa petroleira perante os seus clientes e a sociedade.

Além da tecnologia do hidrociclone também foi citado neste trabalho, o projeto do Sistema Piloto de Separação Submarina Água - Óleo e Re - injeção d' água do Campo de Marlim (SSAO), onde houve grande esforço na área de dinâmica de fluidos para o desenvolvimento de tecnologias aplicáveis ao processamento submarino.

Este esforço está associado, do ponto de vista econômico, ao elevado potencial deste sistema em reduzir os investimentos em instalações de produção e custos operacionais, e do ponto de vista ambiental, à redução da quantidade de água descartada ao mar devido à reinjeção de parcela da água produzida, o que contribui para um menor impacto ambiental além de reduzir os custos de gerenciamento da água produzida nas plataformas (MORAES *et al.*, 2012).

Assim, nota-se que as principais razões pelas quais o setor investe em pesquisa e desenvolvimento na área da hidrodinâmica de reatores, incidem principalmente sobre o aspecto econômico, mas também sobre o ambiental.

Do ponto de vista ambiental, investe-se nesta área do conhecimento a fim de garantir o melhor desempenho do processo visando minimizar os subprodutos oriundos do mesmo e os consequentes impactos ao meio ambiente.

Do ponto de vista econômico, visando redução de custos, consolidação no mercado, aumento na lucratividade e também detenção de tecnologia. Destaca-se que o controle da tecnologia é muito importante no que concerne à competitividade da indústria petrolífera, dado que as líderes mundiais também são as líderes em tecnologia.

Já no setor de tratamento de água de abastecimento, o aspecto econômico não é tão destacado como no setor petróleo & gás. Diferente deste setor, aquele não possui grande competitividade e seu produto não possui elevado valor em escala global.

Assim, no setor de tratamento de água para fins de abastecimento público, o fator mais relevante está associado à qualidade da água que deve ser fornecida aos clientes. De modo mais amplo, à saúde. Ou seja, o objetivo maior do setor é fornecer água dentro do padrão de potabilidade vigente, estabelecido atualmente pela Portaria nº 2914 do Ministério da Saúde.

Neste sentido, devido ao dinamismo no que se refere às modificações na legislação de potabilidade vigente, o setor pode estar atualmente atendendo todos os padrões de potabilidade, mas no futuro, pode não atender.

Como a legislação de potabilidade vigente no país tende se tornar cada vez mais exigente / restritiva é evidente que os processos de tratamento deverão ser aperfeiçoados a fim de que os padrões sejam atendidos. Logo, neste caso, o setor de tratamento de água de abastecimento deveria dar um tratamento diferenciado à área da hidrodinâmica de reatores, valorizando-a mais.

Porém, se o processo de tratamento atual empregado pelo setor está atendendo à legislação de potabilidade vigente, independente se há baixo desempenho hidráulico ou de processo nas unidades componentes do sistema, aparentemente não há grande interesse ou incentivo por parte do setor em fazer investimentos na área da hidrodinâmica para aperfeiçoá-lo ou mesmo em investir no desenvolvimento de novas tecnologias. Além disso, o ganho em termos de aumento da qualidade da água produzida nas estações, devido a investimentos no aperfeiçoamento do processo de tratamento de água, possivelmente não representará consideráveis ganhos econômicos para o setor, ao contrário do setor de processamento primário de fluidos, no qual, por exemplo, quanto menor o teor de água que vai com o óleo para as refinarias, menor será o custo com o transporte do óleo já que está transportando somente um bem que possui valor econômico, menor serão os gastos para manutenção de tubulações devido às incrustações e corrosões resultantes das características da água de produção, e mais facilmente ocorrerá o processo de refino.

No setor de tratamento de água de abastecimento, a integração de algumas politicas públicas pode influenciar na adoção do aparato técnico – científico da hidrodinâmica de reatores. O grau de integração da Política Nacional de Saneamento Básico (Lei nº11.445/2007) com outras políticas públicas que influenciam diretamente no setor de tratamento de água de abastecimento, como a Política Nacional de Meio Ambiente (Lei nº6938/81) e a Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº9433/97), de certa forma está associado à necessidade de aperfeiçoamento dos processos de tratamento de água, por consequência, à aplicação dos conhecimentos sobre hidrodinâmica de reatores.

Tanto a Política Nacional de Meio Ambiente como a de Recursos Hídricos referemse à proteção e preservação dos recursos naturais, contra os efeitos de poluição, logo, podem influenciar, indiretamente, na qualidade da água bruta que chega para tratamento. Se essas Políticas estão em sintonia umas com as outras e são eficazes em seus objetivos, a tendência é de que a qualidade da água que chega para as ETAs seja melhor do que se o oposto ocorresse. Assim, com águas de melhor qualidade, tecnologias simplificadas poderiam ser utilizadas. Caso contrário, seria necessário tecnologias cada vez mais avançadas, demandado neste caso, maior esforço na área da hidrodinâmica de reatores para concepção de novas tecnologias ou aperfeiçoamento das já existentes.

Outra questão que auxilia no entendimento do porque não há uma grande valorização da área da hidrodinâmica pelo setor de tratamento de água de abastecimento está associada a uma característica do próprio setor. No Brasil, este setor é dominado pelo setor público, 70% por companhias estaduais e 20% por companhias municipais, apenas 10% é privado (TAE, 2011). Grande parte das companhias estaduais apresentam problemas de gestão e tem dificuldade em captar os recursos necessários para o aperfeiçoamento global do sistema de tratamento de água. Já companhias municipais sofrem com o déficit de capacitação e capacidade técnica para buscar ou realizar projetos consistentes e bem elaborados. Segundo LCA (2011), observa-se que neste setor os investimentos para melhoria em infraestrutura demoram a ser concretizados, entre as razões destacam-se: ausência de projetos, morosidade no planejamento, falta de pessoal capacitado, modelo de gestão de empresa atrasado, entre outros.

Assim, se o setor fosse mais bem estruturado, gerenciado e possuísse maior capacidade técnica, seria grande a possibilidade de haver maior investimento no aperfeiçoamento de processos, em pesquisa e desenvolvimento, e também na área da hidrodinâmica.

A falta de conhecimento e preparo gerencial e técnico contribuem para a má elaboração dos projetos de unidades de tratamento de água e pelo pouco investimento no aperfeiçoamento de unidades já existentes, o que resulta no baixo desempenho global de processo de muitas unidades de tratamento.

Segundo Teixeira (1993), os projetos de unidades de contato levam em consideração basicamente o volume e o tempo teórico de detenção, o tipo de escoamento é considerado como ideal, e não é considerado o surgimento de zonas mortas e curtos-circuitos no escoamento. Mas Furlani (2005) ressalta que os escoamentos reais são muito mais complexos que os ideais e devido a uma má elaboração do projeto, o nível de desinfecção desejado não é alcançado. Devido a isto, se faz necessário uma elevação da concentração de desinfetante a fim de atingir a eficiência de desinfecção desejada, aumentando os custos com o

desinfetante e a probabilidade de geração de subprodutos, que por sua vez, são prejudiciais à saúde.

Este é um exemplo claro de que a má elaboração de projetos no setor de tratamento de água de abastecimento pode comprometer o desempenho global do sistema.

Além disso, diferente do setor petróleo & gás cujas atividades possuem alcance mundial, as atividades do setor de tratamento de água de abastecimento tem alcance local. Além disso, a competitividade não é grande característica deste setor quando comparado à do setor petróleo & gás.

Como visto, o setor petróleo & gás apresenta maior competitividade quando comparado ao setor de tratamento de água de abastecimento, o que demanda que o mesmo esteja sempre em busca do "ponto ótimo", investindo no desenvolvimento e aperfeiçoamento de tecnologias a fim de se manter firme no mercado, quiçá atingir a liderança do mercado. Segundo Madeira (2010), além da baixa competitividade o setor de tratamento de água de abastecimento apresenta pequena concorrência de mercado. De acordo com o autor, a pequena concorrência de mercado é justificada, pois para a existência de duas empresas de tratamento seria necessitário uma duplicação de redes de abastecimento público, o que do ponto de vista econômico e espacial não seria eficaz.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Serão apresentadas, inicialmente, as conclusões resultantes do desenvolvimento deste estudo. Em seguida, serão apresentadas algumas recomendações para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

6.1 Conclusões

 Observou-se que o setor petróleo & gás valoriza mais à área da hidrodinâmica de reatores quando comparado ao setor de tratamento de água de abastecimento, visto que aplica o que se tem de mais atual / avançado em termos científico e tecnológico na área da hidrodinâmica de reatores.

- Os principais fatores que contribuem para o maior valor dado à área de dinâmica de fluidos por parte do setor petróleo & gás são: o econômico associado principalmente à redução de tamanho e peso de equipamentos; o ambiental - no que concerne ao aperfeiçoamento de processos de separação de água e óleo para descartar a água produzida dentro dos padrões ambientais vigentes.
- Já no setor de tratamento de água de abastecimento a maior influência em se investir nesta área do conhecimento está associada, principalmente, à qualidade da água que deverá ser fornecida aos clientes, que, indiretamente e especialmente, se refere a aspectos de saúde pública:
 - Observou-se que quanto maior a rigidez da legislação que dispõe sobre os padrões de potabilidade de água, maior será a tendência do setor em investir no aperfeiçoamento de seus processos, e consequentemente maior será o valor dado à área da hidrodinâmica de reatores;
 - Além disso, notou-se que o grau de integração entre a Política Nacional de Saneamento Básico e as Políticas ambientais pode influenciar no nível de adoção do aparato – técnico científico da hidrodinâmica de reatores no setor de tratamento de água de abastecimento.
- O pouco valor dado à área da hidrodinâmica de reatores pelo setor de tratamento de água de abastecimento quando comparado ao setor petróleo & gás se deve, entre outros: às características específicas do setor como, produção de um bem que não possui elevado valor comercial; baixa competitividade; mercado de baixa concorrência; deficiência na gestão de obras e serviços e déficit de capacitação e capacidade técnica para buscar ou realizar projetos consistentes e bem elaborados.

Verificou-se que algumas medidas poderão contribuir para uma maior valorização do emprego da hidrodinâmica de reatores no setor de tratamento de água de abastecimento. Entre elas: maior incentivo para que as companhias de saneamento firmem mais parcerias com instituições de ensino e pesquisa; mais investimento no fortalecimento da capacidade técnica disponível; integração da Política de Saneamento Básico com outras políticas ambientais; e promoção de políticas que favoreçam o aumento da competitividade no setor.

6.2 Recomendações para trabalhos futuros

Deste trabalho resultam as seguintes recomendações para trabalhos futuros:

- Avaliar o nível de percepção dos setores considerados quanto à relação disponibilidade do aparato técnico – científico versus seu emprego pelo setor;
- Estender o estudo desenvolvido a outros setores, a fim de avaliar quais outros fatores podem influenciar na adoção do aparato técnico – científico da hidrodinâmica de reatores.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABES. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. **Entraves ao investimento em Saneamento**, 2013. Disponível em: < http://www.abes-sp.org.br/arquivos/entraves.pdf>. Acesso: 29/11/2014;

ACHON, C. L.; SOARES, L. V.; MEGDA, C. R. Impactos ambientais provocados pelo lançamento in natura de lodos provenientes de estações de tratamento de água. In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2003, Campo Grande-MS. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005;

ACHON, C. L.; BARROSO, M. M.; CORDEIRO, J. S. Resíduos de estações de tratamento de água e a ISO 24512: desafio do saneamento brasileiro. Artigo técnico, **Eng. Sanit. Ambient.**, v.18, n.2, p. 115 – 122, 2013;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público**: NBR 12216, Rio de Janeiro, 1992;

ALMEIDA, M. M. P, SIQUEIRA, R. do N.; TEIXEIRA, E. C. Influência da altura e posição de defletor de escoamento e da relação comprimento/largura no comportamento hidrodinâmico de tanque de sedimentação. In:XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1997, Foz do Iguaçu. Anais do XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1997;

BASTOS, R. K. X.; VARGAS, L. C.; MOYSÉS, S. S.; SILVA, H. C. A. **Avaliação do desempenho de estações de tratamento de água - desvendando o real.** In: 27º Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000, Porto Alegre, Brasil. 27º Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000;

BEHIN, J.; AGHAJARI, M. Influence of water level on oil-water separation by residence time distribution curves investigations, **Separation and Purification Technology**, v. 64, p. 48-55, 2008;

BRASIL. Lei 9.478, de 6 de agosto de 1997. Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, 1997;

BRASIL. Ministério da Saúde – Portaria nº 2.914, 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Publicado no Diário Oficial da União - DOU de 16.05.2011;

CAMP, T. R. **Flocculation and flocculation basins**. American Society of Civil Engineers, n. 2722, p. 1-15, sep. 1953;

CAMPOS, Adriana Fiorotti. **Indústria do Petróleo: Reestruturação Sul-Americana nos Anos 90.** Ed. Interciência, Rio de Janeiro, 2007;

CAMPOS *et al.* Estudo sobre as principais tecnologias para tratamento de água produzida. Cadernos de Graduação – Ciências Exatas e Tecnológicas. V 1, n. 15, p. 141 – 152, Sergipe, 2012;

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 393, de 8 de agosto de 2007. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 9 ago. 2007. Seção 1, p. 72-73;

COPPE. Corrida para o mar: Os desafios tecnológicos e ambientais do pré - sal. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 21, 2009;

DANCKWERTS, P.V. Continuous flow systems — distribution of residence times. **Chemical Engineering Science**, v. 2; p 1–13, 1953;

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. 2. ed. São Carlos: Rima Editora, 2005;

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N. **Tratabilidade de Água e dos Resíduos gerados em Estações de Tratamento de Água**. 1. ed. São Carlos: Editora LDiBe, 2011;

FIGUEIREDO, I. C. Estudo da influência da hidrodinâmica e de microorganismos na dosagem de cloro aplicada para a desinfecção de água. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, 2000;

FURLANI, I. V. R. Avaliação da influência da hidrodinâmica no decaimento de cloro e na oxidação da matéria orgânica em tanques de contato de fluxo contínuo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, 2005;

HAARHOFF, J.; VAN DER WALT, J.J. Towards optimal design parameters for around-the-end flocculators. **Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA**; v.50; n.3; p. 149-159, 2001;

JAWORSKI, A. J.; MENG, G. On - line measurement of separation dynamics in primary gas / oil / water separators: challenges and technical solutions – A review. **Journal of Petroleum Science and Engineering**; v. 68; p. 47 – 59, 2009;

LCA. Proposta de Agenda 2011-2014 para o setor de água e esgoto no Brasil. p. 4, 2011.

LI, J.; GU, Y. Coalescence of oil-in-water emulsions in fibrous and granular beds, **Separation and Purification Technology;** v. 42, p 1–13, 2005;

MADEIRA, R. F. O setor de saneamento básico no Brasil e as implicações do marco regulatório para a universalização do acesso. **Revista do BNDES.** p. 123-154, 2010;

MARINS, L. P. M. Caracterização experimental do escoamento no interior de um hidrociclone sem núcleo gasoso. Dissertação (Mestrado em ciências em engenharia mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2007;

MENDES, A. P. do A; ROMEIRO, R. A. P.; COSTA, R. da C. **Mercado e aspectos técnicos dos sistemas submarinos de produção de petróleo e gás natural**. BNDES Setorial, v. 35, p. 155 - 188, 2012;

MIERZWA, J. C.; SILVA, M. C. C.; RODRIGUES, L. D. B.; HESPANHOL, I. Tratamento de água para abastecimento público: Avaliação comparativa através dos custos diretos de implantação e operação com os sistemas convencional e convencional com carvão ativado. Artigo técnico, **Eng. Sanit. Ambient.,** v.13, nº1, p. 78 – 87, 2008;

MIRANDA, J.G. Designing parallel-plates separators. **Chemical Engineering**, v.89; p. 105 – 107, 1977;

MORAES, C. A. C; MARINS, L. P. M.; MELO, D. C.; SILVA, F. S.; OLIVEIRA, J. A. A.; SOUZA, M. A.; BARCA, L. F.; SOUZA, A. M. R. F.; ALMEIDA, C. S. **Desenvolvimento de hidrociclones para altos, médios, e baixos teores de óleo.** Boletim técnico da produção de petróleo, Rio de Janeiro, v. 3; nº 2; p. 259 - 287, 2009;

MORAES, C. A. C.; JUNIOR, J. A. A. O.; ALMEIDA, L. C.; **Numerical simulation of a cyclone used as an inlet device of a gravitational separator.** Boletim técnico da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 54; nº 1/2; p. 69 - 76, 2011a;

MORAES, C. A. C.; SILVA, F. S.; MARINS, L. P. M.; OLIVEIRA, D. A.; MONTEIRO, A. S.; PEREIRA, R. M. Sistema piloto de separação submarina e reinjeção de água produzida do Campo de Marlim - Parte I - Concepção, desafios, e Programa de Qualificação Tecnológica. Boletim técnico da produção de petróleo, Rio de Janeiro, v. 5; nº 2; p. 125 - 160, 2011b;

MORAES, C. A. C.; SILVA, F. S.; MARINS, L. P. M.; OLIVEIRA, D. A.; MONTEIRO, A. S.; PEREIRA, R. M. Sistema piloto de separação submarina e reinjeção de água produzida do Campo de Marlim - Parte II - Concepção, desafios, e Programa de Qualificação Tecnológica. Boletim técnico da produção de petróleo, Rio de Janeiro, v. 5; nº 2; p. 161 - 188, 2011c;

MORAES, C. A. C.; SILVA, F. S.; MARINS, L. P. M.; MONTEIRO, A. S.; OLIVEIRA, D. A.; PEREIRA, R. M.; FOLHADELLA, H.; MCCLIMANS, O. T.; MIKKELSEN, R.; MCKENZIE, L.; SSAO - concepção de projeto e qualificação das tecnologias adotadas, **Rio Oil & Gas Expo and Conference 2012**, Rio de Janeiro, 2012;

MORAIS, J. M. Petróleo em águas profundas - Uma história tecnológica da PETROBRAS na exploração e produção offshore, PETROBRAS, Brasília, 2013;

NUNES, G. C. Modelagem e Simulação Dinâmica de Separador Trifásico Água Óleo-Gás. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1994;

NUNES, G. C. Modelagem dinâmica do processamento primário de petróleo: conceitos fundamentais e aplicação em controle de processos. Boletim técnico da produção de petróleo. v. 2; n. 1; p 29 - 47, RJ, 2007;

OLIVEIRA, D. S. Avaliação da eficiência de remoção de turbidez em função de variações no comprimento de floculadores tubulares helicoidais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, 2008;

OLIVEIRA, R. P. A. de. Sistema de inovação do petróleo offshore no Brasil: as oportunidades para os fornecedores nacionais de hidrociclones. Dissertação (Mestrado em Ciências Econômicas) – Programa de Pós-Graduação em Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013;

PACHECO, C. G.; CHACALTANA, J. T. A.; TEIXEIRA, E. C.; SIQUEIRA, R. do N. Modelagem numérica do padrão de escoamento e de curvas de passagem em unidades de contato. In: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2003, Joinville - SC. 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2003;

PETROBRAS, Plano de Negócios 2014-2018. Rio de Janeiro: RJ, 2014;

SARTORI, M. Caracterização hidrodinâmica de floculadores tubulares helicoidais por meio de simulação numérica tridimensional. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, 2006.

SIQUEIRA, R. N. Desenvolvimento e aperfeiçoamento de critérios de avaliação da eficiência hidráulica e do cálculo do coeficiente de mistura em unidades de

tratamento de água e efluentes. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, UFES, 1998.

SILVA, R. C. Avaliação da Influencia da geometria e Dinâmica do escoamento de Floculadores Tubulares Helicoidais na Redução de Turbidez, utilizando Modelagem Física. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitoria, 2007.

SILVEIRA, M. A. C. R. Controle de um processo de tratamento primário de petróleo. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2006;

SIMMONS, M. J. H.; WILSON, J. A.; AZZOPARDI, B. J. Interpretation of the flow characteristics of a primary-oil-water separator from the residence time distribution, Trans IChemE, Parte A, Chem. Eng. Res. Des, v. 80(A); p. 471 – 481, 2002;

SIMMONS, M. J. H.; KOMONIBO, E.; AZZOPARDI, B. J; DICK, D. R. Residence time distributions and flow behavior within primary crude oil-water separators treating ell-head fluids. Chem. Eng. Res. Des. v. 82; p. 1383 – 1390, 2004;

SOUZA, M. G. Estudo do comportamento hidráulico e hidrodinâmico de floculadores hidráulicos de escoamento horizontal. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005;

TAE. O mercado de tratamento de água e efluentes. p. 8 - 12, 2011;

TEIXEIRA, E. C. Hydrodynamic processes and hydraulic efficiency of chlorine contact units. 1993. p. 260. Thesis (Doctor of Philosophy), University of Bradford, U.K., 1993;

TEIXEIRA, E. C.; BREDA, I. C. F.; RESENDE, M. B.; NETO, E. S. de C. Diagnóstico da eficiência hidráulica de unidade de desinfecção de água e avaliação de medida para a redução de curtos-circuitos. In: XII Simpósio

Brasileiro de Recursos Hídricos, 1997, Vitória. Anais do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Vitória: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1997;

TEIXEIRA, E. C.; ANDRADE, M. W. M.; RAUEN, W. B; MACHADO, C. M. **Estudo** da influência do comportamento hidrodinâmico de um clarificador na remoção química de cianetos de efluentes de coqueria. In: 27º Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000, Porto Alegre, Brasil. 27º Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000;

THOMAS, J. E., BARROS, V., SANTOS, C. L., FERNANDES, E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**, 2ª ed., Capítulo 9, Rio de Janeiro, Ed. Interciência, 2001;

VIANNA, M. R. **Hidráulica aplicada às estações de tratamento de água.** Edição 4, Belo Horizonte: Imprimatur, 2002;

WILKINSON, D.; WALDIE, B.; MOHAMAD-NOR, M. I.; LEE, H. Y. Baffle plate configurations to enhance separation in horizontal primary separators. **Chemical Engineering Journal**; v. 77, p. 221 – 226, 2000;

WORLD ENERGY OUTLOOK. **Middle East and North Africa insights 2005. Organization for Economic Co-operation and Development** (OECD)/International Energy Agency (IEA), 2005;

WALDIE, B. **Separators for floating production**, Proceeding of Conference on Production Separator Developments, Aberdeen, 1996;

ZEMEL, B. and BOWMAN, R. W. Residence time distribution in gravity oil-water separations, SPE **Journal of petroleum technology**, v. 6527, p. 275-282, 1978.