

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ALAOR BOSCHETTO JUNIOR

**VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTO BIFÁSICO DE LÍQUIDO-GÁS EM
UM ROTOR RADIAL PLANO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
(Tcc 2)

CURITIBA

2018

ALAOR BOSCHETTO JUNIOR

**VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTO BIFÁSICO DE LÍQUIDO-GÁS EM
UM ROTOR RADIAL PLANO**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Rigoberto E. M. Morales

Co-Orientador: M.Sc. Henrique Stel de Azevedo

CURITIBA

2018

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a Proposta de Projeto de Pesquisa “VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTO BIFÁSICO DE LÍQUIDO-GÁS EM UM ROTOR RADIAL PLANO”, realizada pelo aluno Alaor Boschetto Junior, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Rigoberto E. M. Morales
Damec, UTFPR
Orientador

Prof. Dr. Moisés A. Marcelino Neto
Damec, UTFPR
Avaliador

M.Sc. Henrique Stel de Azevedo
Damec, UTFPR
Co-orientador

Prof. Dr. Eduardo Matos Germer
Damec, UTFPR
Avaliador

Curitiba, 11 de Dezembro de 2018.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que me iluminou e guiou nessa trajetória acadêmica, pois sem Ele nada eu seria. Também agradeço a todo suporte, carinho e força que meus pais Alaor e Beatriz me deram durante esse período de universidade, muitas vezes me apoiando em escolhas e decisões sempre para o meu bem. Sou agradecido também a minha irmã Jessica que muitas vezes foi minha inspiração para continuar trilhando a caminhada até o diploma.

Ao Professor Rigoberto a quem me cedeu a oportunidade de iniciar uma iniciação científica no laboratório NUEM onde foi iniciado todo o desenvolvimento desse trabalho, agradeço também sua orientação. Ao meu co-orientador Henrique com quem tive o prazer de ajudar a desenvolver esse trabalho e me guiou e orientou de forma ao meu crescimento no assunto. As pessoas do laboratório NUEM com quem tive o prazer de compartilhar algumas atividades, em especial ao Professor Dalton e Schneider.

Aos meus amigos e amigas com quem tive o prazer de compartilhar meus momentos durante esse período e me ajudaram e apoiaram a tomar algumas decisões. Aos meus familiares que sempre me incentivaram com palavras motivadoras para seguir em frente.

Enfim, a todos meus colegas e professores durante o período de Universidade que me ajudaram a chegar até esse momento especial.

RESUMO

BOSCHETTO Jr, Alaor. VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTO BIFÁSICO DE LÍQUIDO-GÁS EM UM ROTOR RADIAL PLANO. 66 f. Trabalho de conclusão de curso – Tcc2, Bacharelado em Engenharia Mecânica, Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Existe interesse frequente da indústria nuclear e petrolífera no estudo de escoamentos bifásicos de líquido-gás em bombas centrífugas. O entendimento dos fenômenos físicos associados no processo de degradação da eficiência de bombeio comum a esse tipo de operação pode dar suporte significativo na otimização de bombas centrífugas utilizadas em reatores nucleares ou na elevação artificial de petróleo. Devido a sua importância, foram desenvolvidos diversos estudos para avaliar o escoamento de líquido-gás na degradação da curva de ganho de pressão da bomba e condições nas quais o gás provoca uma operação instável da bomba ao longo do seu funcionamento. Porém, existem poucos estudos fundamentais sobre o entendimento da dinâmica do escoamento no interior de rotores de bombas centrífugas quando operando com escoamentos bifásicos. Neste contexto, no presente trabalho foi realizado um estudo experimental, tendo como foco principal a visualização do escoamento bifásico de líquido-gás em um rotor plano radial, com a finalidade de avaliar os fenômenos físicos envolvidos a partir das imagens adquiridas. Para atender ao estudo proposto, foi projetada uma bancada experimental em que o rotor radial foi construído em material transparente para possibilitar a visualização do comportamento detalhado do escoamento de ar no rotor. A visualização foi realizada utilizando uma câmera de alta resolução fixa ao eixo do rotor, para diferentes condições de vazão (de água e ar) e de rotação. A partir das imagens adquiridas, o escoamento foi classificado por padrões e associado às condições de operação testadas (vazão, rotação). Também foram levantadas curvas de desempenho para diferentes condições de rotação, vinculadas com o padrão do escoamento no rotor. Foi possível observar que para o aumento das frações de vazio e velocidades de rotação constante, o desempenho do rotor radial é afetado devido a formação de bolsões de ar no interior do rotor. Quando foi alterado as velocidades de rotação para frações de vazio constantes, se observou

que há uma coalescência das bolhas de ar no interior do rotor com o aumento da velocidade de rotação.

Palavras-chave: bombas centrífugas, escoamento bifásico, visualização, rotor radial.

ABSTRACT

BOSCHETTO Jr, Alaor. Visualization of two-phase liquid-gas flow in a flat radial rotor. 66 p. Undergraduate Thesis, Mechanical Engineering, Academic Mechanical Engineering Department, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

There is frequent interest in the nuclear and oil industry in the study of two-phase flow of liquid-gas in centrifugal pumps. The understanding of the associated physical phenomena in the process of degradation of the common pump efficiency to this type of operation can give significant support in the optimization of centrifugal pumps used in nuclear reactors or in the artificial elevation of petroleum. Due to their importance, several studies have been developed to evaluate the liquid-gas flow in the degradation of the pressure gain curve of the pump and conditions in which the gas causes an unstable operation of the pump during its operation. However, there are few fundamental studies on the understanding of flow dynamics within centrifugal pump rotors when operating with two-phase flows. In this context, the present work will be carried out an experimental study, having as main focus the detailed visualization of the two-phase flow of liquid-gas in a radial flat rotor, in order to evaluate the physical phenomena involved from the acquired images. To meet the proposed study, an experimental bench was designed in which the radial rotor was constructed of transparent material to facilitate the visualization of the detailed behavior of the air flow in the rotor. The visualization will be performed using a high resolution camera fixed to the rotor axis, for different flow conditions (water and air) and rotation. From the acquired images, the flow will be classified by standards and associated to the tested operating conditions (flow, rotation). It was observed that for the increase of vacuum fractions and constant rotation speeds, the performance of the radial rotor is affected due to the formation of pockets of air inside the rotor. When the rotational speeds were changed to constant vacuum fractions, it has been observed that there is a coalescence of the air bubbles within the rotor with increasing speed of rotation.

Palavras-chave: centrifugal pumps, two-phase flow, visualization, radial rotor.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Típicas curvas de desempenho de uma bomba centrífuga.....	11
Figura 1.2 - Performance da bomba para diversas quantidades de gás.	13
Figura 1.3 - (a) Rotor radial plano usado no estudo experimental; (b) Ilustração da seção de teste.....	15
Figura 2.1 - Distribuições log-normal da gama de diâmetros de bolhas encontrados no canal de um rotor radial de uma bomba centrífuga (Minemura et al. (1985)).	18
Figura 2.2 - Diâmetros médio de bolhas ao longo de uma bomba axial.....	19
Figura 2.3 - Fotografias do escoamento nos canais do rotor da bomba. As demarcações (A) e (B) indicam bolsões de gás. (Minemura et al. (1985)).....	20
Figura 2.4 - Esquema do circuito experimental (Pessoa, 2001).....	21
Figura 2.5 - Esquema do circuito experimental (Pessoa, 2001).....	22
Figura 2.6 - Eficiência hidráulica medida em função da vazão normalizada de líquido (Pessoa, 2001).....	23
Figura 2.7 - Formação de bolsões de gás em um rotor de bomba centrífuga.	24
Figura 2.8 - Distribuição de gás no rotor para diferentes frações de gás.	25
Figura 2.9 - Desempenho da bomba com indicação das estruturas de fluxo analisadas. Fonte: Adaptado de (Barrios L. , 2007)	26
Figura 3.1 - Esquema do circuito experimental.	34
Figura 3.2 - Imagem e montagem do tanque de líquido e bomba <i>booster</i>	35
Figura 3.3 - Bancada experimental finalizada com todos os equipamentos.....	36
Figura 3.4 - (a) Rotor; (b) Câmara de descarga; (c) Montagem;	37
Figura 3.5 - (a) Medidor de pressão no rotor; (b) Medidor de pressão de sucção; (c) Esquema das tomadas de pressão;.....	38
Figura 3.6 - (a) Arranjo de pedras porosas; (b) Padrão de bolhas dispersas; (c) Escoamento com líquido e gás na entrada do rotor.....	39

Figura 3.7 - Montagem do sistema de visualização da bancada experimental.	40
Figura 3.8 - Aparato de iluminação.	41
Figura 4.1 - Resultados da análise de repetitividade para uma velocidade de 400 [rpm] e fração de vazio de 3% para diferentes dias.	47
Figura 4.2 - Curvas normalizadas de escoamento monofásico de velocidades de rotação entre 150 e 500 rpm.	48
Figura 4.3 - Nomenclatura utilizada no rotor radial plano.	50
Figura 4.4 - Gráfico do escoamento monofásico e bifásico para uma fração de vazio de 3% e velocidade de rotação de 300 rpm.	51
Figura 4.5 – Estruturas de escoamento obtidas para uma fração de vazio de 3%.	52
Figura 4.6 - Curvas normalizadas do desempenho da bomba teste medido experimentalmente sob escoamento monofásico e bifásico para diferentes frações de vazio.	54
Figura 4.7 - Descontinuidades da Curva de 400 rpm e fração de vazio de 3%.	56
Figura 4.8 - Curva normalizada de ganho de pressão para fração de vazios constante e diferentes velocidades de rotação.	57
Figura 4.9 - Padrões de escoamento obtidos para velocidades de rotação entre 150 e 400 rpm e frações de vazio entre 2 e 5%.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Parâmetros operacionais monitorados.....	42
Tabela 3.2 - Grade de testes experimentais.....	45
Tabela 4.1 - Pontos de <i>design</i> escolhidos para a visualização dos padrões de escoamento para diferentes velocidades de rotação.	58

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 Contexto do Tema	10
1.2 Caracterização do Problema	12
1.3 Objetivos	14
1.4 Justificativa	16
2 REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1 Escoamento bifásico em bombas centrífugas	17
2.2 Comentários Gerais	31
3 METODOLOGIA	33
3.1.1 Circuito Experimental	33
3.1.2 Seção de testes	35
3.1.3 Linha de injeção de ar	39
3.1.4 Visualização do escoamento bifásico no rotor	40
3.1.5 Sistema de aquisição e supervisão de dados.	42
3.2 Procedimento de Teste	43
4 Resultados	46
4.1 Resultados de repetitividade	46
4.2 Resultados dos testes com escoamento monofásico	47
4.3 Resultados dos testes com escoamento bifásico	49
4.3.1 Influencia da fração de vazio no desempenho do rotor	49
4.3.2 Influência da velocidade de rotação no desempenho da bomba teste	56
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
REFERÊNCIAS	63

1. INTRODUÇÃO

A indústria petrolífera e nuclear sempre estiveram interessadas no estudo do escoamento em bombas centrífugas, devido a esses escoamentos terem a presença de misturas líquido-gás. Por este motivo, pode-se observar que a preocupação está atrelada diretamente com o bombeio centrífugo e o seu consumo energético, já que se estima que as bombas centrífugas industriais demandem 5% de toda energia produzida nos Estados Unidos (JAPIKSE, 1988). Por outro lado, por existirem muitas variantes geométricas, físicas, químicas e de condições de operação (vazão e rotação) no processo de bombeio, é reconhecida a dificuldade de compreender e modelar os fenômenos que ocorrem em uma bomba centrífuga.

Especificamente no que se refere ao bombeio de misturas de líquido-gás, o nível de complexidade é aumentado, pois até o momento não é entendida em detalhe a dinâmica da interação entre as fases nesse tipo de trabalho. Um dos desafios consiste na grande variedade de geometrias e condições de operação existentes, o que dificulta a caracterização geral de padrões de escoamento (Gülich, 2010).

Entretanto, existe o interesse em melhor se compreender o funcionamento de bombas centrífugas nessas condições, o que vem a ser importante em alguns setores da indústria, entre eles a petrolífera, como será visto a seguir.

1.1 Contexto do Tema

Na indústria petrolífera, é comum a utilização de técnicas de elevação artificial para viabilizar ou amentar a produção de petróleo, especialmente em poços onde a pressão no reservatório não fornece a energia necessária que provoque o escoamento natural do petróleo até a superfície (plataforma). Entre as diferentes técnicas de elevação artificial, uma das mais comumente utilizadas no mundo é a de Bombeio Centrífugo Submerso (BCS).

Entre as vantagens encontradas pelo seu uso estão a eficiência relativamente alta e uma boa adaptabilidade a ambientes severos (águas profundas por exemplo). Geralmente, um sistema de BCS é composto de várias bombas em série, sendo

cada estágio composto por um rotor (parte rotativa) e um difusor (parte estacionária). O conjunto é dimensionado de acordo com as necessidades e especificações do poço.

Normalmente, os catálogos dessas bombas são especificados apenas para escoamentos monofásicos de água e informam as curvas de altura de elevação, eficiência e potência requerida, em função da vazão. Na Figura 1.1, é mostrada um exemplo de curva característica fornecida por um fabricante, onde se pode obter para o caso do escoamento monofásico, geralmente água, a altura de elevação, potência e eficiência em função da vazão.

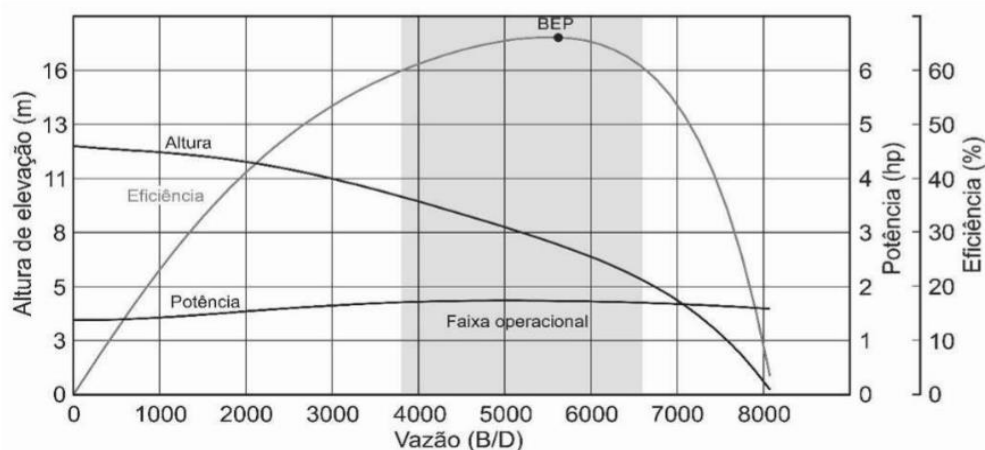


Figura 1.1 - Típicas curvas de desempenho de uma bomba centrífuga.

Muitas vezes os óleos produzidos em poços submarinos tem elevada viscosidade, e nesse caso a carta apresentada na Figura 1.1 precisa ser corrigida, pois a viscosidade do fluido provoca uma degradação adicional do desempenho quando comparado à bomba operando com água (Ofuchi, 2015).

O bombeio no caso da extração de petróleo não se restringe apenas ao óleo. Dependendo da composição do petróleo, gases dissolvidos se desprendem do óleo ao longo do escoamento, provocando a presença da fase gás livre, que provoca uma diminuição da eficiência das bombas e que, dependendo da sua concentração, pode provocar o bloqueio completo da bomba centrífuga.

1.2 Caracterização do Problema

Conforme exposto acima, certas áreas da indústria, em especial a petrolífera, cada vez mais estão interessadas no desenvolvimento de estudos para observar o comportamento do escoamento bifásico de líquido-gás em bombas centrífugas.

A perda de desempenho devido à presença de uma fase gasosa num escoamento é objeto de pesquisas envolvendo bombas centrífugas. A dificuldade no estudo desse tema se dá pela dificuldade em se identificar e compreender todas as variáveis relacionadas ao escoamento e a perda de eficiência da bomba, fazendo com que os estudos sejam muito generalistas. Trabalhos mostram que a dinâmica do escoamento é influenciada por diversas variáveis, como as propriedades físicas do gás e do líquido, a razão de massas específicas e a tensão superficial entre ambos, a fração volumétrica de gás na mistura, o diâmetro das bolhas dispersas no líquido, a velocidade de rotação na bomba, a pressão de entrada, o número de estágios, o diâmetro do rotor, a forma e a quantidade de pás, o tamanho da folga entre o rotor e a carcaça e o tipo da bomba (Gulich, 2010).

A redução na eficiência do bombeio devido à presença do gás no escoamento, se dá, de acordo com Estevam (2002), Barrios (2007) e Gamboa (2008), pela liberação do gás no óleo, que então pode coalescer e gerar bolsões, reduzindo dessa maneira a vazão de líquido nos canais do rotor da bomba.

A Figura 1.2 mostra resultados experimentais (Barrios 2007) para o incremento de pressão em função da vazão de líquido, de uma bomba centrífuga operando com diferentes quantidades de gás a uma velocidade de rotação constante. São apresentadas diversas curvas para diferentes frações de vazio, γ , variando entre 0 e 15%.

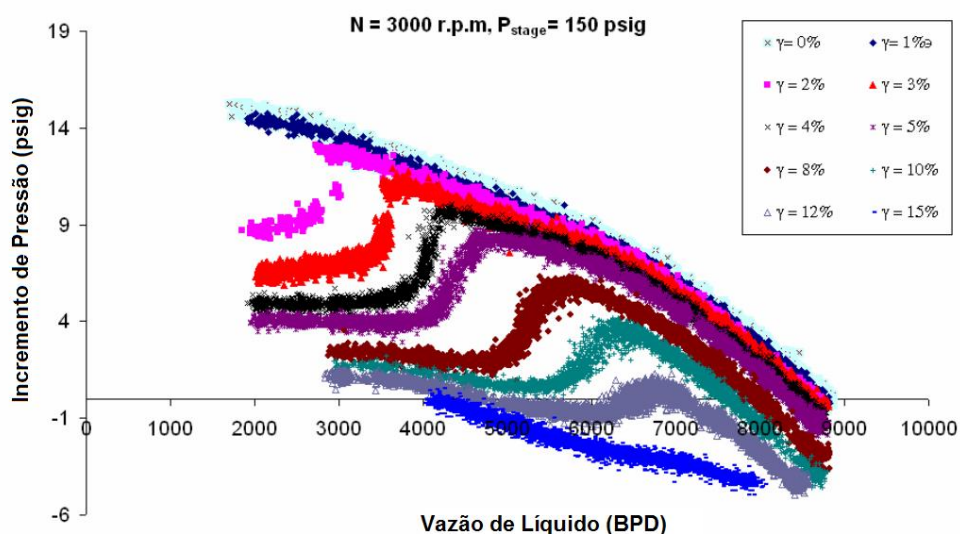


Figura 1.2 - Performance da bomba para diversas quantidades de gás.

Como podemos observar, quando esse fenômeno de redução na eficiência do bombeio acontece em escoamento bifásico para diferentes frações de vazio tem-se uma queda abrupta de desempenho, chamada de ponto de *surging*, que normalmente está associado à formação de um bolsão de gás que fica aprisionado no rotor. Caso esse bolsão de gás aumente, ele pode bloquear os canais do rotor da bomba, e o ganho de pressão será praticamente nulo, fenômeno esse conhecido como *gas locking*.

Pode-se observar também que o ponto de *surging* se desloca para a direita, no sentido de maior vazão de líquido conforme se aumenta a fração de gás no sistema, ou seja, a janela de operação da bomba se torna cada vez mais restrita conforme se aumenta a fração de gás. Esse conhecimento da janela de operação é de grande importância para o projeto de bombas centrífugas que estão sujeitas a escoamentos bifásicos.

Devido a sua importância, muitos estudos são concentrados em compreender os fenômenos físicos envolvidos na influência do gás no escoamento bifásico no interior do rotor de uma bomba centrífuga. O tema é de grande interesse da indústria petrolífera no sentido de melhorar o desempenho das linhas de produção e petróleo delimitar de maneira confiável as faixas de operação de uma bomba centrífuga em operações de elevação artificial de petróleo, principalmente no ambiente submarino.

No entanto, existem ainda poucos estudos de escoamento bifásico em bombas centrífugas com a visualização do campo de gás devido a geometria dessas serem de difícil acesso visual, sendo necessário um maior entendimento dos fenômenos envolvidos do escoamento de gás-líquido no interior do rotor e sua associação com a deterioração do desempenho das bombas. Os estudos existentes geralmente são específicos para certos tipos de bombas e se restringem apenas na medição do desempenho em função da velocidade de rotação e vazões de líquido e gás.

Neste contexto, a visualização experimental dos padrões de escoamento de líquido-gás no interior de um rotor radial plano pode ser de muita valia, pois, a partir das imagens controladas e de qualidade podem ser avaliados os fenômenos envolvidos na dinâmica das bolhas nos canais do rotor. Nesse sentido, relevantes informações poderão ser retiradas desse trabalho servindo de base para estudos posteriores em bombas centrífugas com geometria de rotor complexas.

1.3 Objetivos

O presente trabalho tem o objetivo principal o estudo experimental do escoamento bifásico líquido-gás em um rotor radial plano. Para isto será utilizado uma bancada experimental, projetada para que se tenha um acesso visual facilitado, que permita obter em detalhe a distribuição de gás dentro do rotor radial plano e os padrões de escoamento para diferentes vazões de líquido e gás, diferentes rotações e frações de vazio. O levantamento das curvas de ganho de pressão do rotor também é previsto para a bancada.

Na Figura 1.3 é ilustrado um esquema do rotor radial plano, que é projetado com material transparente, com a finalidade de se ter acesso visual facilitado. O mesmo será retro-iluminado com LED e será acoplada uma câmera *GoPro* ao eixo que será direcionada para os canais do rotor de modo a capturar imagens de alta definição. A Figura 1.3 mostra também a seção de teste idealizada para os experimentos de modo a se ter uma breve ideia do funcionamento da mesma.

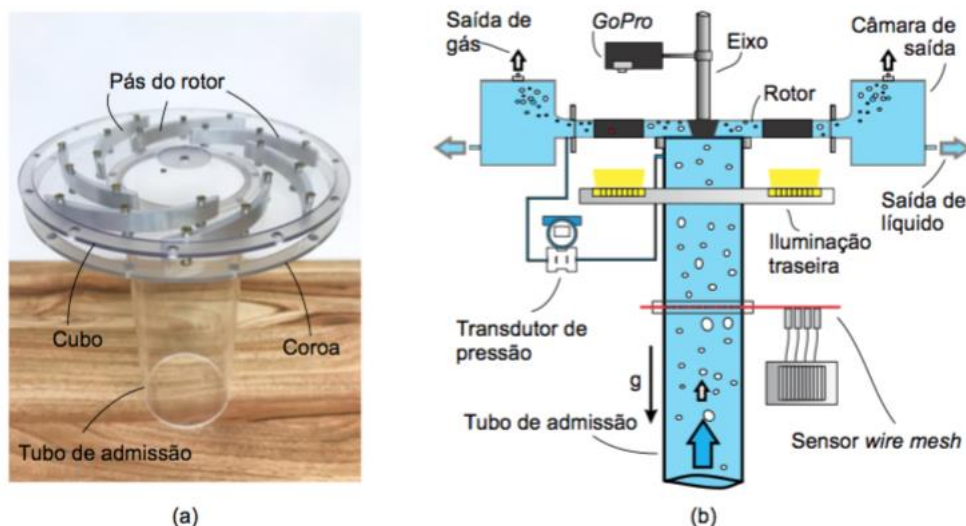


Figura 1.3 - (a) Rotor radial plano usado no estudo experimental; (b) Ilustração da seção de teste.

A partir das imagens adquiridas do rotor radial plano conforme Figura 1.4, serão associados os padrões de escoamento com a deterioração do desempenho do rotor para o escoamento de água–ar em função das condições de operação (vazão das fases e rotação). Será dada ênfase na identificação dos fenômenos físicos envolvidos na trajetória de bolhas isoladas, aglomeração, quebra e coalescência das bolhas no rotor.



Figura 1.4 - Imagem a ser obtida na bancada experimental.

1.4 Justificativa

Apesar do escoamento bifásico líquido-gás em bombas centrífugas ser estudado há muito tempo, especialmente nas áreas petrolífera e nuclear (Estevam, 2002), ainda são escassos os trabalhos relacionados a essa temática.

Devido a dificuldade enfrentada em se definir uma modelagem para o estudo do tema, a indústria petrolífera foca o estudo em desenvolver maneiras de se prever o desempenho (eficiência) e dimensionamento das BCS em poços. Para esse entendimento, entretanto, é importante estudar o comportamento do escoamento nos canais do rotor para se entender as características do escoamento como pontos de *surging* e *gas locking*, de forma a poder associar variações entre padrões com o desempenho de bombas nessas condições.

Na indústria nuclear, os principais estudos de bombas centrífugas estão relacionados ao aprimoramento da segurança dos reatores nucleares, já que a principal atividade envolve fluidos refrigerantes que, em certas condições, podem vaporizar e dar origem a escoamentos bifásicos em bombas centrífugas.

Existe a necessidade de estudos que possam enriquecer ainda mais esse assunto, pois a maioria dos que existem são condicionados às bombas e condições operacionais em que foram estudados, impossibilitando muitas vezes replicar ou utilizar em outros casos. De fato, diferenças nas distribuições das fases na bomba são encontrados até mesmo em bombas do mesmo tipo (Gulich, 2010).

Por este motivo, o tema que este trabalho abrangeu é de grande importância, pois são escassos estudos baseados na visualização e caracterização de padrões de escoamento com uma bancada experimental com iluminação adequada e uma câmera dedicada podendo obter imagens desde a entrada até saída do gás no canal do rotor. A forma plana do rotor radial irá ajudar na visualização das bolhas nos canais, o que é pouco comum na literatura. Deste modo, o trabalho deve contribuir tanto para a literatura da área, como para os problemas encontrados nos setores da indústria envolvidos com o tema.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Bombas centrífugas são equipamentos utilizados com várias finalidades: desde o uso doméstico, elevando água em residências, até a extração de petróleo. Como discutido no capítulo anterior, tem-se por objetivo estudar o comportamento de bombas em aplicações onde operam com escoamentos líquido-gás, o que ocorre em certas áreas como nuclear e petrolífera.

Neste capítulo, é apresentada uma revisão da literatura que permite entender o problema a ser estudado e a contextualizar os objetivos do presente trabalho. O foco da revisão foi direcionado aos estudos experimentais existentes na literatura sobre bombas centrífugas.

2.1 Escoamento bifásico em bombas centrífugas

Ao tratar deste tema abordado, percebe-se pela complexidade do mesmo, uma forte carência no que tange a estudos experimentais e até mesmo, em alguns casos, são percebidas algumas contradições em publicações científicas distintas. Naturalmente, no movimento de líquidos e gases é percebido uma série de padrões de escoamento, que por sua vez possuem uma relação direta com aspectos geométricos, físicos e químicos. Devido a isto, faz-se necessário um estudo preliminar referente a trabalhos técnicos e de aplicações práticas a fim de entender esta problemática do escoamento de líquido-gás em bombas centrífugas.

Impulsionados pelo problema de perda de fluido refrigerantes em plantas nucleares, Murakami e Minemura (1974a) foram pioneiros nesta área de estudos, investigando o desempenho de escoamento de uma bomba, operando com ar e água, com rotor semiaberto e radial. Nos experimentos realizados, foram medidos o desempenho específico do rotor e também o total da bomba para que, fosse possível analisar qualitativa e quantitativamente os resultados para diversas situações de operação.

No mesmo foco de estudos para estimativa de desempenho em bombas operando com escoamentos gás-líquido, Minemura (1985) desenvolveu um método

a partir de um modelo teórico, que através de expressões para perdas hidráulicas propiciam conhecer fatores de multiplicação para expressar as perdas por atrito e choque. Tais fatores, ao serem analisados do ponto de vista da distribuição de bolhas ao longo do rotor, podem facilitar o entendimento que a sua velocidade influencia no tamanho das bolhas.

A seguir, a Figura 2.1, a partir de experimentos adicionais realizados por Minemura et. al (1985), apresenta medições de diâmetro de bolhas mostradas por meio de distribuições do tipo log-normal entre a entrada e a saída de um rotor radial. Primeiramente a distribuição é feita na entrada do rotor, e logo depois a segunda no caminho médio entre a entrada e saída. Por fim, a última distribuição é feita logo na saída do rotor. São comparadas distribuições para duas velocidades de rotação, para valores de fração de vazio pequenos na sucção da bomba ($\alpha_s \approx 0,012$), e o valor médio de cada distribuição também é indicado.

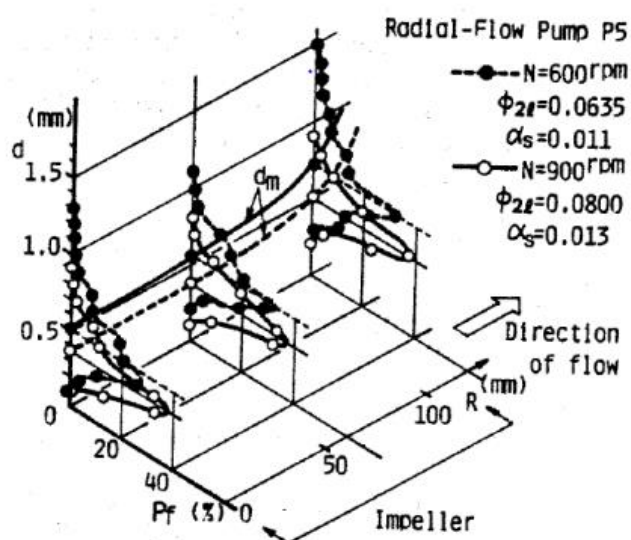


Figura 2.1 - Distribuições log-normal da gama de diâmetros de bolhas encontrados no canal de um rotor radial de uma bomba centrífuga (Minemura et al. (1985)).

Pode-se perceber uma uniformidade maior no diâmetro das bolhas no canal do rotor que está associada a maiores velocidades de rotação e que a forma da distribuição se mostra levemente alterada da entrada à saída. Este fato sugere que a mistura escoar em um padrão uniformemente disperso até a saída. Além disso, nota-

se que mesmo com o aumento de pressão, as bolhas aumentam ligeiramente, provavelmente devido ao fato da coalescência na entrada da bomba.

Nota-se que maiores velocidades de rotação geram uma maior uniformidade no diâmetro das bolhas através do canal do rotor. Isto é, a distribuição log-normal se mostra mais concentrada em torno de um valor médio.

A Figura 2.2, a seguir, apresenta os valores dos diâmetros médios de bolha obtidos ao longo de uma bomba axial, d_m . Neste caso, são comparadas curvas para três valores diferentes de fração de vazio na sucção da bomba, α_s . Os valores de d_m são normalizados pelo passo entre as pás do rotor, l .

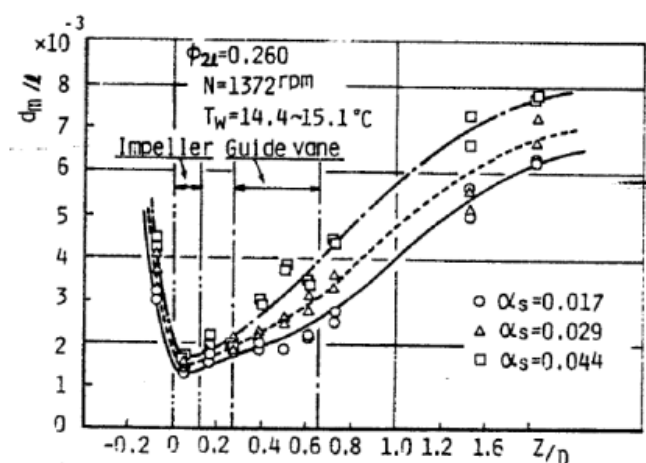


Figura 2.2 - Diâmetros médio de bolhas ao longo de uma bomba axial (Minemura et al. (1985)).

Pode-se observar que o diâmetro das bolhas, na entrada da bomba é levemente dependente de α_s , caindo de forma abrupta na sucção do rotor. Depois da entrada, o diâmetro cresce de forma contínua, mesmo com aumento de pressão, que como dito anteriormente, explica-se pela coalescência de bolhas no rotor. Com o aumento de α_s , a tendência é o aumento no diâmetro da bolha.

A degradação de desempenho torna-se relevante com o aumento da quantidade de gás. Na Figura 2.3 a seguir, são mostradas as visualizações da distribuição do gás no rotor nos pontos de 1 a 7. A pequenos níveis de gás, observa-se, nos pontos 1 e 2, devido a existência de gradientes laterais de pressão, as

bolhas de gás escoam mais próximas à face de pressão das pás. O bolsão de gás formado no interior da bomba é bem maior do que o observado no ponto 3 se comparado com o ponto 4. Já, em 4' o bolsão estende-se por quase todo o canal da bomba. A bomba perde praticamente toda a sua atividade neste ponto, entretanto o bolsão de gás diminui em tamanho e a bomba retoma a atividade. Em seguida, o comportamento de instabilidade se repete.

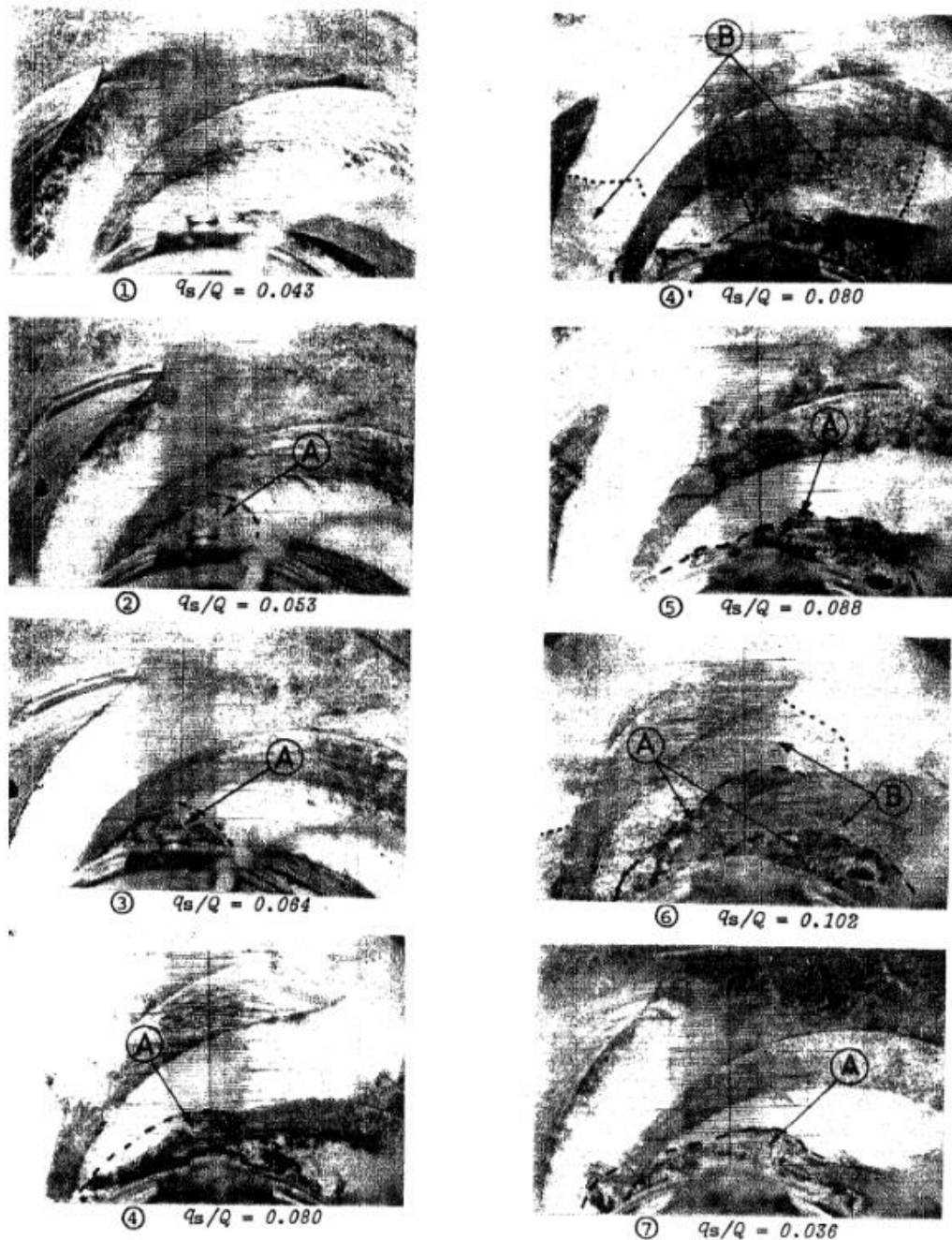


Figura 2.3 - Fotografias do escoamento nos canais do rotor da bomba. As demarcações (A) e (B) indicam bolsões de gás. (Minemura et al. (1985)).

Apesar destes resultados, (Minemura et al., 1974) afirmam que as perdas por atrito e choque devido ao escoamento bifásico na bomba tem pouca dependência com a velocidade da rotação. A conclusão que os autores chegam é que o tamanho da bolha não tem influência na deterioração do desempenho de uma bomba operando nas condições já vistas, embora alguns autores discordem disto.

Até então, os trabalhos apresentados analisaram bombas de único estágio com voluta. Por isso, impulsionado por questionamentos por parte da indústria do petróleo acerca dos estágios de uma bomba, Pessoa (2001), realizou importante contribuição para melhor entendimento deste assunto. Com este intuito, Pessoa (2001) utilizou de um sistema BCS de 22 estágios a fim de analisá-los individualmente. O autor compara o desempenho de cada estágio instrumentado por meio da medição do diferencial de pressão, além de identificar pontos de *surging* e bloqueio de gás do conjunto.

Como pode-se observar na Figura 2.4, a seguir, o autor disponibiliza um circuito experimental esquematizado para mostrar o sistema de admissão de água, de ar, a instrumentação dos estágios da BCS.

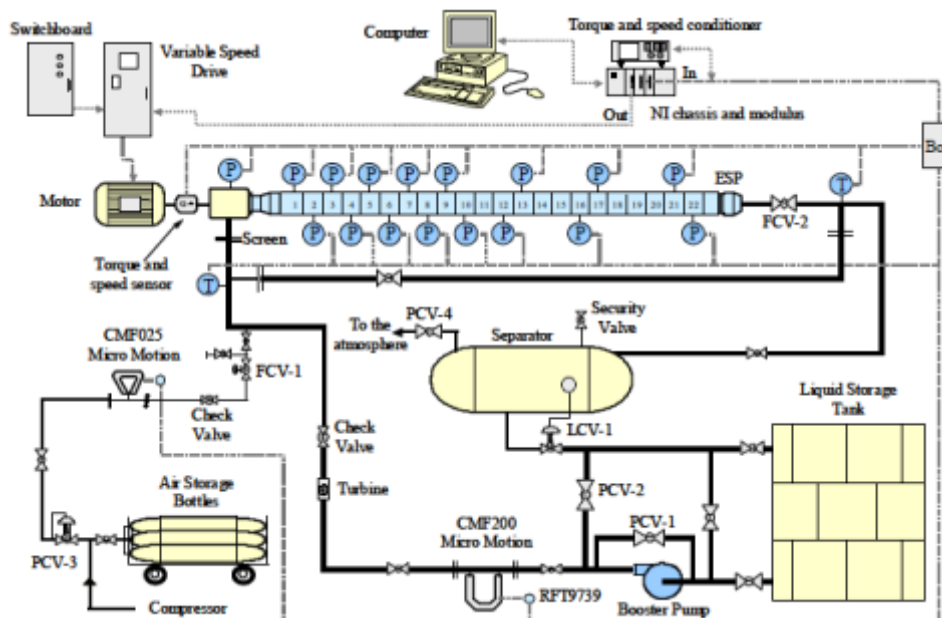


Figura 2.4 - Esquema do circuito experimental (Pessoa, 2001).

É utilizado pelo autor, no estudo apenas uma velocidade de rotação, uma pressão de entrada fixa e água e ar como fluidos de trabalho, sendo variadas as vazões volumétricas de líquido e de gás. Na imagem a seguir, Figura 2.5, observa-se para a BCS de 22 estágios o incremento total de pressão em função da vazão de líquido a ser bombeada.

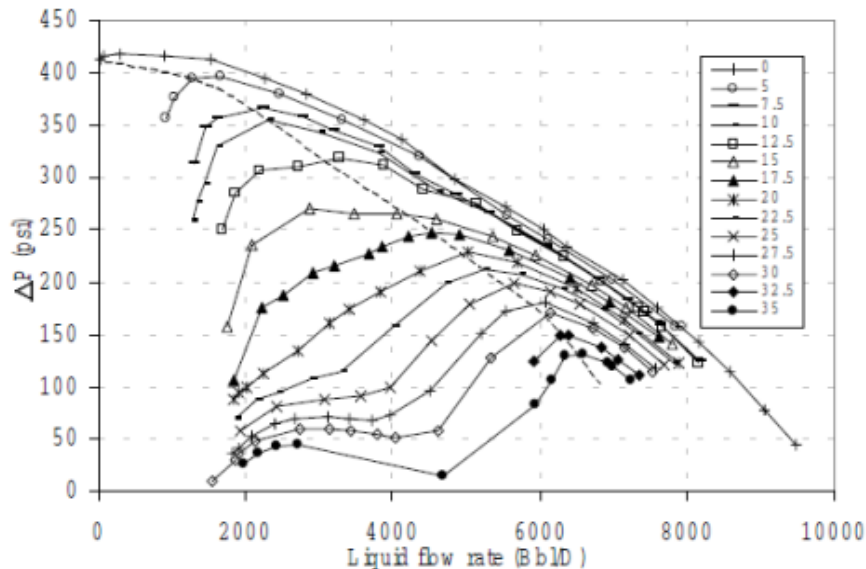


Figura 2.5 - Esquema do circuito experimental (Pessoa, 2001).

A linha tracejada indica o ponto em que a curva de incremento de pressão mostra sua primeira mudança de inclinação quando se reduz a vazão de líquido de seu valor máximo até o seu valor mínimo, que é normalmente referido como *surging*. A vazão volumétrica de gás é mostrada em unidades de milhares de pés cúbicos padrão por dia [Mscf/d], e a de líquido em barris de petróleo por dia [bbl/d]. O incremento de pressão é mostrado em libras por polegada quadrada [psi].

Segundo, Pessoa (2001), o desempenho cai continuamente com o aumento da vazão de gás, mantidas fixas as demais condições operacionais, fato que já era esperado. Posteriormente, nota-se um aumento da quantidade de gás na mistura de forma contínua, o que inicia uma alta diminuição da capacidade da bomba em elevar pressão, e muda para a direita o ponto de *surging*. Assim, a janela de operação da bomba se torna cada vez menor.

A seguir, na Figura 2.6, é mostrada a eficiência hidráulica em função da vazão de líquido para várias vazões de gás.

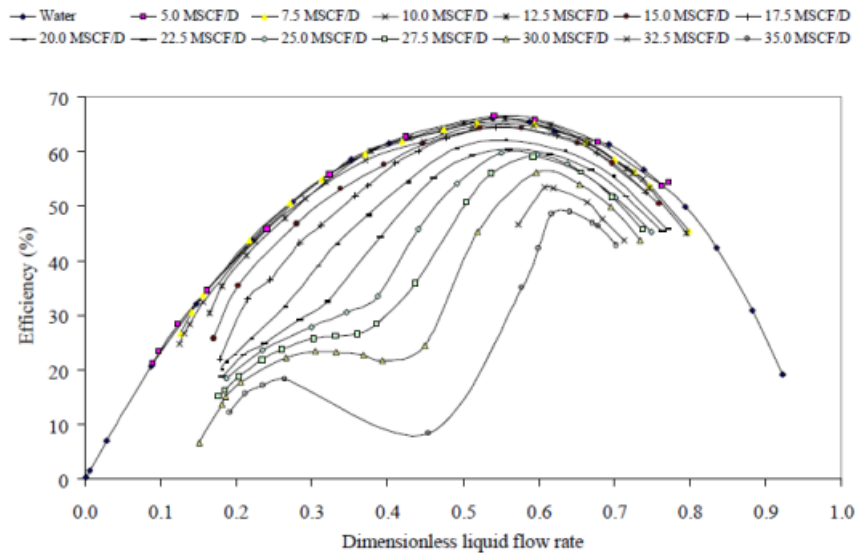


Figura 2.6 - Eficiência hidráulica medida em função da vazão normalizada de líquido (Pessoa, 2001).

Pode-se notar que a eficiência da bomba diminui com o aumento da vazão de gás. Também é importante a observação de que o ponto de máxima eficiência em operação degradada é deslocado para frente. Quando em operação com misturas bifásicas, é fato que a vazão diminui o efeito de coalescência na entrada da bomba. Devido a este efeito, a janela de operação da bomba é restringida no sentido de desloca-la para direita, alterando conjuntamente com ela o ponto máxima eficiência.

Um dos trabalhos pioneiros no Brasil acerca da temática abordada, escoamento bifásico, foi realizado por Estevam (2002). Através de uma análise que consistia no estudo do fenômeno de escoamento, ele criou um modelo que possibilitou a previsão das condições de operação de uma bomba centrífuga. Na Figura 2.7, a seguir, é mostrado a formação de bolsões de gás para duas velocidades de rotação distintas.

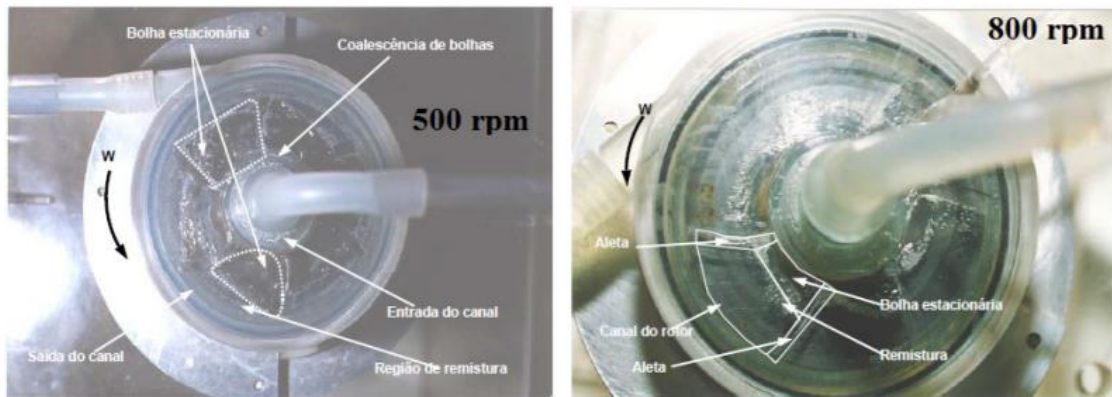


Figura 2.7 - Formação de bolsões de gás em um rotor de bomba centrífuga.

Estevam (2002), na elaboração do seu modelo, que se utilizou de uma bomba centrífuga transparente operando na condição de *surging*, permitiu a visualização do escoamento bifásico. Uma das principais constatações feitas pelo autor se refere ao fato que é formado um considerável acúmulo de gás na entrada da bomba, dependendo do nível de gás injetado na mistura com o líquido. Além disso, ele afirma que apenas bolhas consideradas muito pequenas conseguem escapar para fora do bolsão de gás e que a depender do aumento da vazão do líquido e da pressão de trabalho, o tamanho das mesmas tende a diminuir.

Outro estudo de grande importância para esta temática foi realizado por Barrios (2007), que focou principalmente na identificação dos fenômenos relacionados à ocorrência instável de *surging*.

Utilizando uma tecnologia de fotografia em alta velocidade, uma análise foi feita a partir da distribuição de gás no canal do rotor para oito relações de vazão de gás e líquido. Para tanto, foi mantida uma rotação de 600 [rpm] aliada a uma vazão de gás em 0,15 [scf/h] (pés cúbicos padrão por hora). Além disso, na Figura 2.8, pode-se observar os padrões de escoamento de FS1 ao FS8 pontos referentes a distribuição de gás no rotor para diferentes frações de gás, além de outros fenômenos relacionados à dinâmica do gás no rotor.

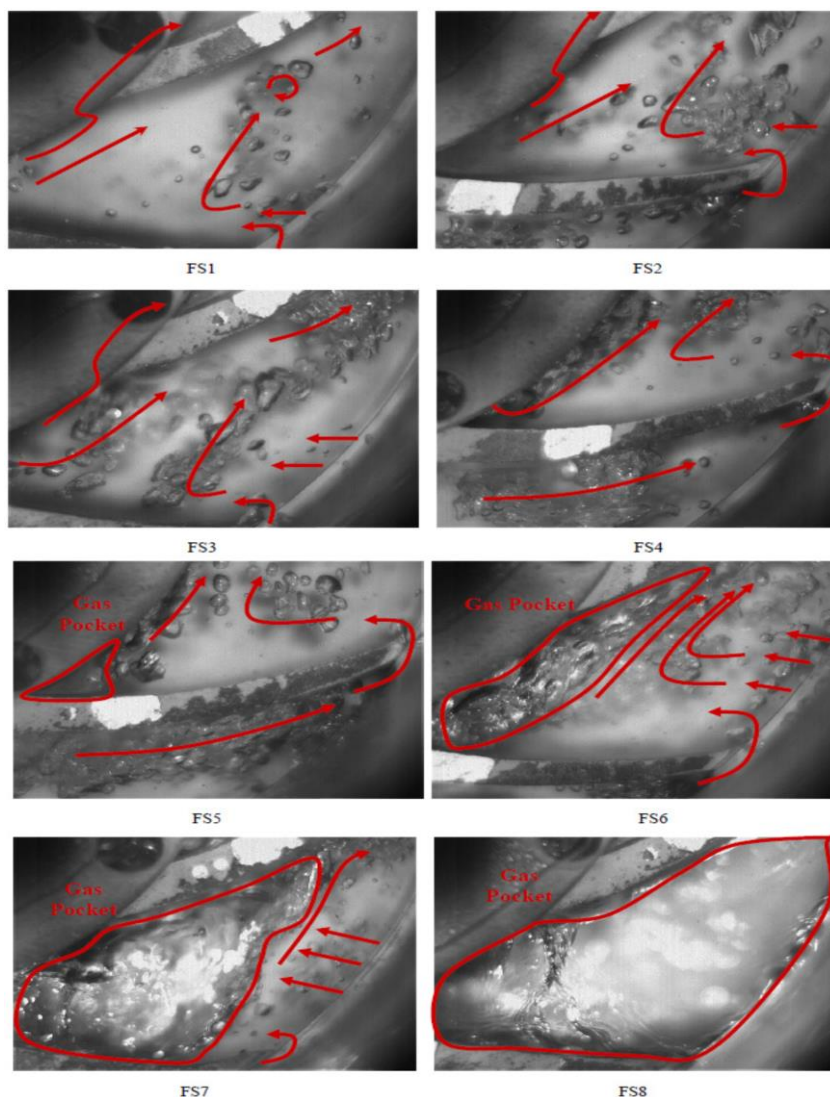


Figura 2.8 - Distribuição de gás no rotor para diferentes frações de gás.
Fonte: (Barrios L., 2007)

Analisando os pontos FS1 e FS2, com altas vazões de líquido, fora observado um padrão disperso. Nesse caso, algumas bolhas seguem para a entrada do rotor, tendem a desviar para a face de pressão, podendo em alguns casos migrarem de canal. Por outro lado, na entrada do canal, o gás tende a ser arremessado à face de pressão, podendo também recuar e adentrar apenas o canal seguinte. No ponto FS3 a FS4, é mantido o padrão de bolhas dispersas, entretanto começa a surgir um acúmulo de gás na ponta da face de pressão.

Ao reduzir a vazão de líquido a partir de FS5 e FS6, pode-se notar uma grande diminuição no incremento de pressão fornecido pela bomba e a coalescência de gás

em sua entrada, indicando o início do *surging*. Com o aumento da fração de gás no ponto FS7, é perceptível a diminuição ainda mais do ganho de pressão do rotor. A fração de gás aumenta originando um bolsão de gás. Com a bolha ocupando praticamente toda a extensão do canal em FS8, tem-se o bloqueio da operação de bombeio.

Barrios (2007) repetiu os experimentos elevando a rotação da bomba de 900 a 1500 [rpm], e concluiu o diâmetro médio das bolhas é consideravelmente reduzido, fato este comprovado anteriormente por Minemura (1985). Na Figura 2.9 a seguir pode ser visualizado o desempenho da bomba com indicação das estruturas de fluxo analisadas sendo possível fazer o paralelo entre fenômenos associados em cada ponto associado ao incremento de pressão.

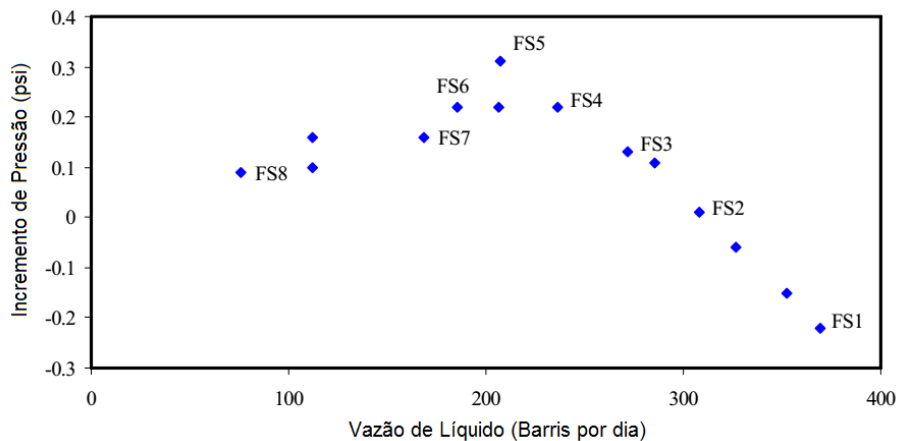


Figura 2.9 - Desempenho da bomba com indicação das estruturas de fluxo analisadas.
Fonte: Adaptado de (Barrios L. , 2007)

Outro estudo experimental bastante relevante e atual para análise do desempenho das bombas centrífugas com escoamento bifásico operando com ar-água é o trabalho de Cubas (2017). O autor utilizou em seus testes uma metodologia que consistia em manter um parâmetro de valor constante durante a elaboração da curva de altura de elevação da bomba, sendo esse parâmetro ou a fração de vazio de gás dada pelo modelo homogêneo ou a vazão mássica de gás medida através da placa de orifício. Utilizando uma pressão manométrica de sucção constante de

160kPa, ele realizou os testes para quatro velocidades, a saber, 300, 400, 500 e 600 rpm.

Na Figura 2.10, pode-se observar a curva levantada por Cubas (2017) para o caso de 300 rpm, que mostra as estruturas de escoamento (EE), apresentando os dados de primeiro estágio do desempenho do rotor e difusor, além do desempenho global da bomba e da curva para escoamento monofásico, utilizada como referência.

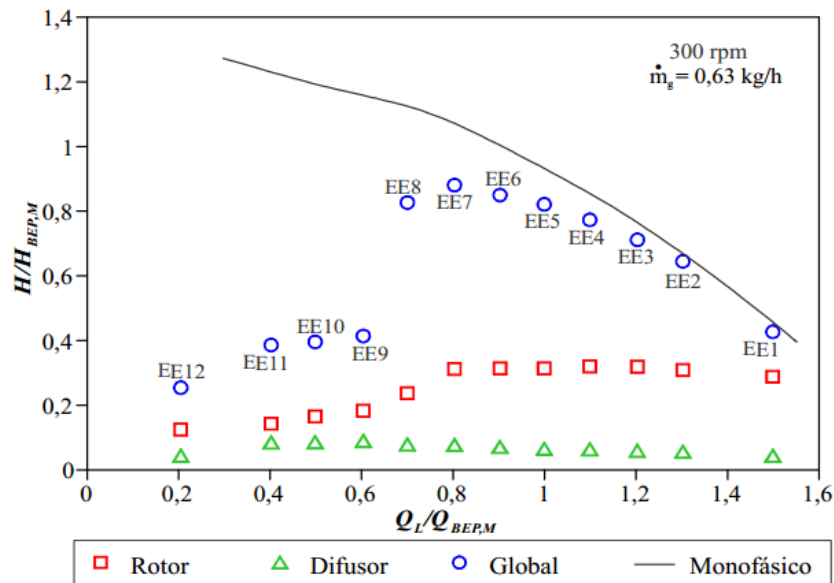


Figura 2.10 - Curvas de desempenho sob escoamento bifásico do rotor, do difusor e global da bomba. (Cubas (2017)).

Dentre todas as EE mostradas na Figura 2.10, três delas possuem destaque quanto a análise feita pelo autor, EE2, EE8, EE9 e EE12. O primeiro ponto citado, está relacionado a alta vazão. Nele, embora seja possível perceber uma aglomeração de bolhas na entrada do rotor, do lado de sucção da pá e coalescências isoladas nos canais do rotor, conforme a Figura 2.11, observa-se que a degradação de desempenho é praticamente desprezível se comparado com a operação sob escoamento monofásico.

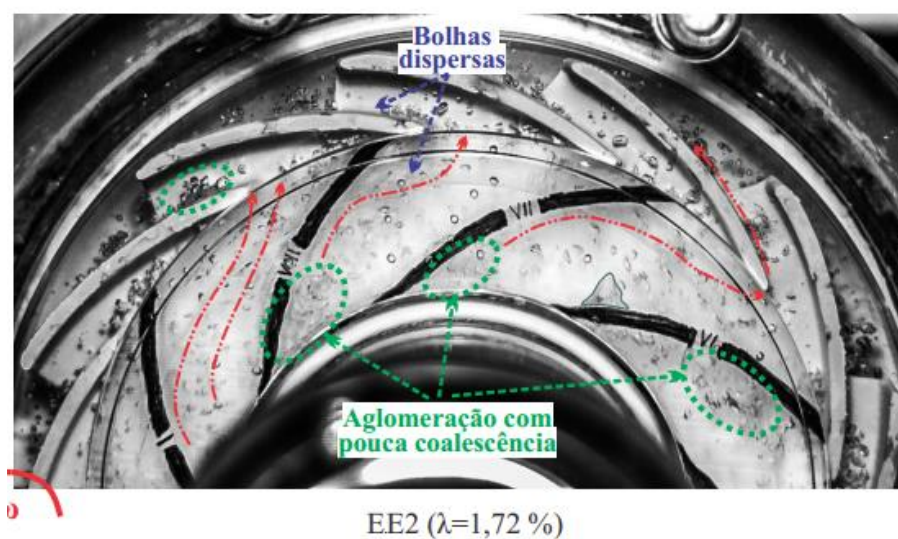


Figura 2.11 - Comportamento das fases dos canais do rotor no ponto EE2. (Cubas (2017))

Cubas (2017) percebeu que a partir da estrutura de escoamento de número 8 (EE8) tem-se uma visível degradação do desempenho da bomba, conforme mostra a Figura 2.12. É neste ponto que se dá o fenômeno de *surging*, que vem acompanhado de uma mudança de comportamento da curva de desempenho em comparação ao esperado para escoamento monofásico.

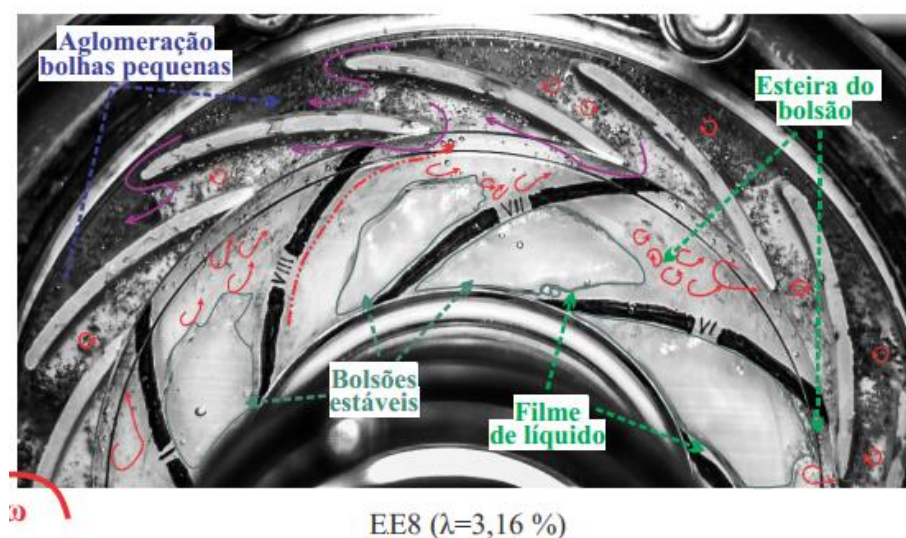


Figura 2.12 - Comportamento das fases dos canais do rotor no ponto EE8. (Cubas (2017)).

Neste momento, bolsões de ar ocupam grande parte dos canais do rotor, estando presentes desde a entrada até mais adiante da sua metade, o que resulta na restrição severa da passagem da fase líquida e a transferência de energia da bomba para o escoamento.

Na Figura 2.13, que mostra o ponto EE9, percebe-se uma continuidade dos acontecimentos de EE8, pois os bolsões de ar já se apresentam mais estáveis, ocupando quase que todo o espaço dos canais do rotor. Também é neste ponto que é constatada uma queda brusca no desempenho, onde segundo Cubas (2017) o ganho de pressão da bomba é de cerca de 35% do valor obtido para escoamento monofásico. Além disso, é visto que não há mais separação de fases nos canais do rotor, como ainda podia ser observado no ponto EE8.

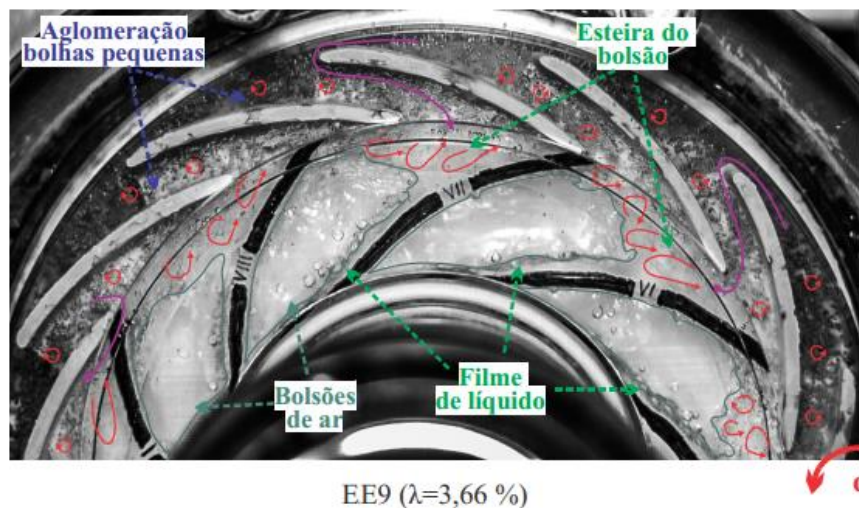


Figura 2.13 - Comportamento das fases dos canais do rotor no ponto EE8. (Cubas (2017)).

Por fim, conforme mostra a Figura 2.14, na última estrutura de escoamento analisada, EE12, é possível notar um grande bolsão em todos os canais do rotor e uma grande dispersão de bolhas nos canais do difusor que mantem-se praticamente paradas, tornando a circular nos canais do difusor. Foi observado que neste ponto, comparativamente com valores obtidos no escoamento monofásico, a degradação do desempenho da bomba foi de 80%.

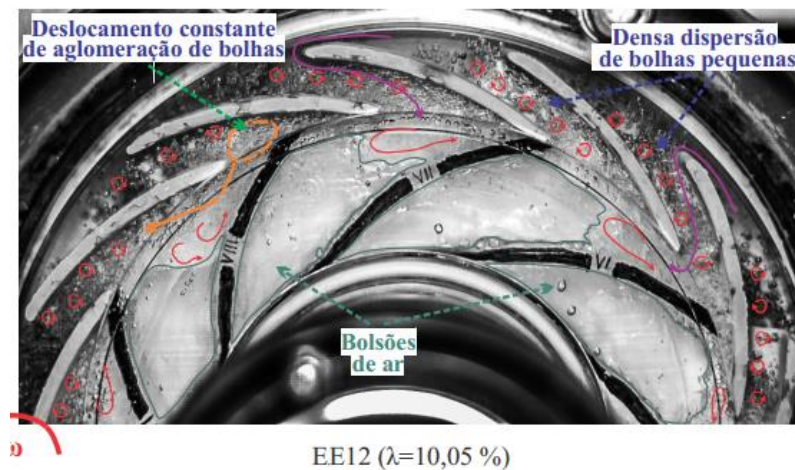


Figura 2.14 - Comportamento das fases nos canais do rotor no ponto EE12. (Cubas(2017)).

Por meio da análise dos pontos comentados do trabalho científico de Cubas (2017), pode-se concluir alguns importantes comportamentos acerca dos fenômenos vistos. Primeiramente, é possível observar que a dinâmica do fluido de escoamento está associada com a amplitude da degradação do desempenho da bomba. Outro fator que traz consigo importante valor conclusivo é que a dinâmica do gás nos canais hidráulicos do rotor irá determinar o nível de degradação do desempenho da BCS. Quando se tem altas vazões de líquido, geralmente se observa menor ocorrência de coalescência nos canais do rotor. Já vazões que se encontram próximas ou abaixo do ponto de *surging* facilitam a coalescência do gás, devido à dificuldade encontrada pelo gás de sair do rotor. Por último, quando se tem a elevação da velocidade de rotação, na maioria dos casos, facilita-se a saída de gás do rotor, uma vez que acontece quebra de bolhas em frações menores, como pode-se observar através da Figura 2.15.

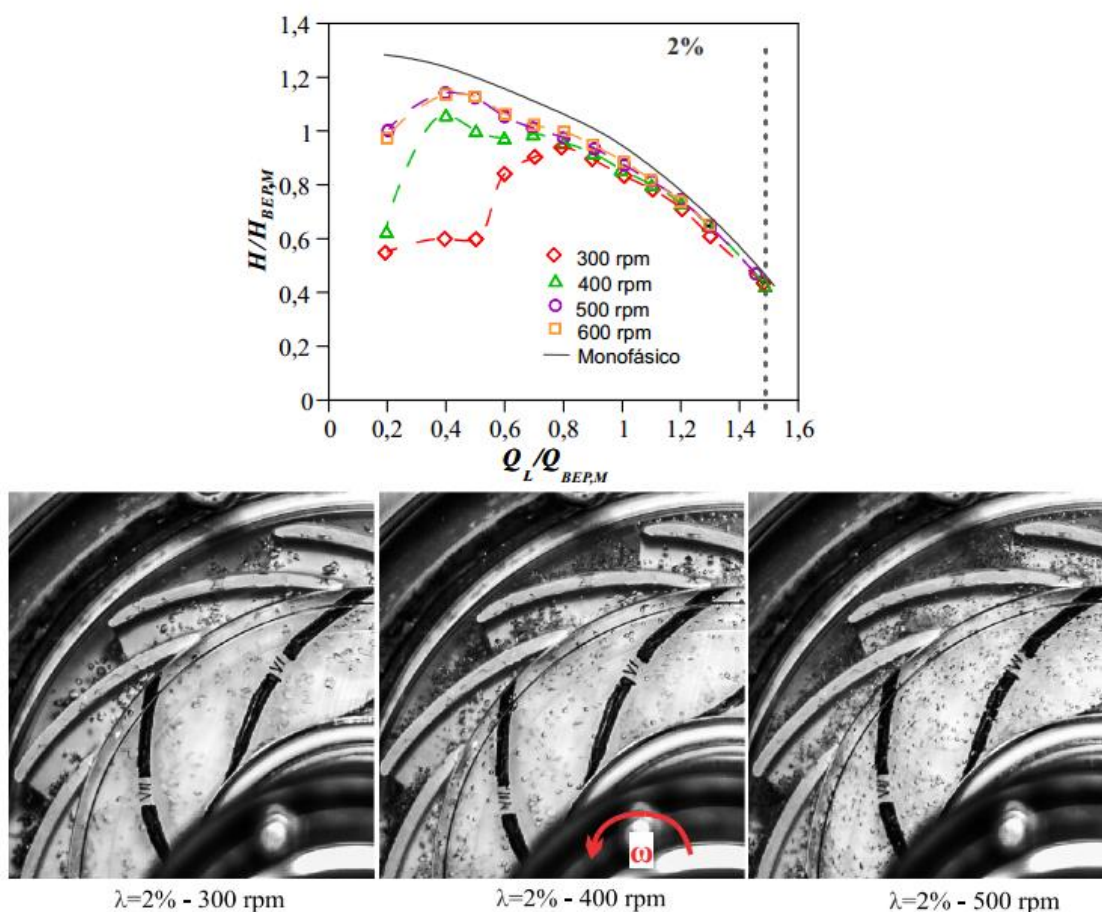


Figura 2.15 - Imagens do tamanho de bolhas, para a mesma vazão normalizada de líquido de 1,5, a mesma fração de vazio de 2% e com diferentes rotações. (Cubas(2017))

2.2 Comentários Gerais

Através dos estudos experimentais percorridos aqui, tornou-se possível compreender a tendência das principais linhas de pesquisa sobre o tema abordado. As análises sobre o fenômeno de escoamento bifásico em BCS, como por exemplo a ação do campo de líquido sobre as bolhas, as regiões de acúmulo de gás, o complicado movimento das bolhas no interior do rotor e a relação entre as imagens do escoamento com a medição da eficiência são de extrema relevância para entender como tais fatores estão atrelados à questões operacionais das bombas centrífugas, já que um amplo conhecimento sobre os fenômenos citados poderão ajudar na solução de problemas atuais e futuros.

A partir disso, conclui-se que trabalhos relacionando a visualização de padrões de escoamento com a medição do rendimento em um rotor radial plano para entender a degradação das bombas centrífugas são escassos. Por este motivo, entende-se que o presente trabalho irá contribuir com novas informações sobre este tema para velocidades de rotação entre 150 e 500 [rpm] com as frações de vazio variando entre 0 e 5% calculada através do modelo homogêneo.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentado informações sobre como será o andamento do trabalho experimental que será realizado com o apoio do Núcleo de escoamento Multifásico (NUEM) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Também é descrito a instrumentação e as etapas que serão seguidas para a execução do mesmo.

3.1.1 Circuito Experimental

Com o intuito de atingir os objetivos do trabalho, foi construída, nas dependências do laboratório NUEM (Núcleo de escoamento Multifásico), uma bancada experimental com o intuito de avaliar algumas propriedades e fenômenos físicos no rotor radial plano sob escoamento líquido-gás. A bancada experimental consiste em um circuito fechado e será dividida em três partes principais: armazenamento e linhas de alimentação (ar e água), a seção de testes e o sistema de aquisição de dados.

A Figura 3.1 mostra o esquema do circuito experimental desenvolvido para este trabalho. O início do sistema se dá no reservatório de água (1) de 300 litros com uma bomba *booster* (2) conectada a um inversor de frequência (3). Quando acionada, essa bomba eleva água para as tubulações (10), dando início assim à alimentação da linha de líquido. Através de um medidor de fluxo do tipo *Coriolis* (18), instalado a montante do início da seção de testes, é feita a medição da vazão de líquido, massa específica da água e sua temperatura. A partir do controle da frequência de trabalho dessa bomba, é possível assegurar pressões positivas na sucção da bomba teste, desde que as linhas de saída de fluido estejam configuradas de acordo com o objetivo. Por outro lado, a linha de gás, que é controlada por uma válvula (8) na saída do vaso de ar comprimido (7) onde a pressão é mantida em 2 bar, alimenta a seção de testes que têm uma válvula manual reguladora de vazão, e é mantida por um compressor de ar comprimido (6). A vazão mássica de ar é medida através do medidor de *Coriolis* específico para a linha de gás.

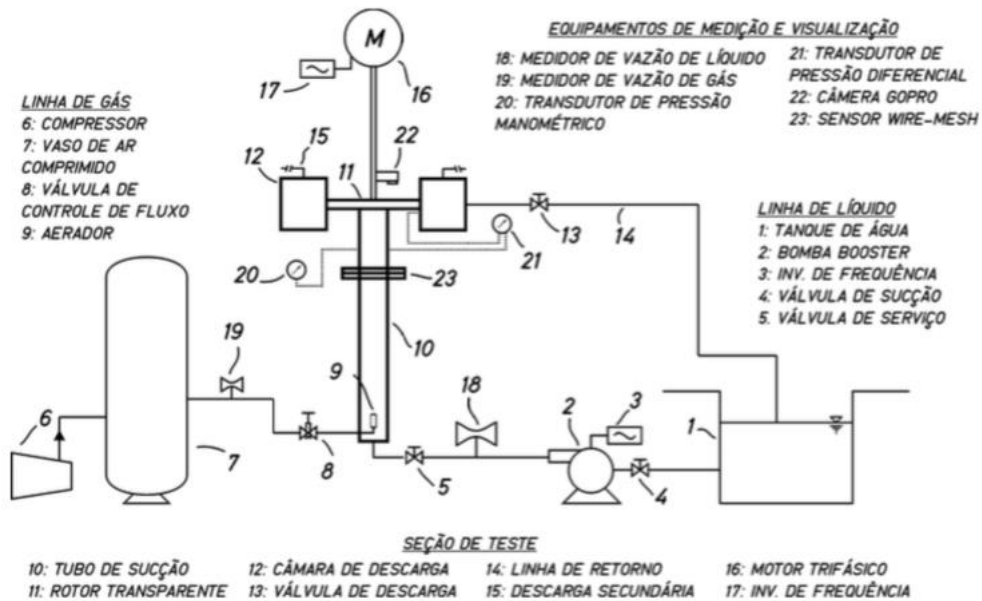


Figura 3.1 - Esquema do circuito experimental.

A seção de testes se inicia no tubo de desenvolvimento (10), que é projetado para desenvolver plenamente a mistura bifásica até o rotor (11). A entrada do tubo de desenvolvimento, que é de material transparente (acrílico) e tem um diâmetro interno (D) de 70,1 mm e um comprimento de 20D, para que a mistura tenha espaço suficiente para chegar ao rotor (11) plenamente desenvolvido, contém um arranjo de pedras porosas (9) responsável pela inserção do ar no circuito. Essa configuração se comportou de maneira satisfatória para as vazões de líquido e gás utilizadas nesse trabalho, gerando um escoamento bifásico de bolhas dispersas a montante da bomba teste.

Através, de um inversor de frequência (17) dedicado a um motor de 3 HP (16) e duas válvulas manuais (13), uma do tipo globo e outra do tipo esfera, responsáveis por auxiliar o controle de vazão e regular a pressão de trabalho, a bomba teste é operada para avaliá-la em condições de operação sob escoamento bifásico.

Após a mistura bifásica passar pela seção de testes, a mistura bifásica retorna ao reservatório de início (1) através de mangueiras (14) que saem tanto da parte superior da câmara - onde é feita a separação das fases líquido-gás - quanto da parte lateral que sai mangueiras que convergem para um coletor para diminuir a perda de carga na saída da câmara, conforme Figura 3.2. Com o intuito de evitar o

retorno das bolhas ao circuito pela linha de líquido, são utilizados dois reservatórios bem abaixo do nível do rotor, um reservatório menor com um furo na parte inferior e parcialmente submerso no reservatório maior, para evitar formação de bolhas nos reservatórios e separar as fases, evitando com que ar seja admitido pela bomba *booster*.

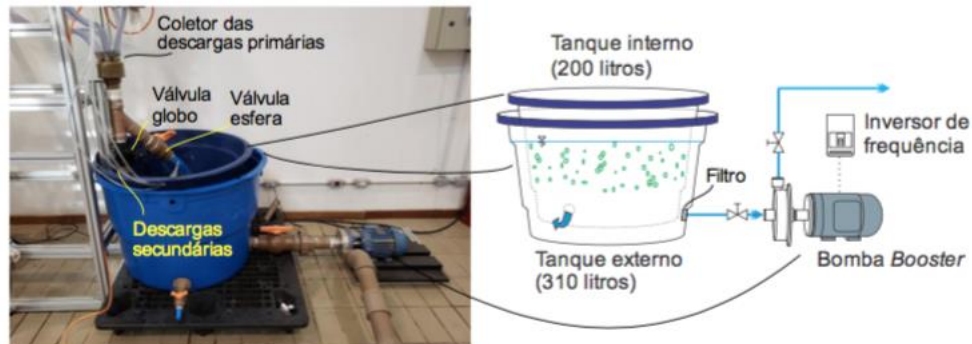


Figura 3.2 - Imagem e montagem do tanque de líquido e bomba *booster*.

3.1.2 Seção de testes

Nesta etapa será apresentada a seção de testes que é composta pelo tubo de desenvolvimento, a pedra porosa de injeção de gás acoplada a uma válvula agulha, o rotor radial plano acoplado por um eixo ao seu motor e inversor de frequência, duas válvulas de descarga sendo uma do tipo globo e outra do tipo esfera e dois transdutores de pressão sendo um deles de pressão manométrica e o outro de pressão diferencial, sendo um deles responsável por medir a pressão de entrada do rotor (20) e outro pela diferença de pressão (21) gerada no interior do rotor radial plano. A seção de testes em questão foi projetada e desenvolvida para estudos em um rotor radial plano, para se observar os seguintes aspectos: a visualização do escoamento no interior do rotor radial plano e avaliação do desempenho da bomba centrífuga sob escoamento bifásico água-ar.

Na Figura 3.3, é mostrada uma imagem da seção de testes finalizada com todos os equipamentos. Podemos observar que o tubo de desenvolvimento, feito em acrílico de diâmetro interno (D) de 70,1 mm e comprimento de $20D$, se mostrou

suficiente para se ter um escoamento totalmente desenvolvido à montante do rotor radial plano, ou seja, após a injeção de gás a partir da pedra porosa, conforme proposto por Cubas (2017). Outra vantagem dessa instalação é a facilidade em se visualizar o escoamento antes de entrar no rotor, já que o tubo está fixado na sucção do rotor.



Figura 3.3 - Bancada experimental finalizada com todos os equipamentos.

A geometria da bomba teste, que é do tipo radial e composta por apenas um estágio, foi desenvolvida para o presente trabalho através do *software Ansys BladeGen* (ANSYS, 2015), programa utilizado para desenvolvimento de geometrias especificamente para turbo-máquinas. A principal característica especificada no início do projeto foi manter uma ampla área de visualização no canal do rotor e evitar o retorno de bolhas para o rotor. Para a primeira característica foram desenvolvidas pás retas na direção axial. Para a segunda característica foram feitas simulações no *software CFX* (ANSYS, 2015) para se obter uma câmara que evitasse a recirculação das bolhas de sua periferia para dentro do rotor.

Na Figura 3.4, é apresentada uma imagem do rotor radial, juntamente com um corte longitudinal para ilustração de suas partes que é composta por cubo, coroa, câmara de descarga e as tomadas de pressão.

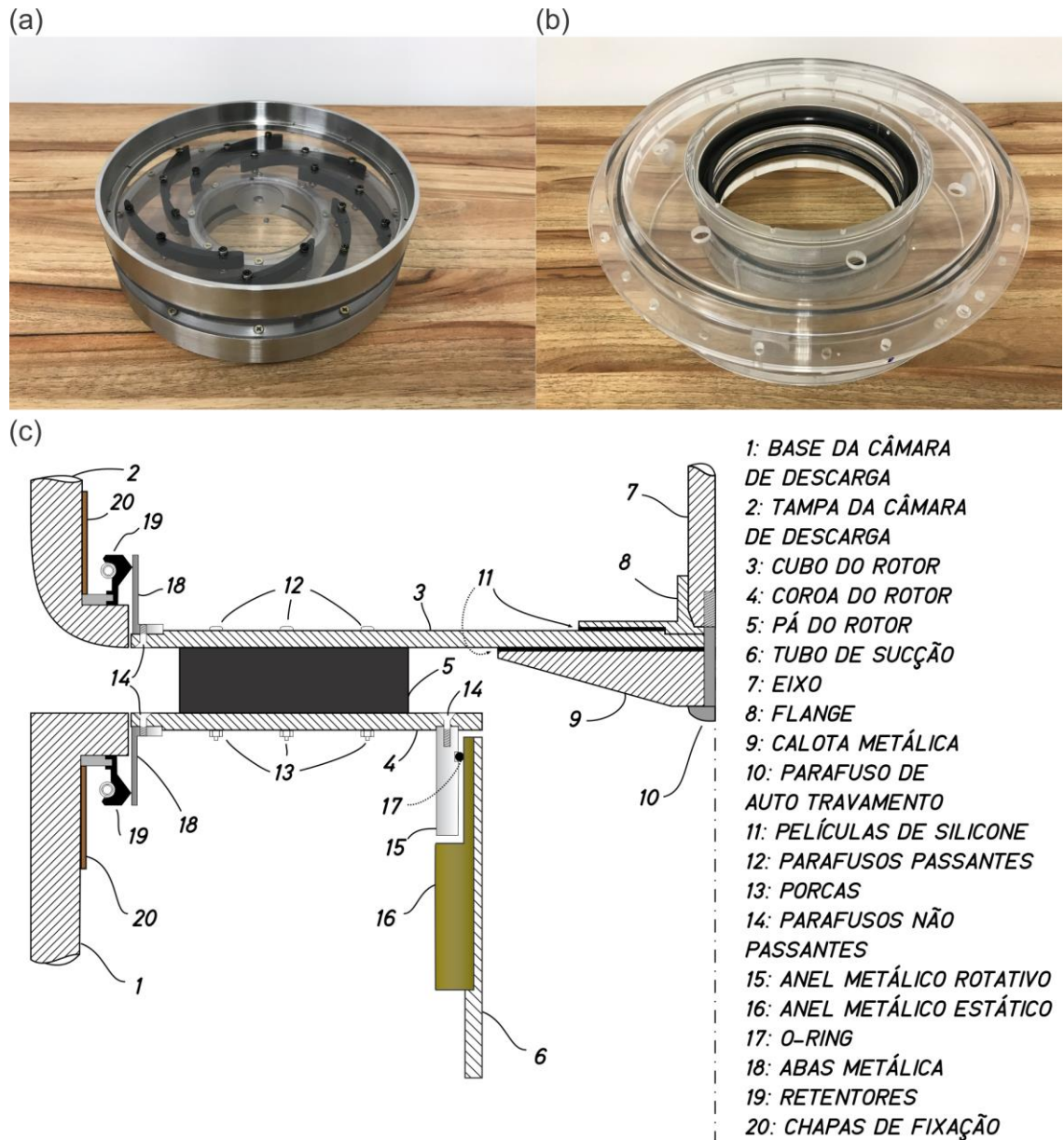


Figura 3.4 - (a) Rotor; (b) Câmara de descarga; (c) Montagem;

Como o intuito principal do projeto é de visualizar a distribuição das fases no rotor radial, sua carcaça – cubo (3) e coroa (4) - foram fabricadas de policarbonato transparente de 3 mm. As pás do rotor (5) foram usinadas em aço inoxidável através do levantamento da geometria original em CAD, onde foi obtido uma nuvem de pontos de forma a se fabricar, através de usinagem CNC, uma geometria fiel ao rotor desenvolvido no *software* mencionado anteriormente. Posteriormente, as pás foram pintadas em preto, de forma a aumentar o contraste das imagens com escoamento

bifásico água-ar no interior do rotor radial. As pás foram fixadas por parafusos passantes, de modo a manter o conjunto bem centralizado e distanciado.

A carcaça da câmara (1) foi confeccionada em acrílico com uma curvatura de saída na parte superior de modo a se evitar a recirculação das bolhas para dentro do rotor. Na carcaça da câmara também é instalado um retentor para funcionar como uma vedação dinâmica do rotor, atritando contra abas metálicas em formato de “L” parafusadas na periferia do rotor (18), conforme Figura 3.4, entretanto não foi objeto de estudo no presente trabalho.

Com a necessidade de se medir o ganho de pressão no rotor, objetivo do presente trabalho, foram feitos dois furos para as tomadas de pressão. Conforme Figura 3.5, os furos se encontram na carcaça do difusor onde se configura a saída do rotor e no tubo de desenvolvimento próximo a junção entre o tubo e o rotor. Um dos medidores é utilizado para se medir a pressão de sucção na entrada da bomba teste e o outro utilizado para se medir o diferencial de pressão que se encontra no rotor da bomba teste.

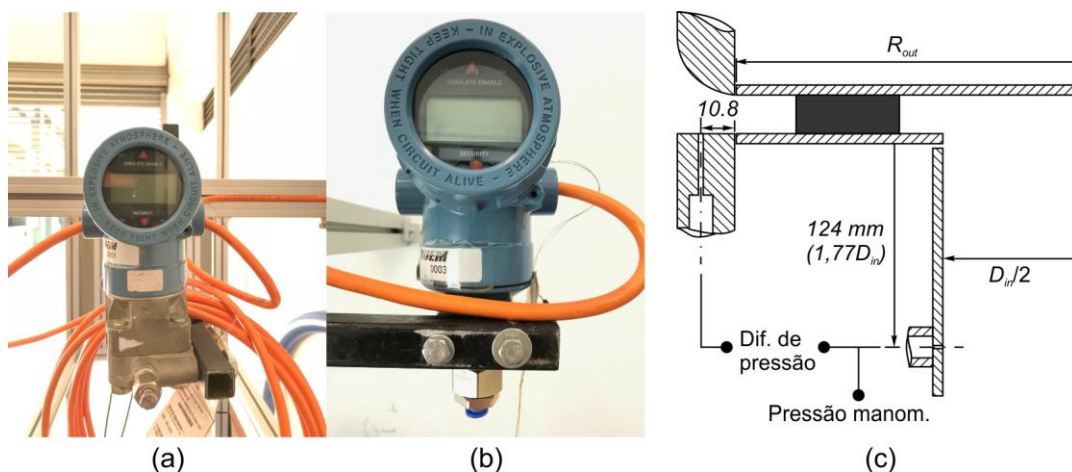


Figura 3.5 - (a) Medidor de pressão no rotor; (b) Medidor de pressão de sucção; (c) Esquema das tomadas de pressão;

3.1.3 Linha de injeção de ar

A partir de um tanque de ar comprimido instalado na parte externa do laboratório NUEM, que é alimentado por um compressor, ar é inserido na seção de testes através de um arranjo de pedras porosas, já mencionado anteriormente. Na Figura 3.6a, é possível observar o arranjo de pedras porosas instalado no tubo de desenvolvimento. Esse arranjo cria um padrão de bolhas dispersas de gás no meio líquido, como mostra na Figura 3.6b, isso acaba gerando um padrão de escoamento progressivo no tubo de desenvolvimento até o rotor radial plano, conforme mostrado na Figura 3.6c.

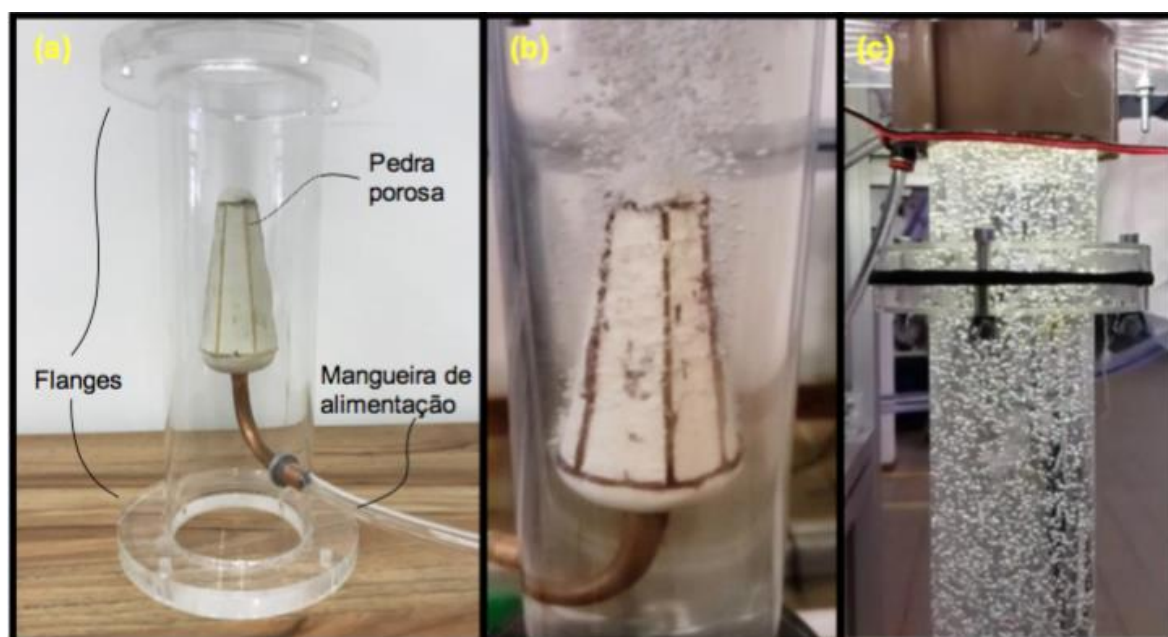


Figura 3.6 - (a) Arranjo de pedras porosas; (b) Padrão de bolhas dispersas; (c) Escoamento com líquido e gás na entrada do rotor.

A vazão volumétrica de ar é medida por meio de um medidor de *Coriolis*. Esse medidor é instalado à montante da válvula que controla o escoamento de ar no sistema, e é da marca Yokogawa e tem limites de operação entre 0,05 e 100kg/h.

3.1.4 Visualização do escoamento bifásico no rotor

O objetivo principal do projeto foi o de observar e capturar imagens do escoamento bifásico nos canais do rotor radial plano. Para isso, uma câmera com alta resolução foi utilizada. A câmera, da marca *GoPro* e modelo *Hero 5*, que é capaz de fornecer vídeos em 4K em até 30 fps (*frames per second – fps*), com uma resolução máxima de 12 *Megapixels*, também conta com uma função de estabilização de vídeo que diminui consideravelmente a vibração e uma memória interna expansível de acordo com a necessidade. A câmera conta com um *software* próprio e outro instalado em computador dedicado, sendo controlada remotamente por conexão sem fio.

Com o intuito de diminuir o efeito da estabilização das imagens e vídeos, a câmera foi acoplada ao eixo de forma que acompanha a movimentação do rotor, na parte superior conforme a Figura 3.7. A distância entre a janela de visualização e a lente da câmera e a resolução da câmera foram escolhidas de acordo com a observação da nitidez das bolhas no canal do rotor. Dessa forma, a distância ficou em 30 cm e a captura de imagens foi feita com uma resolução de 4000 x 3000 *pixels*.

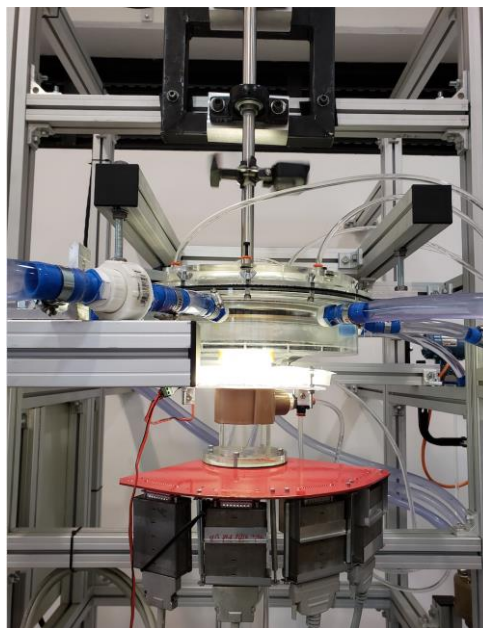


Figura 3.7 - Montagem do sistema de visualização da bancada experimental.

Foram usados, ainda, outros dois aparatos para auxiliar as imagens capturadas. Um deles consiste na utilização de um conjunto de lâmpadas de LED de 12 W de potência. Na Figura 3.8 é possível observar a disposição das lâmpadas, que são usadas para retro iluminação do rotor. Outro aparato consiste em folhas de papel seda para dispersão dos focos luminosos, pensado para distribuir a luz de forma homogênea e melhorar a nitidez das bolhas na captura das imagens.



Figura 3.8 - Aparato de iluminação.

A captura das imagens foi realizada durante o levantamento das curvas para as diferentes rotações. Em cada teste, eram capturadas imagens a cada 2 s (tempo esse necessário para armazenamento na memória entre cada captura), e no fim do teste era realizada a captura de um vídeo de aproximadamente 10 s.

As imagens capturadas pela câmera *GoPro* passaram por um procedimento de pós-processamento para se eliminar possíveis pontos de sombra, reflexo, falta de sincronismo das luzes, além de se otimizar a nitidez das imagens. Todos esse procedimento de processamento das imagens foi auxiliado pelo programa de imagens *Fotor*.

3.1.5 Sistema de aquisição e supervisão de dados.

Através de uma rotina criada no programa *LabVIEW* foi possível monitorar em tempo real as variáveis medidas no circuito experimental, e ainda salvar os dados em arquivo *Excel* para posterior tratamento. Já os dados das imagens obtidas, conforme comentado no item anterior, foram coletados e gerenciados por programas dos próprios equipamentos.

Todos os dados coletados no circuito experimental foram feitos através de uma rede de comunicação com protocolo *Fieldbus Foundation*, também foi utilizada uma placa de aquisição do tipo PCI, da marca *National Instruments*. Através da rede *Fieldbus* é possível conectar os medidores de vazão, pressão, temperatura e todos os outros medidores, convertendo os sinais analógicos dos medidores em sinais digitais para serem gerenciados pelo *software LabView*. Apenas a rotação do eixo foi medida manualmente através de um tacômetro digital.

Na Tabela 3.1, abaixo são apresentados as variáveis que foram medidas e monitoradas durante os testes realizados.

Tabela 3.1 - Parâmetros operacionais monitorados.

<i>Variável</i>	<i>Definição</i>	<i>Unidade</i>
P_{suc}	Pressão manométrica na sucção da bomba	Pa
Δp_{rotor}	Pressão diferencial no rotor da bomba	Pa
Q	Vazão de água	m ³ /h
λ	Fração de vazão homogênea	----

3.2 Procedimento de Teste

O procedimento que será exposto serviu tanto para escoamento monofásico como também para escoamento bifásico, com pequenas diferenças que serão apresentadas abaixo.

O objetivo principal do procedimento é o levantamento de curvas de ganho de pressão em função da vazão de líquido, onde são tomados 12 pontos de medida por curva, para isso é preciso medir algumas variáveis, utilizando diferentes técnicas. Os testes são realizados para diferentes velocidades de rotação e vazões mássicas de gás, mantendo-as constantes durante cada ponto medido da curva.

Abaixo, é apresentada a descrição geral dos procedimentos realizados durante os testes.

- i. Inicia-se ligando os medidores *Coriolis* de gás e líquido, e os sensores de pressão e temperatura. É também ligado o computador para controle via *LabView*. Em seguida, o sistema de aquisição de dados também é ligado.
- ii. São abertas todas as válvulas da linha de líquido para verificação da utilização adequada dos sensores e de forma a manter uma baixa pressão na sucção da bomba e no rotor.
- iii. Liga-se a bomba *booster* e ajusta-se a sua frequência fazendo com que circule apenas água pelo circuito, e é realizada a purga dos medidores de pressão.
- iv. Aciona-se o motor da seção de teste, através do inversor de frequência, ajustando a velocidade de rotação de acordo com o teste realizado. A mesma é medida através de um tacômetro óptico.
- v. Ajusta-se a frequência da bomba *booster* e das válvulas globo e esfera na saída da seção de testes, de forma a aproximar da pressão de sucção e da vazão do líquido especificados para o ponto em que se está medindo.
- vi. Aciona-se a linha de gás e utiliza-se de uma válvula do tipo agulha para regular a fração homogênea de gás desejada.

- vii. Algumas variações podem ocorrer na vazão e pressão com a injeção de gás no escoamento, dessa forma são ajustados novamente os parâmetros. Mantendo-se todas as variáveis citadas acima constantes, esperam-se alguns minutos para a estabilização do escoamento bifásico.
- viii. A aquisição dos dados de pressão na sucção da bomba teste, diferencial de pressão através do rotor, vazões de líquido e gás dos medidores de *Coriolis*, temperatura e massa específica é feita durante 60 segundos para escoamentos estáveis e de 120 segundos para escoamentos instáveis, utilizando o programa desenvolvido em *LabView*. Concomitantemente, utilizando outro programa conectado via *Wi-fi* com a *GoPro*, são tomadas algumas fotografias e no final da aquisição dos dados é tomado um vídeo em 240 quadros por segundo por 10 segundos.
- ix. Para a tomada dos novos pontos, retorna-se aos passos de iv a viii, até a finalização dos 12 pontos, em alguns casos não é possível obter os 12 pontos para levantamento da curva.
- x. Para a condição de escoamento monofásico se segue os mesmos procedimentos omitindo-se o passo vi e a gravação de imagens do passo viii.
- xi. O procedimento é realizado para todas as curvas que se deseja obter, através da grade de testes.

Após a aquisição dos dados, os mesmos são processados e são utilizadas as medidas de vazão de líquido e diferencial de pressão no rotor para o levantamento das curvas de desempenho. As imagens capturadas também são tratadas para o procedimento de visualização.

A grade de testes apresentada na Tabela 3.2 para os testes experimentais realizados nesse trabalho foram determinadas com base no funcionamento do circuito experimental quando realizado testes com escoamento monofásico, o que permitiu contornar alguns limites operacionais com que a bancada operava. Como por exemplo, o limite máximo de 500 rpm estabelecido para velocidade de rotação,

em função da limitação de suprimento da bomba *booster* e a limitação de vedação dos retentores utilizados na carcaça do difusor.

Tabela 3.2 - Grade de testes experimentais.

Rotação λ	150 [rpm]	200 [rpm]	300 [rpm]	400 [rpm]	500 [rpm]
0%	□	□	□	□	□
2%	□	□	□	□	□
3%	□	□	□	□	□
5%	□	□	□	□	-----

Essa faixa de rotações utilizada nesse trabalho se assemelha muito à utilizada em Cubas (2017) para uma bomba industrial. Para as faixas de frações homogêneas de gás os valores obtidos foram calculados com base no modelo homogêneo (não deslizamento) em função das vazões volumétricas de líquido e gás nas mesmas condições do escoamento na sucção do rotor, conforme equação a seguir.

$$\lambda = Q_G / (Q_L + Q_G)$$

Algumas medições para as vazões mássicas de gás não foram obtidas pela limitação do medidor de *Coriolis* para a vazão de gás, impossibilitando a captura dos 12 pontos para levantamento da curva conforme exposto acima.

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com os dados adquiridos durante os experimentos com a bomba teste. Primeiramente, serão apresentados alguns dados mostrando a capacidade da bancada experimental de ser utilizada repetitivamente com a réplica dos resultados obtidos.

Posteriormente, é apresentada uma breve discussão sobre o escoamento monofásico para ilustrar o cumprimento das leis de similaridade em bombas.

Por fim, serão apresentadas e analisadas as imagens de visualização do escoamento bifásico na bomba teste. Será feita uma análise visual para uma dada velocidade rotação como forma de elucidar o efeito das diferentes frações de vazio no escoamento. Em seguida, é analisada a influência da velocidade de rotação e fração de vazio no desempenho da bomba teste.

4.1 Resultados de repetitividade

Nesta seção, é apresentada a capacidade de se repetir os resultados com a bancada experimental sob as mesmas condições de operação. A Figura 4.1 mostra, o levantamento de duas curvas tomadas em diferentes dias. No exemplo da figura estão expostas as curvas de ganho de pressão normalizadas para 400 rpm e 3% de fração de vazio constante. É possível observar que as curvas seguem uma tendência em se colapsar em uma única, mostrando uma constância dentro das incertezas de medição nos resultados obtidos entre todos os pontos levantados.

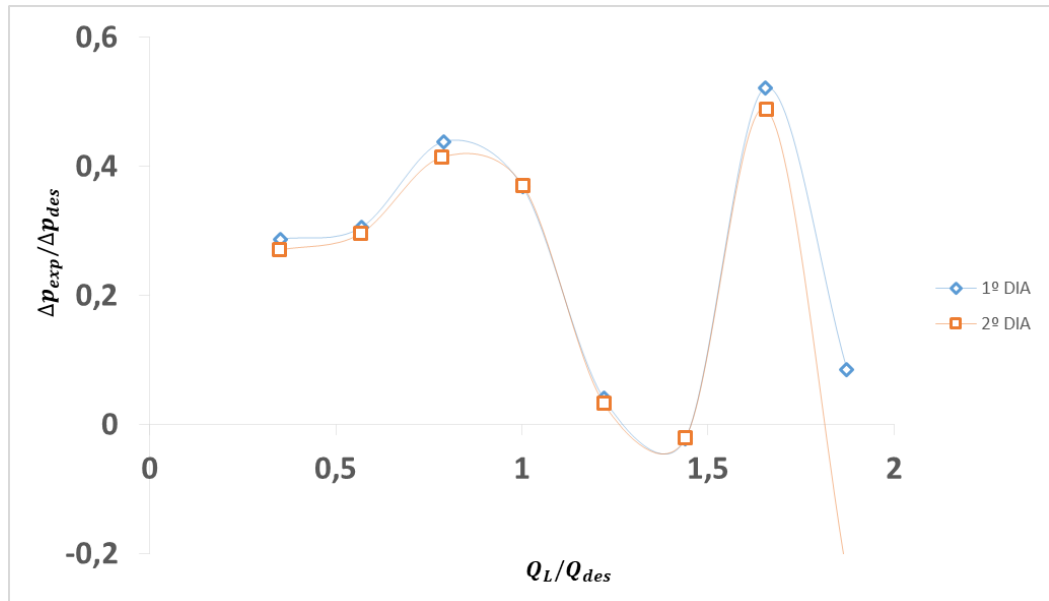


Figura 4.1 - Resultados da análise de repetitividade para uma velocidade de 400 [rpm] e fração de vazio de 3% para diferentes dias.

4.2 Resultados dos testes com escoamento monofásico

O objetivo principal das curvas para escoamento monofásico é caracterizar a curva de altura de elevação do rotor de teste, verificar o cumprimento das leis de similaridade para verificar para quais velocidades de rotação os resultados serão hidraulicamente similares e servir de base para o estudo do comportamento do escoamento bifásico, assunto da próxima sessão.

É assumido como referência para os próximos resultados a vazão de projeto do rotor no ponto de design, Q_{des} , onde é gerado um escoamento de líquido perfeitamente alinhado com o bordo de ataque das pás. Nessas condições podemos utilizar a seguinte relação trigonométrica para a vazão Q_{des} :

$$Q_{des} = \frac{(\pi R_1)^2}{15} \cdot b \cdot n \cdot tg(\beta_1)$$

onde n é a velocidade de rotação em rpm, R_1 é o raio de ataque que é igual a $R_1 = 45,05$ mm, b a altura do canal igual a $b = 10$ mm e finalmente β_1 que é o ângulo de

ataque, $\beta_1 = 21,5$ graus. Lembrando que esse ponto, conhecido como *ponto de design*, não deve coincidir com o ponto de máxima eficiência em operações reais, *BEP (Best Efficiency Point)*.

Na Figura 4.2 serão apresentadas as curvas de ganho de pressão em função da vazão de líquido obtidas para cinco velocidades de rotação entre 150 e 500 rpm sob escoamento monofásico. Os resultados obtidos foram reduzidos para valores adimensionais se normalizando os valores das vazões de líquido pela vazão de líquido no ponto de *design* à rotação de trabalho, ou seja, $1,0Q_{des}$, onde Q_{des} é calculado conforme acima. Já os valores de ganho de pressão obtidos experimentalmente são normalizados por Δp_{des} , que corresponde ao ganho de pressão no ponto de *design* medido para escoamento monofásico.

É possível observar que os resultados convergem para uma única curva para diferentes velocidades de rotação. Com isso podemos sugerir que há similaridade hidrodinâmica para o escoamento monofásico na faixa de velocidades de rotação testadas no presente trabalho.

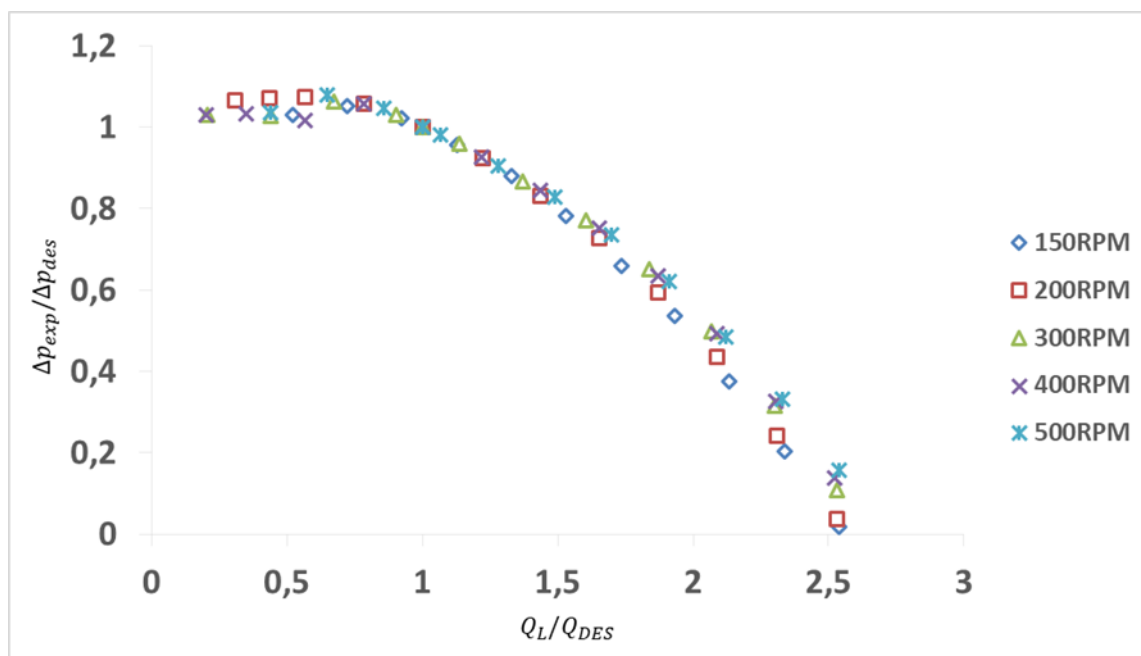


Figura 4.2 - Curvas normalizadas de escoamento monofásico de velocidades de rotação entre 150 e 500 rpm.

4.3 Resultados dos testes com escoamento bifásico

Nesta seção serão apresentados os resultados dos experimentos com a bomba teste sob escoamento bifásico líquido - gás. O objetivo principal do estudo é uma melhor compreensão da degradação do desempenho bifásico da bomba teste. Para isso será feita uma análise visual da distribuição das fases para identificar diferentes padrões de escoamento e do comportamento das bolhas dentro do rotor. Para isso foi utilizada a metodologia de se manter a fração de vazão de gás constante e calculada pelo modelo homogêneo, conforme citado na seção 3.2.

Todos os dados experimentais obtidos foram adimensionalizados, sendo que os ganhos de pressão e a vazão de líquido são normalizados pelos seus equivalentes no ponto de design conforme mencionado anteriormente. Ademais, a fração de vazão tomada que foi utilizada nesse tópico, conforme já mencionado anteriormente, foi obtida seguindo o modelo homogêneo (sem deslizamento).

4.3.1 Influencia da fração de vazão no desempenho do rotor

Algumas das nomenclaturas que serão utilizadas a partir dessa seção são relacionadas com as características geométricas do rotor, Figura 4.3, onde é possível observar as faces de pressão (cor vermelha) e sucção (cor verde) das pás do rotor e também a entrada do canal do rotor (cor azul) e a entrada para a câmara do difusor (cor roxa). Outra informação importante é o sentido de giro que está informado na imagem.

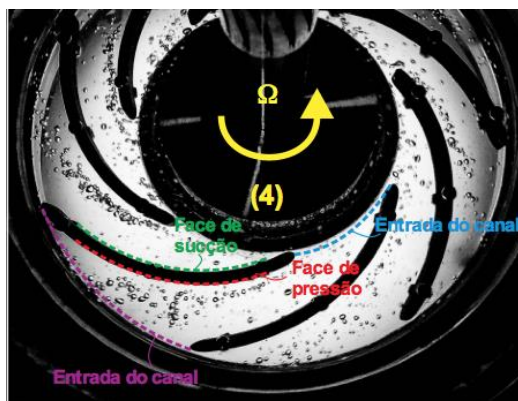


Figura 4.3 - Nomenclatura utilizada no rotor radial plano.

Nesta seção é feita uma análise da bomba teste utilizando a metodologia de fração de vazio constante. O principal objetivo é visualizar a distribuição de fases no rotor para identificar padrões de escoamento e verificar como esse padrão afeta o desempenho da bomba teste sob escoamento bifásico.

A Figura 4.4 apresenta curvas de ganho de pressão em função da vazão de líquido, assumindo-se escoamento monofásico e uma curva de escoamento bifásico levantada para uma fração de vazio de 3% e velocidade de rotação de 300 rpm. Os valores de vazões de líquido e ganho de pressão são normalizados pelo ponto de *design*.

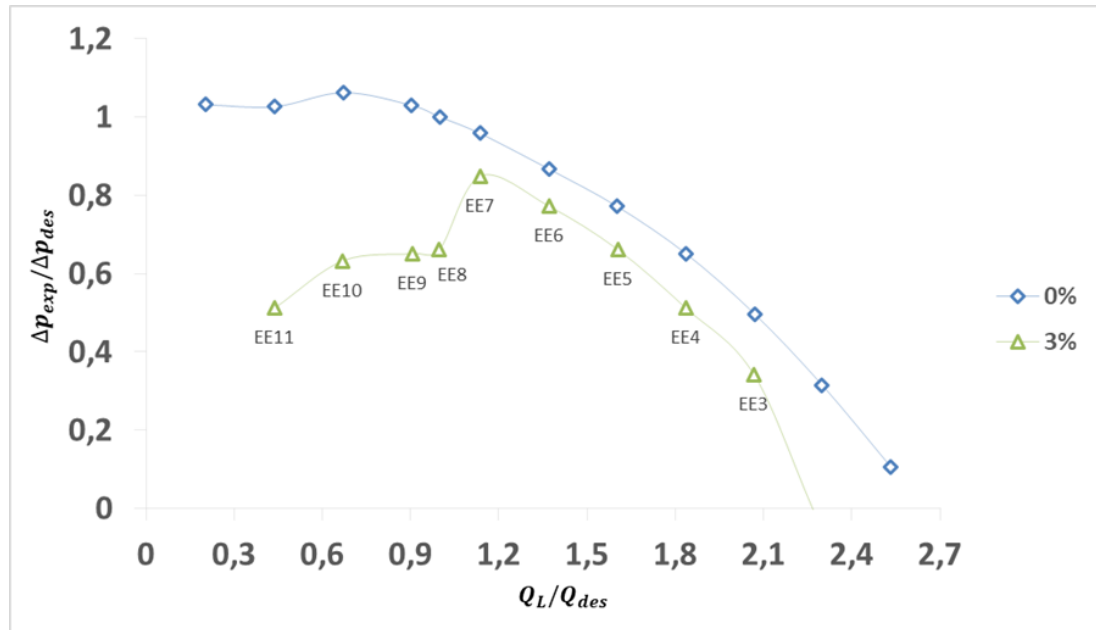


Figura 4.4 - Gráfico do escoamento monofásico e bifásico para uma fração de vazio de 3% e velocidade de rotação de 300 rpm.

Os pontos que serão analisados são do ponto EE3 até EE11 pois os pontos EE1 e EE2 apresentam degradação e tiveram ganhos de pressão negativo, o que não iremos levar em consideração pois não é objeto de estudo do presente trabalho. Para o ponto EE12, tivemos uma limitação para o medidor *Coriolis* de gás, dessa forma não foi possível levantar o ponto em questão.

É observado na curva acima que do ponto EE3 ao ponto EE7 o desempenho do rotor é próximo ao escoamento monofásico, porém é possível observar que há uma leve queda de pressão em função da presença de gás no rotor. A partir do ponto EE7, o que corresponde ao valor máximo de ganho de pressão para a fração de vazio de 3%, a queda de ganho de pressão começa a ser mais perceptível com relação ao escoamento monofásico, e a partir desse ponto se dá o início da condição de *surging*. O desempenho segue sendo degradado até o ponto EE11, onde o ganho de pressão comparado ao escoamento monofásico cai a 50% do mesmo.

Para auxiliar na compreensão do comportamento do escoamento bifásico observado na curva de ganho de pressão, a Figura 4.5 apresenta algumas estruturas de escoamento (EE) obtidas para alguns pontos selecionados, conforme indicados na Figura 4.4.

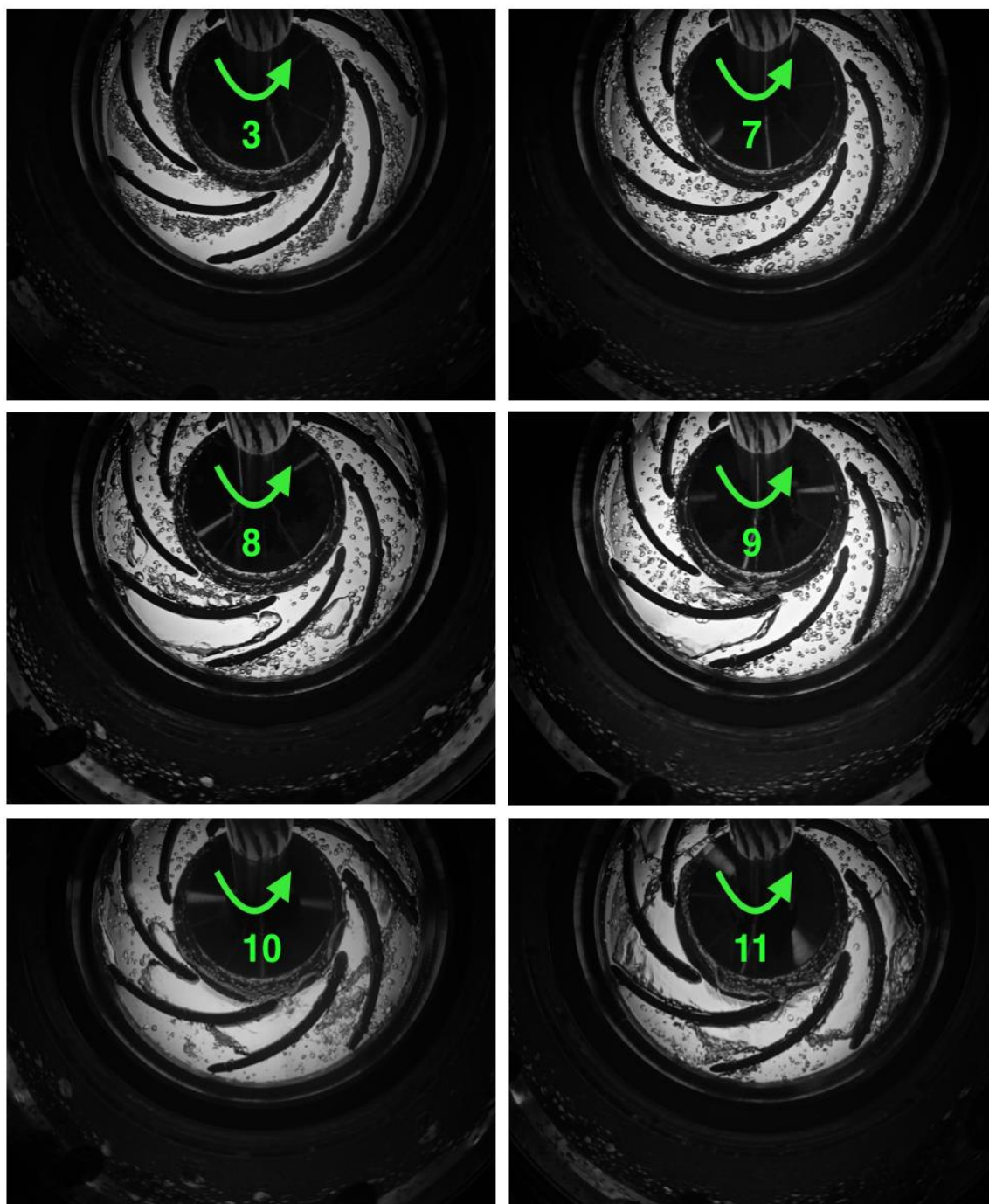


Figura 4.5 – Estruturas de escoamento obtidas para uma fração de vazio de 3%.

No ponto (3), verifica-se que o padrão de escoamento é de pequenas bolhas dispersas na iminência de coalescer, tendendo a escoar pela face de pressão do rotor. Do ponto (3) ao ponto (6) há pouca mudança no padrão de escoamento, sendo que apenas algumas bolhas migram para outras regiões mas seguem a tendência de escoar próxima a face de pressão do canal. O ponto (7) marca o início

da condição de *surging* no gráfico, entretanto sem uma queda abrupta do ganho de pressão, o escoamento ainda se mantém de bolhas dispersas embora já começa a ficar perceptível algumas aglomerações de bolhas próxima a face de pressão e na saída da pá. Até esse ponto, a degradação de desempenho se manteve constante comparado com a curva de escoamento monofásico.

No ponto (8) e (9), por estarem muito próximos, se observa um padrão de escoamento similar com uma queda abrupta no ganho de pressão e o surgimento de bolsões de gás em alguns canais do rotor com um filme líquido restrito junto às faces das pás e em outros escoamento de bolhas dispersas. Esses dois pontos são bastante instáveis, sendo caracterizado pela constante formação e quebra dos bolsões de gás. A partir do ponto (10), é possível observar a formação de bolsões de gás concomitantemente em mais de um canal do rotor. É possível observar também que os bolsões de gás se iniciam pela face de sucção do rotor e ao coalescerem praticamente inibem a passagem de líquido pelo canal. Finalmente, no ponto (11) os bolsões de gás iniciados no ponto (10) coalescem ainda mais nos canais do rotor fazendo com que praticamente todos os canais possuam bolsões de gás, o que explica a queda de aproximadamente 50% no ganho de pressão comparado ao escoamento monofásico.

A Figura 4.6 apresenta as curvas normalizadas pelo ponto de *design* do desempenho da bomba teste medidas experimentalmente sob escoamento monofásico e bifásico para diferentes frações de vazão (modelo homogêneo, λ). As curvas para 5 velocidades de rotação entre 150 e 500 rpm com pressão de sucção entre 500 e 3000 Pa são levantadas para escoamento monofásico - que é utilizado como referência - 2%, 3% e 5% da fração de vazão, lembrando que a fração de vazão homogênea (sem deslizamento) é calculada conforme $\lambda = Q_G / (Q_L + Q_G)$. Observa-se nos gráficos que as curvas de escoamento bifásico se desviam constantemente das curvas de escoamento monofásico, conforme se diminui a vazão de líquido, ou seja, o gradiente de pressão acaba gerando uma força resultante maior sobre as bolhas no sentido de entrada do rotor se sobrepondo à força de arrasto que age no sentido de empurrar a bolha para fora do rotor, conforme Cubas (2017). Com isso a tendência é que as bolhas se acumulem,

diminuindo a passagem de líquido no rotor e prejudicando o desempenho do mesmo em elevar pressão.

Outro ponto que é observado, é que o aumento da fração de vazio faz a curva de escoamento bifásico se distanciar ainda mais da de escoamento monofásico. Como o aumento da fração de vazios acaba produzindo mais bolhas no rotor, essa maior quantidade de bolhas faz com que aumente a interação e a coalescência entre as bolhas. Com esse fenômeno, há uma maior tendência de formar bolhas maiores no rotor, e de que essas bolhas maiores fiquem estagnadas nos canais do rotor e coalesçam com outras bolhas, dificultando dessa forma o escoamento da fase líquida e gerando uma queda abrupta do desempenho da bomba em uma dada vazão de líquido. Nesse ponto tem-se o início da condição de *surging* conforme Lea e Bearden (1982). Outra observação também é que o ponto de *surging* mostra-se diferente para as diferentes velocidades de rotação e vazões normalizadas de líquido, dependendo da fração de vazio.

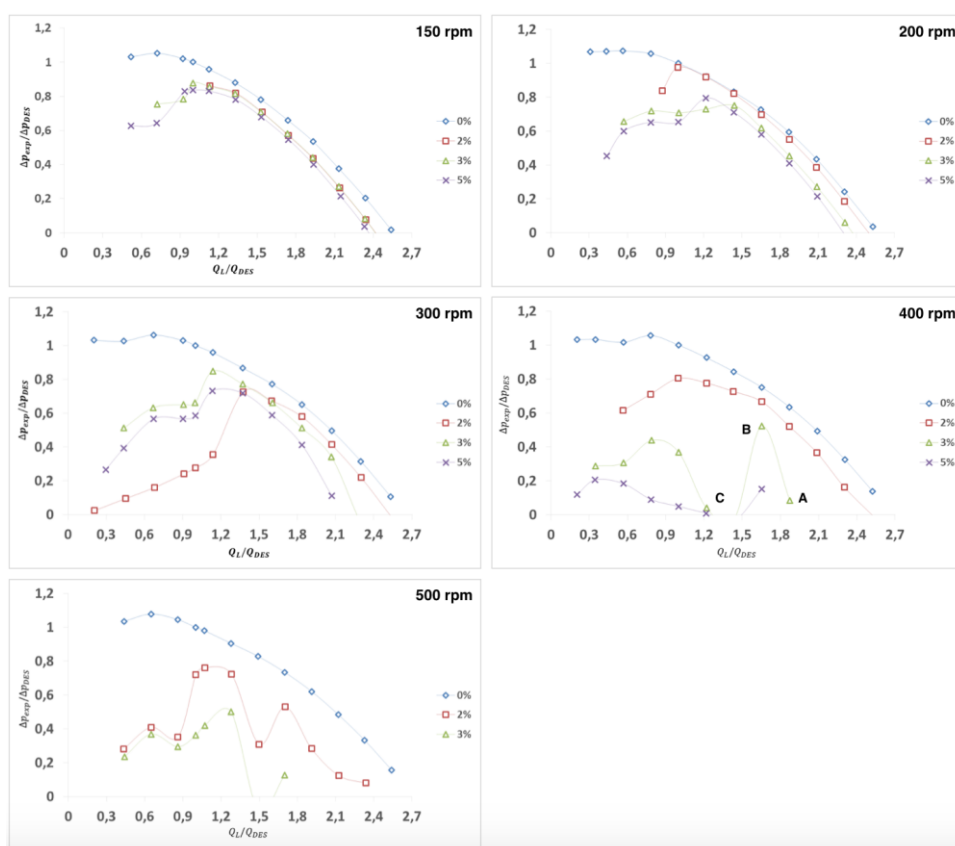


Figura 4.6 - Curvas normalizadas do desempenho da bomba teste medido experimentalmente sob escoamento monofásico e bifásico para diferentes frações de vazio.

Por exemplo, para os casos de 150 a 500 rpm temos que para uma mesma velocidade de rotação, porém diferentes frações de vazão, o ponto em que se inicia o *surging* vai cada vez mais para a direita para maiores vazões de líquido cada vez que se aumenta a fração de vazão. Há que se observar que para o caso de 300 rpm houve um desempenho anormal para a fração de vazão de 2%, pois a ocorrência de *surging* se deu para uma vazão de líquido maior, se comparado com os pontos de *surging* das frações de vazão de 3 e 5% para a velocidade de rotação de 300 rpm.

Ainda, é possível notar que para frações de vazão maiores que 3%, o ganho de pressão para a máxima vazão de líquido é extremamente degradada, chegando a mais de 50% comparado ao obtido para escoamento monofásico. Esse fenômeno é em decorrência de que para frações de vazão maiores que 3%, o padrão de escoamento observado no canal do rotor é o de bolsão de gás, caso também observado por Cubas (2017), o que acaba gerando uma severa degradação no desempenho do rotor radial plano.

A curva com fração de vazão de 5% para 500 rpm não foi obtida, pelo fato da grande degradação da curva com ganhos de pressão negativo, o que não foi estudo do presente trabalho.

Outra observação importante a se fazer é que, para algumas curvas levantadas, para velocidades de rotação de 400 e 500 rpm e frações de vazão iguais ou maiores que 3%, algumas delas apresentaram mais de duas mudanças de curvatura. Essas discontinuidades, como indica o estudo de Murakami e Minemura (1974a), se dão pelas mudanças de padrão de escoamento bifásico que ocorrem dentro do rotor, decorrentes das mudanças com quem a vazão de líquido e a fração de vazão passam durante o escoamento. A Figura 4.7 mostra a discontinuidade que ocorre para a curva de 400 rpm e fração de vazão de 3% nos pontos indicados no gráfico como (A), (B) e (C), que se mantêm estáveis durante todo o experimento.



Figura 4.7 - Descontinuidades da Curva de 400 rpm e fração de vazio de 3%.

É possível ver que a descontinuidade se dá pela formação de bolsões de gás nos canais do rotor conforme é observado pelo ponto (C), decorrente da constante mudança de vazões de líquido e fração de vazio. O ponto (A) e o ponto (C) tem desempenhos similares conforme observado na Figura 4.6, porém é possível observar a diferença do padrão de escoamento que ocorre após a ocorrência do ponto de *surging*, que ocorre após o ponto (B) onde há início da formação de bolsões de gás e o ponto subsequente ocorre uma queda abrupta de ganho de pressão.

Finalmente, é observado que diferentes frações de vazio têm grande influência no desempenho do rotor, e conseqüentemente nos padrões de escoamento que ocorrem e acabam afetando diretamente o desempenho da bomba teste.

4.3.2 Influência da velocidade de rotação no desempenho da bomba teste

Além de todos os parâmetros anteriormente mencionados que influem sobre o comportamento do escoamento bifásico no rotor, nesta seção em específico é analisada a influência da velocidade de rotação sob o desempenho da bomba teste, como também nos padrões de escoamento.

A Figura 4.8 mostra curvas normalizadas de ganhos de pressão em função da vazão de líquido para diferentes frações de vazio (modelo homogêneo, λ) de 2, 3 e 5%, para as diferentes velocidades de rotação entre 150 e 500 rpm. É possível observar que o aumento da fração de vazio na entrada do rotor faz com que se aumente a degradação do desempenho do rotor em relação ao monofásico. Porém,

essa degradação, bem como aspectos relacionados com pontos de início de *surging* dependem da velocidade de rotação.

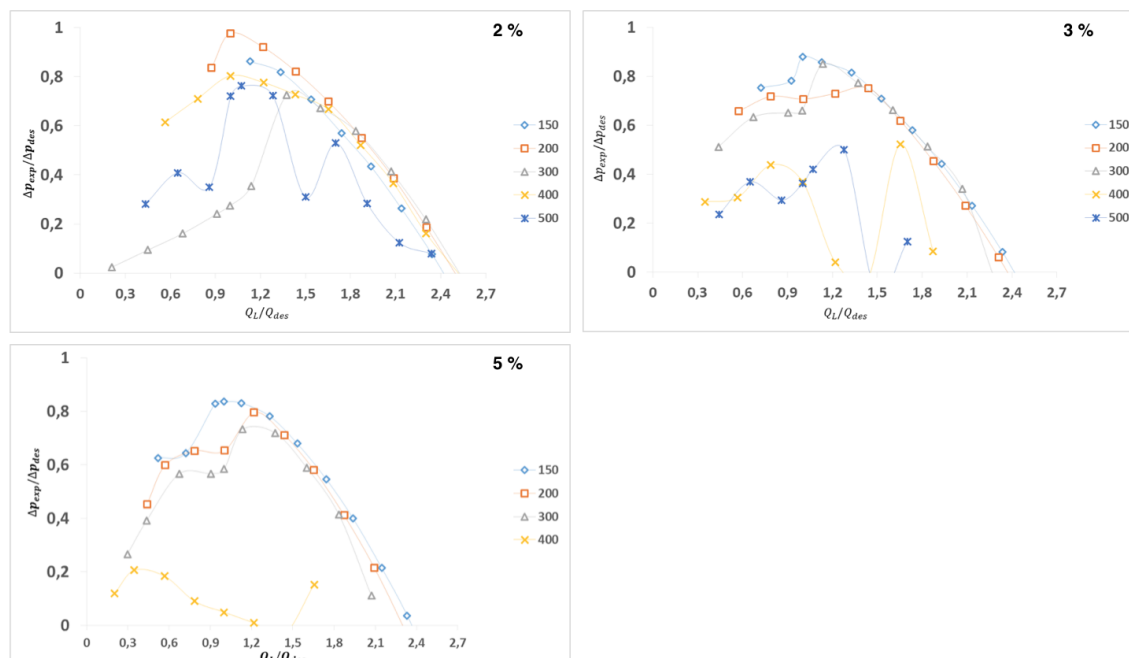


Figura 4.8 - Curva normalizada de ganho de pressão para fração de vazios constante e diferentes velocidades de rotação.

Em termo adimensionais, as curvas para as frações de vazios entre 2 e 5% para as diferentes velocidades de rotação entre 150 e 300 rpm tiveram um comportamento bem similar em todas as curvas levantadas, onde os pontos de *surging* sempre se situaram entre $1 < Q_L/Q_{des} < 1,5$. Entretanto, para as velocidades de rotação entre 400 e 500 rpm há uma forte degradação de desempenho e os pontos de *surging* acabam se deslocando para $1,5 < Q_L/Q_{des} < 1,8$.

Analisando os dados e comparando com outros trabalhos da literatura verifica-se que muitas vezes os resultados são afetados pela geometria do rotor testado. No caso em questão, temos que o aumento da velocidade de rotação não favorece na quebra de bolhas, mas sim na coalescência da fase gasosa e na formação de bolsões, tal que para maiores rotações e frações de vazio se obtém maior degradação do desempenho do rotor.

Conforme observado por Barrios (2007) e Cubas (2017) o aumento da velocidade de rotação favorece a quebra de bolhas no rotor, resultando numa menor coalescência da fase gasosa e melhorando dessa forma o desempenho comparado a menores velocidades de rotação. Quando comparado, os dados levantados com rotores de bombas reais, é observado um efeito contrário do que ocorre nesse caso.

Para melhor visualizar o efeito das velocidades de rotação no presente rotor através da visualização do comportamento obtido, são apresentadas na Figura 4.9 imagens dos padrões de escoamento obtidos no interior do rotor para as velocidades de rotação entre 150 e 400 rpm e frações de vazio de 2, 3 e 5%, conforme indicados por (A), (B) e (C), respectivamente. Salienta-se que, para a velocidade de rotação de 500 rpm, devido aos valores de ganho de pressão serem negativos não foram obtidas imagens pois não agregariam na análise. Para todos os casos observados abaixo, é apresentado como exemplo, as imagens do ponto de *design*, conforme Tabela 4.1. Os pontos de *design* são calculados de acordo com a equação apresentada na seção 4.2.

Tabela 4.1 - Pontos de *design* escolhidos para a visualização dos padrões de escoamento para diferentes velocidades de rotação.

Velocidade de rotação [rpm]	Ponto de <i>design</i> [m³/h]
150	1,7
200	2,3
300	3,4
400	4,6

Para a velocidade de 150 rpm, onde não há a ocorrência de *surging* entre os pontos (A) e (C), é observado um padrão de escoamento na forma de bolhas dispersas, apenas em (B) que há uma maior preferência das bolhas passarem pelo lado de sucção da pá. Aumentando-se a velocidade para 200 rpm, é observado um

padrão de bolhas dispersas apenas para a fração de vazio de 2%, para maiores frações de vazio, pontos (B) e (C), há o início de um agrupamento de bolhas no interior dos canais do rotor, sendo que ocorre uma pequena degradação no desempenho da bomba a partir da fração de vazio de 3%. O comportamento para a velocidade de rotação de 300 rpm é muito similar, porém temos um maior agrupamento de bolhas para as frações de vazio de 3 e 5%.

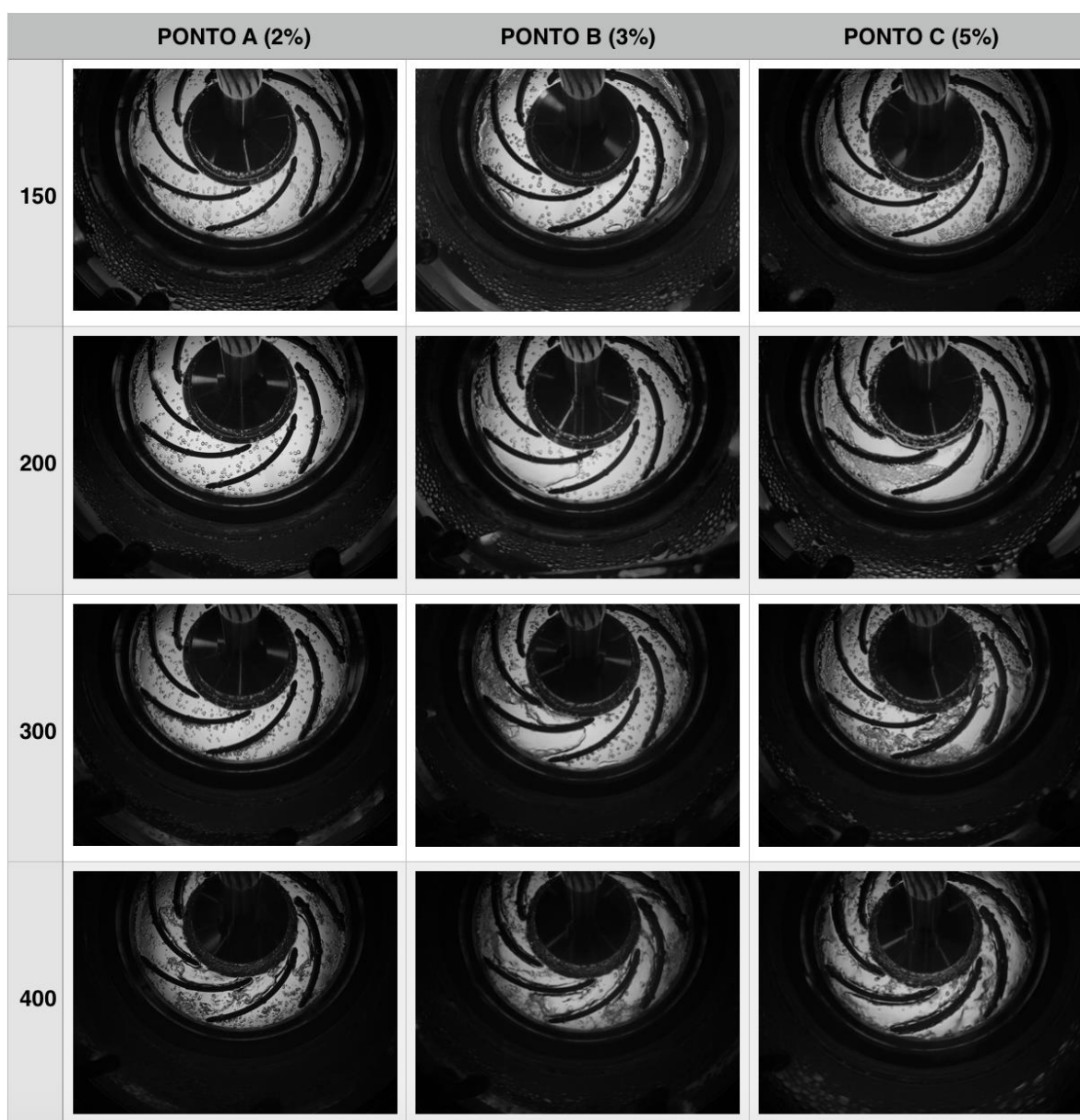


Figura 4.9 - Padrões de escoamento obtidos para velocidades de rotação entre 150 e 400 rpm e frações de vazio entre 2 e 5%.

Finalmente, para o caso de 400 rpm em que deveria ocorrer uma maior quebra de bolhas, devido o aumento na velocidade de rotação, o que se observa comparado a menores velocidades de rotação é o maior acúmulo de bolsões de gás no interior dos canais do rotor, começando a partir do ponto (A) onde já ocorre um pequeno bloqueio devido a aglomeração de bolhas na entrada do canal do rotor, criada pela turbulência da fase líquida, que faz com que as bolhas se acumulem. O bolsão aumenta para o ponto (B) e há um completo bloqueio para o caso (C) para fração de vazio de 5%.

É mostrado no presente trabalho que os padrões de escoamento não seguem a mesma tendência de quebra de bolhas para o aumento da velocidade de rotação como outros trabalhos da literatura como Barrios (2007) e Cubas (2017), sendo assim, mostra-se que essa mudança constante dos padrões de escoamento deve-se a dificuldade de se estudar o problema se considerando diferentes geometrias do rotor e velocidade de rotações distintas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O entendimento e elucidação de problemas associados a área de escoamento bifásico em bombas centrífugas possuem vários desafios. É notória a necessidade, por parte de vários segmentos industriais, principalmente os petrolíferos, de estudos mais amplos com abordagens técnicas e práticas já que em boa parte do processo operacional de tais empresas, o uso eficiente das bombas torna-se vital para otimização do desempenho produtivo, pois há um grande problema observado no que tange ao desempenho das bombas que se degradam sob escoamento bifásico devido a presença de gás livre.

Assim, o presente trabalho teve o objetivo o desenvolvimento de uma bancada experimental para se visualizar o escoamento bifásico ar-água em um rotor radial plano. Nessa bancada experimental foi possível se avaliar através da visualização do escoamento bifásico a influência da fração de vazio para as diferentes velocidades de rotação.

Avaliou-se que o aumento da fração de vazio, no presente trabalho, calculada através da vazão de líquido e gás, faz com que se aumente a degradação do desempenho devido a maior formação de bolsões de gás no interior dos canais do rotor. Também se observou que curvas de ganho de pressão com descontinuidades possuem padrões de escoamento diferentes no ponto anterior e posterior ao ponto de *surging*. Outra variável analisada foi o experimento com diferentes velocidades de rotação e frações de vazio constante e se observou que o presente estudo não segue padrões de quebra de bolhas com o aumento da velocidade de rotação, conforme outros autores verificam. Ao contrário, no presente estudo o aumento da velocidade de rotação faz com que se tenha uma maior aglomeração de bolhas nos canais do rotor, ou seja, ocorre o favorecimento da coalescência no interior do rotor.

Tendo em vista o plano metodológico traçado, mediante as fundamentações apresentadas que motivaram este trabalho, percebe-se que os resultados aqui expostos podem apresentar uma contribuição significativa para a área em estudo devido ao desenvolvimento de uma bancada experimental, onde foi possível acompanhar o movimento das bolhas ao longo dos canais do rotor, já que estudo parecido não é encontrado em nenhum trabalho na literatura, algum instrumento

capaz de através de imagens estáticas e alto contraste obtido com a retro iluminação esse acompanhamento.

Outro ponto a salientar neste trabalho é o auxílio que esse estudo trará para se calibrar modelos numéricos, com a possibilidade de pós-processar esses resultados para se obter campos médios e distribuição de tamanhos de bolhas, estudos como esses seriam difíceis sem uma câmera estática e uma retro iluminação.

Finalmente, o presente trabalho com o desenvolvimento da bancada experimental contribuirá ao entendimento de fenômenos que estão relacionados com a degradação do desempenho de bombas centrífugas sob escoamento bifásico, principalmente os relacionados a padrões de escoamento e contribuirá para orientar o desenvolvimento de bombas para escoamento bifásico, orientando futuros trabalhos a desenvolver bombas que suportam maiores quantidades de gás. Também é importante salientar os ganhos acadêmicos que este estudo trouxe com o amadurecimento de estudos realizados durante a graduação em matérias como Mecânica dos Fluidos, Máquinas de Fluxo e Desenho de Máquinas. O presente trabalho trouxe uma visão geral do desenvolvimento de um projeto, desde o problema que é encontrado na indústria petrolífera, simulações para se verificar o funcionamento do projeto, desenho e fabricação de peças para a bancada experimental até o estudo experimental realizado na bancada montada e finalizada. Com isso se mostra a importância do presente trabalho no desenvolvimento acadêmico e pessoal, que trouxe vários benefícios e uma visão mais real do que realmente é a engenharia.

REFERÊNCIAS

BARRIOS, L. **Visualization and Modeling of Multiphase Performance inside an Electrical Submersible Pump**. Oklahoma: Tese de Doutorado, The University of Tulsa, 2007.

CUBAS CUBAS, Jhoan Miguel. Estudo Experimental de Escoamento Bifásico Líquido-Gás em uma Bomba Centrífuga Radial. Curitiba: Dissertação de Mestrado, UTFPR, 2017.

ESTEVAM, V. Uma Análise Fenomenológica da Operação de Bomba Centrífuga com Escoamento Bifásico. Campinas: Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, 2002.

GÜLICH, J. F. **Centrifugal Pumps**. Berlin: Springer-Verlag, 2010.

LEA, J. F.; BEARDEN, J. L. Effects of Gaseous Fluids on Submersible Pump Performance. **Journal of Petroleum Technology**, 1982. 2922-2930.

MINEMURA, K.; MURAKAMI, M. A Theoretical Study on Air Bubble Motion in a Centrifugal Pump impeller. **ASME**, Dezembro 1980.

MINEMURA, K.; MURAKAMI, M.; KATAGIRI, H. Characteristics of Centrifugal Pumps handling Air-Water Mixtures and Size of Air Bubbles in Pump Impellers. **Bulletin of JSME**, v. 28, No. 244, p. 2310-2318, Outubro 1985.

MINEMURA, K.; MURAKAMI, M.; KATAOKA, T. Pressure Distribution in a Centrifugal Impeller Handling Air-Water Mixtures. **Bulletin of the JSME**, v. 26, No. 220, p. 1727-1734, Outubro 1983.

MINEMURA, K.; UCHIYAMA, T. Three-Dimensional Calculation of Air-Water Two-Phase Flow in Centrifugal Pump Impeller Based on a Bubbly Flow Model. **Journal of Fluid Engineering**, 1993. 766-771.

MURAKAMI, M.; MINEMURA, K. Effects of Entrained Air on the Performance of a Centrifugal Pump. **Bulletin of the JSME**, p. 1047-1055, 1974a.

MURAKAMI, M.; MINEMURA, K. Effects of Entrained Air on the Performance of a Centrifugal Pump (Second Report, Effects of Number of Blades). **Bulletin of the JSME**, 1974b. 1286-1295.

MURAKAMI, M.; MINEMURA, K. Effects of running clearance of semi-open impeller pumps under air admitting conditions. **Bulletin of the JSME**, 1976. 1141-1148.

PESSOA, R. **Experimental Investigation of Two-Phase Flow Performance of Electrical Submersible Pump Stages**. Master Thesis: The University of Tulsa, 2001.

PRITCHARD, P. J.; FOX; MCDONALD. **Introduction to Fluid Mechanics**. 8th. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2011.

STEPANOFF, A. J. **Centrifugal and Axial Flow Pump: Theory, Design, and Application**. 2nd. ed. New York: John Wiley & Sons, 1957.