

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Bruno Diego de Oliveira**

**Monitoramento do Desempenho de uma  
Bomba Centrífuga Submersa com Auxílio da  
Técnica Ultrassônica**

**Itajubá, julho de 2014**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Bruno Diego de Oliveira**

**Monitoramento do Desempenho de uma  
Bomba Centrífuga Submersa com Auxílio da  
Técnica Ultrassônica**

**Dissertação submetida ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia  
Mecânica como parte dos requisitos  
para obtenção do Título de Mestre em  
Engenharia Mecânica**

**Área de Concentração: Conversão de Energia.**

**Orientador: Prof. Dr. Ricardo Dias Martins de Carvalho**

**Julho de 2014  
Itajubá - MG**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá  
Bibliotecária Jacqueline Rodrigues de Oliveira Balducci- CRB\_6/1698

O48m

Oliveira, Bruno Diego de  
Monitoramento do Desempenho de uma Bomba Centrífuga  
Submersa com Auxílio da Técnica Ultrassônica. / Bruno Diego de  
Oliveira. – Itajubá, (MG) : [s.n.], 2014.  
78 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Dias Martins de Carvalho.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Escoamentos Bifásicos. 2. Ultrassom. 3. Bomba Centrífuga.  
Submersa. 4. Intermittência. I. Carvalho, Ricardo Dias Martins de,  
orient. II. Universidade Federal de Itajubá. III. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Bruno Diego de Oliveira**

**Monitoramento do Desempenho de uma  
Bomba Centrífuga Submersa com Auxílio da  
Técnica Ultrassônica**

Tese aprovada por banca examinadora em 31 de julho de 2014, conferindo ao autor o título de **Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.**

**Banca Examinadora:**

Dr. Valdir Estevam – PETROBRAS

Prof. Dr. Antonio Carlos Bannwart – UNICAMP

Prof. Dr. Luiz Antonio Alcântara Pereira – UNIFEI

Dr. José Luiz Gonçalves –UNIFEI

Prof. Dr. Ricardo Dias Martins de Carvalho – UNIFEI  
(Orientador)

**Itajubá - MG  
2014**



Ministério da Educação  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
Criada pela Lei 10436, de 24 de Abril de 2002

**TERMO DE ACEITE  
VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO/TESE  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTU SENSU**

Eu, Prof. Dr. RICARDO DIAS MARTINS DE CARVALHO, declaro  
que aceito a versão final da Dissertação/Tese de meu orientado(a)  
BRUNO DIEGO DE OLIVEIRA, matrícula: 27812  
do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA MECÂNICA  
e que o mesmo contém as indicações e correções sugeridas pela Banca  
Examinadora e que poderá ser realizada sua Homologação.

Em 17 de setembro de 2014

*Ricardo D. M. Carvalho*

Assinatura Orientador

# **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a Deus, à minha família e a minha Erika que sempre esteve ao meu lado.

*“O que prevemos raramente ocorre; o que menos esperamos geralmente acontece.”*

*(Benjamin Disraeli)*

## AGRADECIMENTOS

A minha namorada, Erika Biral Baptistella, pelo amor e compreensão durante todo este período.

Aos meus pais por toda a educação, amor, conselhos e ensinamentos.

Ao Prof. Ricardo Dias Martins de Carvalho pela orientação, discussões e ensinamentos.

Ao Prof. Antonio Carlos Bannwart pelo acesso às montagens do LabPetro-UNICAMP.

Ao Eng. Dr. Valdir Estevam pelo incentivo.

Ao Prof. Nicolas Rios Ratkovich (*Universidad de los Andes*, Bogotá, Colômbia) e seus colaboradores Hugo Alejandro Pineda Pérez e Fabio Andrés López Gil pelas simulações numéricas dos escoamentos.

A José Luiz Gonçalves por toda ajuda e ensinamentos.

Aos colegas Jorge Biazussi e Leonardo Calil pelo auxílio durante os experimentos.

A todos os professores e colegas que ajudaram de forma direta ou indireta na conclusão deste trabalho.



## RESUMO

Bombas centrífugas submersas (BCSs) são normalmente utilizadas como um método de elevação artificial em poços que produzem óleos pesados e moderadamente pesados. Entretanto, a presença de gás livre no escoamento reduz drasticamente o desempenho da BCS além de colocar em risco a integridade física da bomba. Torna-se, então, necessário medir e eventualmente separar o gás presente no escoamento na entrada da bomba. Este estudo apresenta o desenvolvimento de uma técnica ultrassônica para monitorar o desempenho da BCS. O principal objetivo foi encontrar meios de monitorar o escoamento na entrada da bomba e evitar que a mesma opere na região de intermitência. A geometria na entrada da BCS consiste em um espaço anular formado pela tubulação e pelo eixo girante que leva o torque do motor para a bomba. Por este espaço anular, passam os fluidos da produção do poço. Dados ultrassônicos foram obtidos em uma montagem auxiliar que simula a entrada de uma BCS bem como em uma bomba real J200N. Os fluidos utilizados foram óleo mineral e ar na montagem auxiliar e água e ar na bomba real. Os dados foram analisados em termos da atenuação acústica e do tempo de trânsito com o propósito de correlacioná-los com a fração volumétrica de gás (FVG) e identificar, nos sinais acústicos, a iminência da intermitência na operação da bomba. A fim de obter valores para a FVG na entrada da bomba, foram realizadas simulações numéricas tridimensionais do escoamento bifásico utilizando o programa STAR-CCM+ (Cd Adapco).

Com os ensaios da montagem simplificada, foi possível determinar as porções relevantes dos sinais ultrassônicos bem como observar aspectos importantes da configuração do escoamento nesta montagem. Já para a montagem com a bomba real, devido à forte atenuação dos sinais pelo eixo metálico, não foi possível estabelecer uma correlação entre a atenuação acústica e a FVG. Por outro lado, foi possível demonstrar que tempo de trânsito da onda acústica pode ser utilizado para monitorar o desempenho da bomba.

**Palavras-chave:** Escoamentos bifásicos; líquido-gás; ultrassom; bomba centrífuga submersa; intermitência.

## ABSTRACT

Electrical submersible pumps (ESPs) are commonly used as an artificial lift method for heavy and moderately heavy oils; however, the presence of free gas can drastically reduce the ESP performance and put at risk the pump integrity. In this context, this study presents the development of an ultrasonic technique to monitor the flow at the inlet of an ESP and thus prevent the pump from operating in the surging region. The geometry of the ESP inlet consists of an annular space formed by the pipe and the rotating shaft; the production fluids from the well go through this annular space. Ultrasonic data were acquired in a simplified test rig that simulates the ESP inlet as well as in a real J200N pump. Mineral oil was used as the continuous phase in the simplified test rig whereas water was used in the real pump. The ultrasonic data were analyzed in terms of the acoustic attenuation and the transit time in an attempt to find a correlation between these parameters and the gas void fraction (GVF); an attempt was also made to predict in the ultrasonic signals the onset of surging conditions in the pump. In order to determine the GVF at the pump inlet for the tested conditions, 3D simulations of the two-phase flow were carried out using Cd Adapco STAR-CCM+ software. The acoustic wave transit time was verified to be a more suitable parameter to monitor the pump operation.

From the results in the simplified test rig, it was possible to set bounds for the relevant portions of the ultrasonic signals as well as to observe significant aspects of the flow patterns in this geometry. In the actual ESP set-up, it was not possible to establish a correlation between the acoustic attenuation and the GVF due to strong effects of the metallic shaft; however, the acoustic wave transit time was shown to be a suitable parameter to monitor the pump performance.

**Key-words:** Two-phase flow, liquid-gas flow; ultrasound; electrical submersible pump; surging.

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	xi
LISTA DE TABELAS .....	14
1. INTRODUÇÃO .....	15
2. SISTEMAS DE BOMBEAMENTO CENTRÍFUGO SUBMERSO .....	18
2.1 Bombas Centrífugas Submersas .....	18
2.2 Instalação de Bombas Centrífugas Submersas .....	22
2.2.1 Motor de fundo .....	23
2.2.2 Protetor.....	23
2.2.3 Cabo elétrico.....	23
2.3 Técnicas de Monitoramento .....	23
2.4 A Técnica Ultrassônica Aplicada à BCS .....	25
3. DISPOSITIVOS DE TESTES E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	27
3.1 Montagem Simplificada .....	27
3.2 Conjunto de Bombeio Centrífugo Submerso Horizontal.....	32
4. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DO CONJUNTO BCS HORIZONTAL .....	35
5. ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS COM A MONTAGEM SIMPLIFICADA .....	36
5.1 Resultados para Misturas Bifásicas Água-Ar.....	36
5.2 Resultados para Misturas Bifásicas Óleo-Ar.....	37
5.2.1 Análise dos padrões de escoamento .....	37
5.2.2 Análise dos sinais ultrassônicos .....	39
6. ANÁLISE DOS RESULTADOS PARA O CONJUNTO BCS HORIZONTAL .....	44
6.1 Análise da Atenuação Acústica .....	44
6.2 Análise dos Tempos de Trânsito .....	47
6.2.1 Efeito da pressão.....	49
6.2.2 Efeito da rotação.....	49
6.2.3 Efeito da vazão mássica de ar.....	50

6.3	Identificação do Início da Intermitência .....	51
6.4	Inferências sobre a Configuração do Escoamento no Espaço Anular .....	52
7.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....	56
7.1	Principais Resultados Obtidos .....	56
7.2	Sugestões Para Trabalhos Futuros .....	56
	REFERÊNCIAS .....	58
	Apêndice A.....	60
A.	1 Criação do Modelo Numérico .....	61

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Comparação entre potenciais de produção: <i>gas lift</i> x BCS (Moreira <i>et al.</i> , 2006). .....	19
Figura 2-2: Vista esquemática de uma BCS (adaptada de Weatherford (2014)). .....	19
Figura 2-3: Representação esquemática da curva de desempenho de uma BCS (Verde, 2011). .....	21
Figura 2-4: Manuseador de gás Poseidon (Narvaez, 2014) .....	22
Figura 2-5: Detalhes da instalação de uma BCS em uma coluna de produção de petróleo (adaptada de Thomas (2001)). .....	22
Figura 3-1: Montagem simplificada para estudo do escoamento na entrada da BCS (LabPetro- UNICAMP). .....	28
Figura 3-2: Detalhamento da instrumentação ultrassônica. ....	28
Figura 3-3: Sensores de ultrassom utilizados (Gonçalves, 2013). .....	30
Figura 3-4: Fotografia da montagem simplificada com a instrumentação ultrassônica (LabPetro-UNICAMP). .....	31
Figura 3-5: Plataforma PXI-Express da <i>National Instruments</i> . .....	31
Figura 3-6: Aparato experimental na montagem em uma bomba centrífuga real. ....	33
Figura 3-7: Prato de suporte dos transdutores ultrassônicos. ....	33
Figura 3-8: Aparato ultrassônico montado na entrada da BCS (LabPetro – UNICAMP). .....	34
Figura 3-9: Altura de elevação em função da vazão de líquido (1800 RPM e 100 kPa). .....	34
Figura 5-1: Razão de energia média em função da FVG (Oliveira, 2012). ....	36
Figura 5-2: Exemplo de sincronização entre pulsos ultrassônicos individuais e filmagens rápidas (Oliveira, 2012). .....	37
Figura 5-3: Padrões em função da FVG: calotas (a, b, c); torpedos (d, e, f). .....	38
Figura 5-4: Pontos para identificação das trajetórias acústicas na montagem de simulação entrada da BCS. ....	40
Figura 5-5: Demarcação da janela de atividade para o transdutor a 0°. ....	42
Figura 5-6: Demarcação da janela de atividade para o transdutor a 45°. .....	42
Figura 5-7: Demarcação da janela de atividade para o transdutor a 135°. .....	42
Figura 5-8: Demarcação da janela de atividade para o transdutor a 180°. .....	43
Figura 6-1: Razão de energia para o transdutor a 45° (1800 RPM e 200 kPa). ....	44
Figura 6-2: Razão de energia para o transdutor a 135° (1800 RPM e 200 kPa). ....	45
Figura 6-3: Razão de energia para o transdutor a 180° (1800 RPM e 200 kPa). ....	45

Figura 6-4: Razão de energia para o transdutor a 0° (1800 RPM e 100 kPa). .....	45
Figura 6-5: Razão de energia para o transdutor a 0° (3000 RPM e 100 kPa). .....	46
Figura 6-6: Razão de energia para o transdutor a 0° (1800 RPM e 200 kPa). .....	46
Figura 6-7: Razão de energia para o transdutor a 0° (3000 RPM e 200 kPa). .....	46
Figura 6-8: Vista esquemática do sinal ultrassônico no espaço anular.....	47
Figura 6-9: Tempo de trânsito em função do tempo de aquisição (1800 RPM e $p_i = 200$ kPa). .....	48
Figura 6-10: Tempo de trânsito médio em função da FVG: (a) 1800 RPM; $m_g = 1$ kg/h e (b) 3000 RPM; $m_g = 1$ kg/h. ....	49
Figura 6-11: Tempo de trânsito médio em função da FVG: (a) 100 kPa; $m_g = 1$ kg/h e (b) 200 kPa; $m_g = 1$ kg/h. ....	50
Figura 6-12: Tempo de trânsito médio em função da FVG: (a) 100 kPa, 3000 RPM; e (b) 200 kPa, 3000 RPM. ....	51
Figura 6-13: Pontos escolhidos para análise da configuração do escoamento na entrada da bomba (3000 RPM, 200 kPa, $m_g = 1$ kg/h). ....	52
Figura 6-14: Configuração do escoamento detectada pelos pulsos individuais (FVG = 1,2 % 3000 RPM, 200 kPa, $m_g = 1$ kg/h) .....	54
Figura 6-15: Configuração do escoamento detectada pelos pulsos ultrassônicos individuais (FVG = 1,5 % 3000 RPM, 200 kPa, $m_g = 1$ kg/h) .....	54
Figura 6-16: Configuração do escoamento detectada pelos pulsos ultrassônicos individuais (FVG = 2,2 % 3000 RPM, 200 kPa, $m_g = 1$ kg/h) .....	55
Figura 6-17: Configuração do escoamento detectada pelos pulsos ultrassônicos individuais (FVG = 3,0 % 3000 RPM, 200 kPa, $m_g = 1$ kg/h) .....	55
Figura A-1: (a) Trecho para aquisição de dados ultrassônicos e (b) geometria utilizada no STAR-CCM+.....	61
Figura A-2: (a) Rotor real e (b) rotor gerado no Autodesk® Inventor (Oliveira <i>et al.</i> , 2014). 62	
Figura A-3: Volume interno gerado no STAR-CCM + (Oliveira <i>et al.</i> , 2014).....	62
Figura A-4: Detalhes da malha na região do transdutor (Oliveira <i>et al.</i> , 2014). ....	63
Figura A-5: Perfil de velocidades: (a) com rotor e (b) sem o rotor (Oliveira <i>et al.</i> , 2014). ....	65
Figura A-6: (a) FVG em função do número de elementos e (b) tempo computacional em função do número de elementos (Oliveira <i>et al.</i> , 2014). ....	66
Figura A-7: Malha gerada no STAR-CCM+ para a região do fluido utilizando tamanho grosseiro dos poliedros (Oliveira <i>et al.</i> , 2014). ....	67

Figura A-8: Distribuição da FVG na seção transversal na região dos transdutores e em todo o domínio para a condição 1.....	69
Figura A-9: Distribuição da FVG na seção transversal na região dos transdutores e em todo o domínio para a condição 2.....	70
Figura A-10: Distribuição da FVG na seção transversal na região dos transdutores e em todo o domínio para a condição 3.....	71
Figura A-11: Distribuição da FVG na seção transversal na região dos transdutores e em todo o domínio para a condição 4.....	72
Figura A-12: Distribuição da FVG na seção transversal na região dos transdutores e em todo o domínio para a condição 5.....	73
Figura A-13: Distribuição da FVG na seção transversal na região dos transdutores e em todo o domínio para a condição 6.....	74
Figura A-14: Distribuição da FVG na seção transversal na região dos transdutores e em todo o domínio para a condição 7.....	75
Figura A-15: Distribuição da FVG na seção transversal na região dos transdutores e em todo o domínio para a condição 8.....	76
Figura A-16: Distribuição da FVG na seção transversal na região dos transdutores e em todo o domínio para a condição 9.....	77
Figura A-17: Distribuição da FVG na seção transversal na região dos transdutores e em todo o domínio para a condição 10.....	78

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 3-1: Condições de operação para aquisição dos dados ultrassônicos.....	34
Tabela 5-1: Velocidades de propagação do som. ....	40
Tabela 5-2: Tempos de trânsito para as várias trajetórias acústicas. ....	41
Tabela A-1: Número de elementos e tempo computacional para cada tipo de malha. ....	66
Tabela A-2: FVG para diferentes condições de escoamento. ....	68



# 1. INTRODUÇÃO

Escoamentos multifásicos são muito comuns nas indústrias petrolífera, química e nuclear, frequentemente envolvendo meios agressivos, rigorosas restrições de segurança, dificuldades de acesso e longas distâncias. Assim sendo, tem-se observado um interesse crescente na aplicação de técnicas não invasivas e passíveis de serem controladas à distância para medição da concentração das fases dispersas, padrões de escoamento e outros parâmetros básicos de escoamentos multifásicos. Neste sentido, a técnica ultrassônica vem despertando o interesse de muitos pesquisadores e profissionais da indústria petrolífera. Esta técnica já está bem estabelecida em outros campos de aplicação tais como medicina e detecção de defeitos em materiais sólidos; os transdutores e a eletrônica necessária são disponíveis comercialmente a um custo relativamente baixo e os sistemas como um todo são compactos e robustos. A técnica ultrassônica pode ainda ser utilizada com fluidos opacos opticamente e suspensões densas.

A desvantagem da técnica ultrassônica é a necessidade de aferição prévia do sinal em função da concentração das fases dispersas. Os principais parâmetros ultrassônicos a serem medidos são intensidade da pressão sonora, atenuação acústica e tempo de trânsito da onda ultrassônica. Esses parâmetros podem ser medidos ao longo do diâmetro da tubulação ou ao longo de outro caminho acústico de interesse no escoamento multifásico. Como a distribuição e concentração das fases dispersas (bolhas, gotas de óleo ou partículas sólidas) alteram esses parâmetros devido aos fenômenos de transmissão, reflexão, refração e espalhamento do feixe acústico, o sinal recebido após atravessar o escoamento pode ser aferido para determinação dos parâmetros hidrodinâmicos do escoamento.

Tanahashi (2010) relacionou a atenuação acústica de sinais ultrassônicos com a fração volumétrica de gás (FVG) em escoamentos bifásicos água-ar verticais ascendentes. O aparato experimental era composto por um tubo de oito metros de comprimento e duas polegadas de diâmetro interno por onde escoava água a uma vazão fixa enquanto a vazão de ar variava. Foi observada uma correlação clara entre a atenuação acústica nos vários sensores e a FVG. Grangeiro Filho (2010) utilizou o tempo de trânsito para medir a velocidade das bolhas alongadas e a FVG em escoamentos bifásicos intermitentes horizontais água-ar. Gonçalves (Gonçalves, 2013) obteve dados ultrassônicos para escoamentos multifásicos líquido-gás-sólido em diversos padrões utilizando óleo mineral como fase contínua; os métodos de tratamento dos sinais acústicos inicialmente desenvolvidos por Tanahashi (2010) e Grangeiro Filho (2010) foram então aperfeiçoados para estes novos escoamentos.

Os estudos acima se referem todos a tubulações. Porém, alguns equipamentos possuem geometrias diferentes, como é o caso do equipamento de bombeio centrífugo submerso no qual o escoamento passa por espaços anulares até chegar à bomba. A bomba centrífuga submersa (BCS) localizada no fundo de uma coluna de produção de petróleo deve em princípio bombear apenas líquidos, ocorrendo uma deterioração rápida de seu desempenho quando existe uma alta FVG. Ocorrem os problemas de intermitência (*surging*) e bloqueio de gás (*gas locking*). Portanto, para um ótimo desempenho da BCS deve-se ter um controle rigoroso da FVG presente no escoamento a montante da bomba e do tamanho das bolhas nesse escoamento.

A pesquisa bibliográfica realizada mostrou a ausência de trabalhos para monitoramento da BCS com base na técnica ultrassônica. As técnicas utilizadas atualmente para este fim se baseiam, principalmente, em parâmetros elétricos do motor ao qual a bomba está acoplada, medidas de vibração e medidas de pressão na entrada e saída da bomba (Takacs, 2009). Não foram encontrados na literatura estudos sobre o comportamento de escoamentos multifásicos ou bifásicos em espaços anulares com o eixo central rotativo, que é a geometria da entrada da BCS.

Este trabalho tem por objetivo averiguar a possibilidade de se utilizar a técnica ultrassônica para identificação dos padrões de escoamento na entrada da BCS e medição da FVG neste ponto. O conhecimento destas informações em tempo real permitirá a tomada de decisões mais embasadas acerca das vazões de produção em cada instante, melhorando assim a eficiência do processo como um todo. Caso a medição e tratamento de dados do desempenho da bomba sejam possíveis em tempo real, será possível manter sua operação próxima das condições ideais de funcionamento além de evitar que ela opere em intermitência ou que ocorra o bloqueio de gás.

As simulações numéricas realizadas para este trabalho tiveram como objetivo calcular os valores de FVG na posição da estação ultrassônica bem como se fazer inferências sobre a configuração do escoamento neste ponto. A interpretação dos sinais ultrassônicos obtidos nos experimentos torna-se assim bem mais simples e direta. Já os experimentos com a montagem simplificada tiveram por objetivo identificar as porções relevantes dos sinais ultrassônicos e assim reduzir o tempo de processamento dos sinais e o espaço de memória necessário para armazená-los.

No Capítulo 2, é feita uma revisão dos equipamentos de bombeio centrífugo submerso e das técnicas de monitoramento das bombas centrífugas utilizadas atualmente. É também

discutido como a técnica ultrassônica pode eventualmente ser aplicada para monitoramento destas bombas BCS.

O Capítulo 3 descreve os dois aparatos experimentais utilizados para obtenção de dados ultrassônicos, um experimento simplificado e um conjunto BCS horizontal, e os procedimentos de ensaio para cada aparato.

O Capítulo 4 explica a necessidade de simulações numéricas dos escoamentos para se determinar os valores da fração volumétrica de gás e se fazer inferências sobre a configuração dos escoamentos nas condições testadas. Os procedimentos de simulação numérica propriamente ditos são detalhados no Apêndice A.

O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos no experimento simplificado enquanto o Capítulo 6 trata dos resultados para o conjunto de BCS horizontal.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

## 2. SISTEMAS DE BOMBEAMENTO CENTRÍFUGO SUBMERSO

### 2.1 Bombas Centrífugas Submersas

Takacs (2009) faz uma comparação entre os métodos de elevação artificial e afirma que diversos critérios são utilizados para a determinação de qual método adotar em uma dada aplicação: profundidade do poço, taxa de produção requerida, propriedades do fluido, etc. A elevação gasosa (*gas lift*) tem sido o principal método de elevação artificial em poços submarinos no Brasil. No entanto, para a produção de óleos pesados e viscosos, os métodos de elevação por bombeio centrífugo submerso propiciam significativo aumento no potencial de produção. A Figura 2-1 mostra uma comparação entre o potencial de produção por elevação gasosa e por uma bomba centrífuga submersa (BCS) instalada no campo de Jubarte (API 17°) pela Petrobras. O potencial de produção se eleva em cerca de 1000 m<sup>3</sup>/dia com a utilização da BCS de acordo com Moreira *et al.* (2006).

A Figura 2-2 mostra uma vista esquemática de uma BCS. Ela é acionada por um motor elétrico, podendo ser empregados tantos estágios quantos necessários. Cada estágio é composto por dois componentes básicos: rotor e difusor. O rotor é constituído por um conjunto de pás confinadas por paredes, tanto na entrada quanto na saída. O difusor é o componente fixo, solidário à carcaça da bomba. O fluido vindo de um estágio entra axialmente no rotor do estágio posterior com velocidade relativamente baixa, sendo acelerado devido à elevada velocidade de rotação do rotor. O torque aplicado pela bomba ao fluido é convertido em energia cinética. A conversão da energia cinética em energia de pressão ocorre quando o fluido à alta velocidade deixa o rotor e entra no difusor. Como os estágios estão em série, a pressão do fluido aumenta a cada estágio.

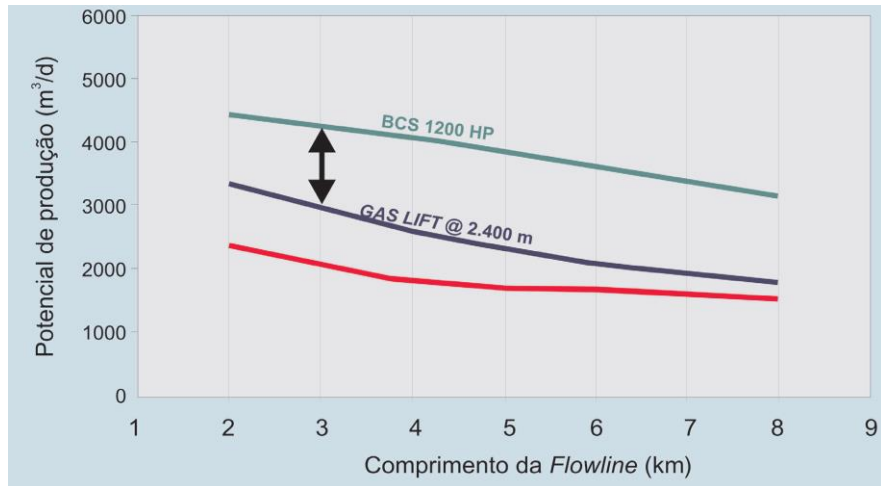


Figura 2-1: Comparação entre potenciais de produção: *gas lift* x BCS (Moreira *et al.*, 2006).

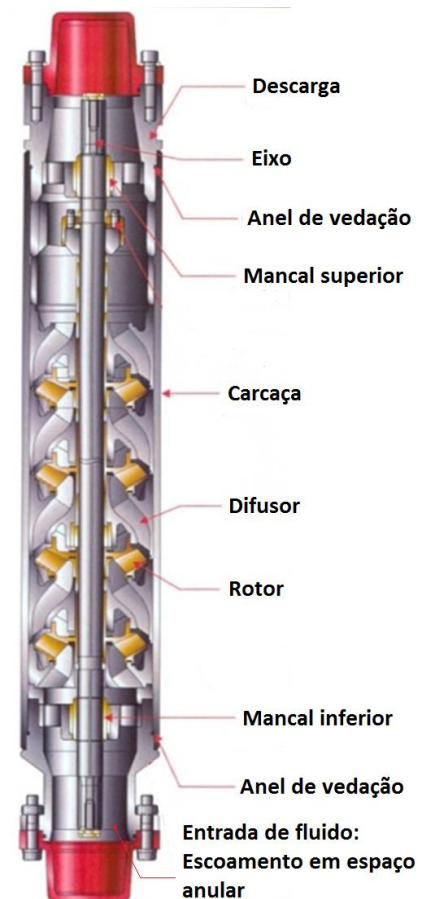


Figura 2-2: Vista esquemática de uma BCS (adaptada de Weatherford (2014)).

Contrariamente à elevação gasosa, a composição original dos fluidos é mantida ao se utilizar o bombeio centrífugo submerso. A vazão de produção pode ser controlada pela variação da velocidade de rotação do motor. Por suas características construtivas e operacionais, as BCSs se prestam à produção de altas vazões de fluidos com elevada razão

água-óleo (RAO) e baixa razão gás-óleo (RGO). Podem ser empregadas em poços com altas temperaturas e poços não verticais. As BCSs são também adequadas à elevação de fluidos com alta viscosidade. As principais vantagens das BCSs são então a possibilidade de operar a altas vazões e a diversidade de equipamentos disponíveis para atender aos requisitos de várias aplicações, o que lhes confere grande versatilidade.

Todavia, o desempenho das BCSs é fortemente afetado pela presença de gás livre. O gás natural livre presente no reservatório ou proveniente da descompressão do óleo é produzido juntamente com o petróleo líquido, provocando um escoamento bifásico gás-líquido. A presença de gás na sucção da BCS deteriora o aumento de pressão do fluido a ser bombeado devido à alteração de sua massa específica. A Figura 2-3 mostra esquematicamente a curva de desempenho das BCSs operando com escoamentos gás-líquido. A curva (1) representa a operação da bomba apenas com líquido. Na presença de uma pequena quantidade de gás, curva (2), observa-se apenas uma discreta diminuição da capacidade de elevação. Nessas condições, as bolhas se encontram dispersas no líquido de forma homogênea, isto é, no padrão bolhas dispersas. Com o aumento da FVG, curva (3), é evidenciado um ponto de máximo na curva de desempenho conhecido com “ponto de intermitência”, caracterizado por uma acentuada diminuição da capacidade de bombeamento. A intermitência na bomba leva a mudanças cíclicas na carga no motor e a corrente elétrica começa a variar da mesma maneira, levando ao desligamento da unidade de bombeamento. Na condição de intermitência, o escoamento não é mais homogêneo, pois a força gravitacional e o intenso campo centrífugo segregam as fases mais rapidamente do que a turbulência é capaz de misturá-las. Portanto, a partir do ponto de intermitência as fases escoam separadamente no interior da bomba. As bolhas de gás coalescem e tendem a se acumular no lado de baixa pressão das pás do rotor. Para uma elevada fração volumétrica, curva (4), observam-se novas instabilidades da curva de operação, representada pelos círculos vermelhos. A curva (4) apresenta três regiões distintas de operação: (a) região estável; (b) região onde se inicia o processo de intermitência; (c) região de grande instabilidade. A presença de grandes quantidades de gás livre a baixas vazões pode causar o bloqueio da área disponível para escoamento no rotor da bomba. A linha tracejada (5) representa a curva de intermitência. À direita da curva, a operação da bomba é estável; porém, à esquerda da curva a operação é instável e deve ser evitada. Por conseguinte, o conhecimento das condições para as quais ocorre o fenômeno de intermitência é de extrema importância para a operação adequada das BCS.

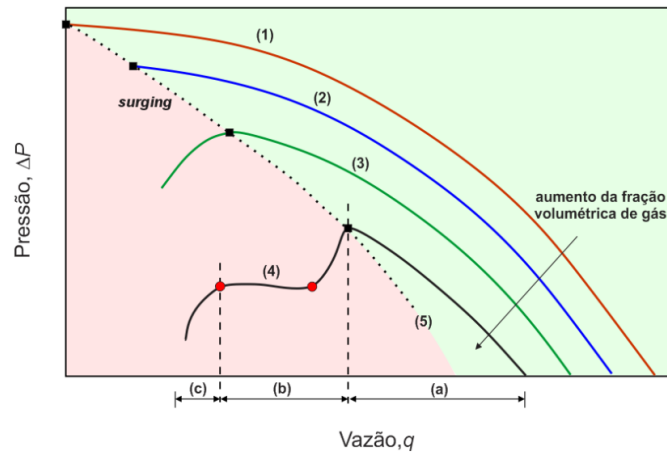


Figura 2-3: Representação esquemática da curva de desempenho de uma BCS (Verde, 2011).

De maneira geral, conclui-se então que os fenômenos de intermitência e bloqueio gasoso, que levam à degradação do desempenho da bomba, estão associados à segregação das fases líquida e gasosa. Por outro lado, os principais fatores que influenciam a segregação das fases são a geometria e a rotação da bomba, o diâmetro das bolhas e a massa específica das fases. Soluções específicas devem ser adotadas para a utilização de uma BCS em poços com elevada RGO. Quando a produção gás é inevitável, uma das soluções empregadas é a utilização do manuseador de gás por recirculação (Figura 2-4). Este equipamento consiste em bombas centrífugas de múltiplos estágios modificadas de forma a promover a recirculação do escoamento e assim diminuir o diâmetro das bolhas e homogeneizar o escoamento. Desta forma, a segregação das fases é dificultada e aumenta-se a tolerância da bomba à presença de gás. Todavia, a utilização desse tipo de equipamento reduz a eficiência da bomba em torno de 20 a 30% devido à dissipação de energia pela recirculação do fluido.

Barriato (2014) levantou curvas de desempenho de uma BCS J200N em escoamentos bifásicos água-ar. As curvas foram coletadas para diversas condições de operação da bomba, dentro e fora de região de intermitência. A partir deste trabalho, foram selecionadas as curvas da bomba e as condições de operação para coleta dos sinais ultrassônicos no presente trabalho. Foram escolhidos pontos de operação da bomba dentro e fora da região de intermitência a fim de se verificar eventuais mudanças do sinal ultrassônico em cada uma destas regiões. Os valores de vazão de água foram ajustados durante a realização do experimento a fim de se atingir as condições desejadas.



Figura 2-4: Manuseador de gás Poseidon (Narvaez, 2014)

## 2.2 Instalação de Bombas Centrífugas Submersas

De acordo com Lobianco *et al.* (2010), os equipamentos de fundo para o bombeio centrífugo submerso consistem de uma bomba centrífuga de múltiplos estágios (já apresentada anteriormente), um motor de fundo, o protetor e os cabos elétricos como mostra a Figura 2-5. A seguir, serão realizados breves comentários sobre estes componentes.

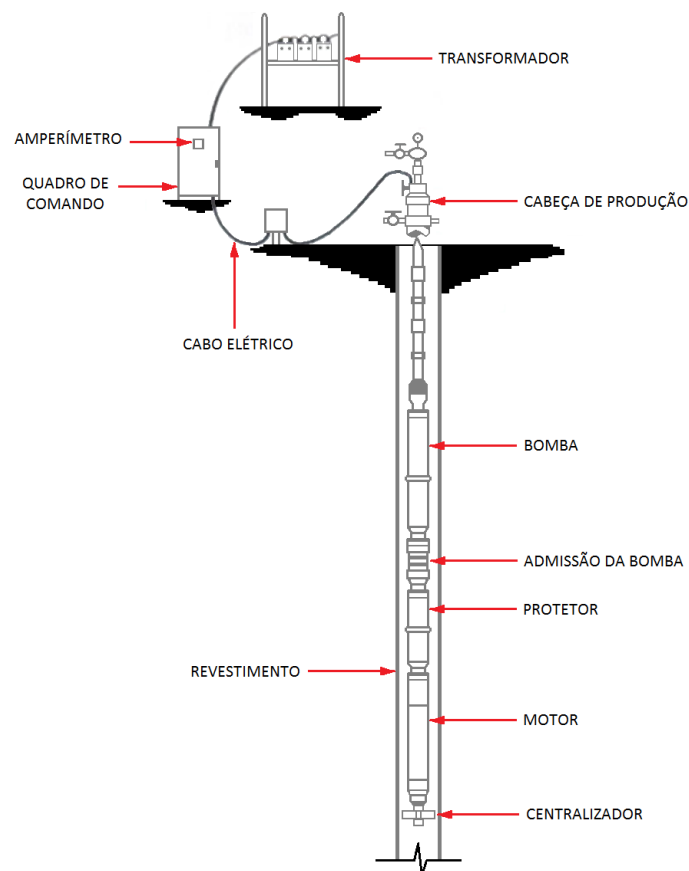


Figura 2-5: Detalhes da instalação de uma BCS em uma coluna de produção de petróleo (adaptada de Thomas (2001)).



### **2.2.1 Motor de fundo**

Os motores elétricos utilizados são normalmente de corrente alternada, trifásicos, dipolos e de indução. Na parte superior do motor, está localizado um mancal de escora cujo propósito é suportar todo peso do motor (Figura 2-5). O interior do motor é preenchido com óleo dielétrico não condutor. A voltagem do motor pode variar de algumas centenas de volts (motores pequenos) a 4000 V. Motores com tensões maiores são recomendados para diminuir a corrente e, conseqüentemente, a espessura do cabo de alimentação do motor. A refrigeração do motor é realizada pelo fluido do poço que passa pela carcaça do motor.

O eixo do motor se conecta ao eixo do protetor, admissão da bomba e ao rotor, ou seja, trata-se de um único eixo cujo alinhamento deve ser garantido de modo a não ocorrerem falhas durante a operação. Configura-se assim um espaço anular formado pelo eixo do motor e o tubo de produção (Figura 2-5).

### **2.2.2 Protetor**

É um equipamento instalado entre o motor e a admissão da bomba (Figura 2-5) que faz a conexão entre os eixos do motor e da bomba por meio de duas luvas de acoplamento e o eixo do próprio protetor. Tem como função, além de conectar a bomba ao motor, prevenir entrada do fluido produzido no poço dentro do motor, equalizar as pressões dos fluidos produzidos e do fluido dielétrico que fica em torno do motor, prover o volume necessário para armazenar o fluido do motor que se expande devido ao aquecimento e alojar o mancal que absorve os esforços axiais exercidos pela bomba.

### **2.2.3 Cabo elétrico**

Trata-se da transmissão de energia elétrica da superfície até o motor de fundo. O dimensionamento dos cabos depende de diversos fatores, entre eles: tensão do motor e corrente, temperatura do poço, pressão do fundo do poço, custo, etc. Pode haver também um cabo que irá transmitir informação dos sensores instalados em todo equipamento de fundo do poço à superfície.

## **2.3 Técnicas de Monitoramento**

Para atingir a maior vida útil possível, deve-se monitorar o desempenho da unidade de bombeamento. A seguir são mostrados os equipamentos e métodos de monitoramento utilizados atualmente bem como o modo como as informações colhidas por esses equipamentos são analisadas.

Admitindo que a instalação de bombeamento tenha sido instalada corretamente, a garantia de uma vida longa do sistema dependerá muito do operador. Alguns parâmetros são medidos continuamente e a análise desses parâmetros permite ao operador avaliar as condições tanto do equipamento quanto do escoamento. Os principais parâmetros medidos são (Takacs, 2009):

- Taxa de produção de líquido (medida na superfície): este é o primeiro indicador de que há problemas no fundo do poço. Mudanças no escoamento são detectadas neste ponto.
- Corrente elétrica do motor: a partir de um gráfico da corrente elétrica, podem ser identificadas mudanças na bomba, no poço ou no sistema elétrico (incluindo o motor de fundo). Podem também ser realizadas verificações nas tendências de carga sobre a bomba e, de forma indireta, podem ser inferidas mudanças nas propriedades dos fluidos produzidos.
- Pressão na entrada da bomba: eventuais alterações neste parâmetro indicam mudanças no desempenho da bomba, no escoamento e riscos à integridade do sistema de bombeamento.

Para um melhor monitoramento dos equipamentos, podem também ser instalados medidores diretamente no fundo do poço junto com o próprio sistema de bombeamento. Os parâmetros básicos monitorados por estes medidores são pressão, temperatura, vazão e vibração. Diferentes transdutores enviam sinais para a superfície que podem ser armazenados, avaliados e utilizados para monitorar o desempenho do sistema de bombeamento. Estes instrumentos podem ser instalados na parte inferior do motor ou próximos da descarga da bomba (porta-transdutores). Quando o aparato de medição estiver localizado na parte inferior do motor de fundo, a transmissão de dados se dará pelo mesmo cabo de alimentação do motor. Esta configuração possui a vantagem de não necessitar de um equipamento exclusivo para transmissão de dados, mas a velocidade de transmissão é então lenta. Quando o aparato de medição estiver localizado próximo à descarga da bomba, é necessário utilizar outro cabo para a transmissão dos dados. As maiores vantagens nesse caso são as altas taxas de transmissão de dados e o completo isolamento eletrônico entre os medidores e o sistema de bombeamento. Porém, a necessidade deste cabo adicional acarreta em um maior custo de instalação do equipamento de bombeio centrífugo submerso. Com estes medidores e com a medição contínua dos parâmetros citados, o operador é capaz de controlar com maior eficiência a BCS.

A pressão na entrada da bomba (PIP, do inglês *pump intake pressure*) indica a pressão do escoamento no poço no nível da sucção da bomba (Figura 2-5). É o PIP que determina se haverá gás livre na entrada da bomba ou não. Este parâmetro está relacionado à pressão do reservatório e à vazão do fluido produzido sendo, portanto, uma medida confiável para o controle do bombeio centrífugo submerso. Deve-se garantir que o PIP não ultrapasse um valor mínimo e, caso isso ocorra, pode ser necessário o desligamento do sistema. Porém, esta é uma técnica cara e de difícil instalação e manutenção (Takacs, 2009).

É possível, também, fazer inferências sobre o escoamento pela pressão de descarga da bomba. Esta pressão varia em razão das mudanças ocorridas na cabeça do poço e da fração de água e de gás nos fluidos produzidos. Quando a pressão de descarga for utilizada para controlar o sistema, deve ser adotado um limite superior.

A partir do diferencial de pressão da bomba, é possível verificar se a bomba está operando dentro das condições ótimas de funcionamento para as quais foi projetada. A medição da temperatura do motor pode ser realizada nas bobinas ou no óleo do motor. A temperatura das bobinas permite um melhor monitoramento, pois varia mais rapidamente quando algum problema ocorre com o motor. Também neste caso, deve ser adotado um limite superior. A temperatura na entrada da bomba funciona como um verificador da variação da temperatura do motor, visto que alterações na temperatura do motor alteram a temperatura do fluido que, por sua vez, altera o escoamento.

Devido às diversas possibilidades para as causas de vibração no sistema, medições de vibração não podem ser interpretadas diretamente. No entanto, sua evolução pode indicar o surgimento de problemas que podem levar a falhas mecânicas ou elétricas. O controle do sistema é realizado por meio do estabelecimento de um limite superior para o nível de vibração; caso a vibração do sistema atinja este limite, o sistema poderá ser desligado.

## **2.4 A Técnica Ultrassônica Aplicada à BCS**

Como pode ser visto na discussão acima, as medições do escoamento na entrada da bomba são feitas de forma indireta e os sinais analisados são apenas sintomas de mudanças nas condições do escoamento. Pretende-se então averiguar aqui a possibilidade da técnica ultrassônica fornecer uma medida mais direta das condições do escoamento na entrada da bomba, ou seja, pretende-se averiguar a possível existência de uma correlação direta entre os parâmetros acústicos e a FVG e as estruturas do escoamento na entrada da bomba.

A técnica ultrassônica foi testada para medições em tubulações em experimentos laboratoriais (Grangeiro, 2010; Tanahashi, 2010; Gonçalves, 2013). Porém, a montagem mais comum do sistema da BCS possui o motor na parte inferior da bomba. Devido a este fato, o fluido deverá escoar em um espaço anular, pois o eixo estará presente na parte central da tubulação, como mostra a Figura 2-2. A presença deste eixo giratório no centro da tubulação alterará o padrão de escoamento no espaço anular e, conseqüentemente, os sinais ultrassônicos ali obtidos. O próximo capítulo descreve uma montagem experimental auxiliar e um conjunto BCS horizontal utilizados para obtenção de sinais ultrassônicos nesta geometria distinta caracterizada pela entrada de bombas centrífugas submersas.

## **3. DISPOSITIVOS DE TESTES E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS**

Inicialmente, foi realizada uma investigação preliminar para se verificar a correlação entre parâmetros acústicos e hidrodinâmicos em misturas bifásicas líquido-gás em uma geometria próxima daquela da entrada de uma BCS. Posteriormente, foram feitas medidas ultrassônicas na entrada de uma BCS montada horizontalmente no Laboratório de Petróleo da Universidade Estadual de Campinas (LABPETRO-UNICAMP).

### **3.1 Montagem Simplificada**

Inicialmente foi usada uma montagem experimental simplificada devido à facilidade operacional. Este experimento simplificado simula a entrada de uma BCS modelo J200N, que possui um eixo central de transmissão de torque no interior de uma carcaça metálica. Nesta montagem auxiliar (Figura 3-1), uma barra circular maciça de aço carbono 1020, simulando o eixo da bomba, foi colocada no interior de um tubo de acrílico com 110 mm de diâmetro interno. A razão para se utilizar acrílico em vez de aço é a necessidade de se realizar filmagens do escoamento. As dimensões do espaço anular entre a barra central de aço (cor preta) e o tubo em acrílico são muito próximas daquelas do espaço anular na entrada da bomba J200N. A barra central simula o eixo que transmite o torque do motor para os rotores da bomba embora neste experimento simplificado não haja o movimento giratório. Isto se justifica pela dificuldade em se impor o movimento rotatório à barra neste experimento simples e, acima de tudo, pelo fato de que a intenção era apenas verificar a possível correlação entre fenômenos acústicos e hidrodinâmicos em um espaço anular e estudar os sinais ultrassônicos correspondentes.

A montagem auxiliar foi orientada verticalmente para facilidade de experimentação. Uma vez que a finalidade desta investigação preliminar é estudar os sinais ultrassônicos neste espaço anular, a orientação, vertical ou horizontal, não é um parâmetro relevante. Os fatores mais importantes são as dimensões da montagem, pois estas têm relação direta com as porções úteis dos sinais obtidos. O espaço anular era preenchido com água e o ar borbulhado pelo tampo inferior da montagem saía livremente pelo topo, aberto para a atmosfera. A FVG para cada vazão de ar era medida pelo inchamento da coluna de fluido.

A instrumentação ultrassônica, mostrada em detalhes na Figura 3-2, foi projetada de forma a coletar simultaneamente dados de atenuação acústica nos modos de transmissão

direta, reflexão lateral e pulso-eco. Os sensores foram instalados a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $135^\circ$  e  $180^\circ$ , sendo o sensor a  $0^\circ$  do tipo pulso-eco e os demais apenas receptores. A seção de teste ultrassônica foi posicionada a aproximadamente um metro abaixo da extremidade superior do tubo para que a medição fosse realizada em uma mistura mais uniforme e não afetada pela movimentação da interface com a atmosfera.

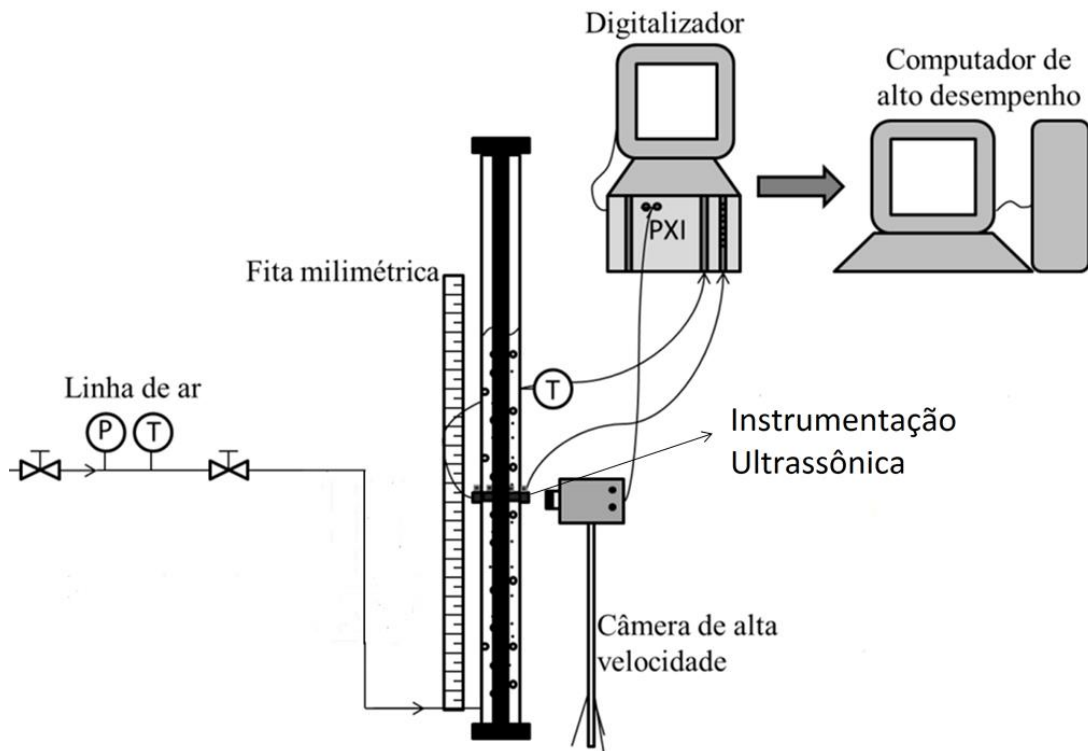


Figura 3-1: Montagem simplificada para estudo do escoamento na entrada da BCS (LabPetro-UNICAMP).

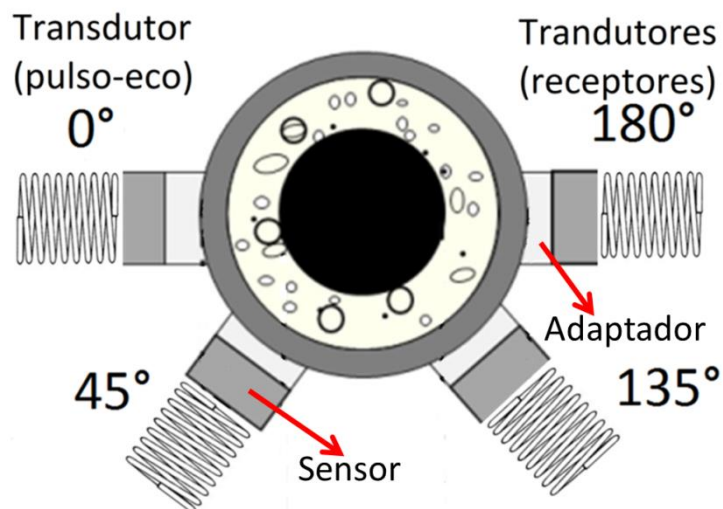


Figura 3-2: Detalhamento da instrumentação ultrassônica.

Os adaptadores entre os sensores e a tubulação foram feitos de acrílico, mesmo material utilizado no tubo, e foram usinados de forma a se obter um encaixe perfeito tanto na face dos sensores como com a parede do tubo. O sensor emissor/receptor utilizado é um Panametrics modelo DHC706-RM, de 2,25 MHz, de duplo elemento (Figura 3-3). Os demais sensores eram todos Panametrics modelo V106-RM, também de 2,25 MHz, porém de elemento único (Figura 3-3). Uma fina camada de vaselina foi aplicada em todas as interfaces sensor-adaptador e adaptador-tubo a fim de melhorar o contato mecânico entre as partes. Os adaptadores tinham comprimento de 10 mm e todos eles foram fixados com uma pressão constante por meio de molas. Nos cálculos do tempo de trânsito das ondas sonoras, a espessura da camada de vaselina foi desconsiderada.

A ideia principal que norteou essa configuração (Figura 3-2) foi que deveria existir um sensor em cada quadrante da circunferência do tubo; entretanto, considerando que o escoamento possui simetria radial do ponto de vista estatístico, somente metade da circunferência foi instrumentada. A referência adotada para posicionar cada sensor foi o sensor emissor ( $\theta=0^\circ$ ); a partir deste os demais foram alocados defasados de um determinado ângulo. No primeiro quadrante, o segundo transdutor foi instalado em  $\theta=45^\circ$  a fim de captar a energia refletida e refratada para esta região; um raciocínio análogo vale para o terceiro sensor instalado no segundo quadrante em  $\theta=135^\circ$ . Radialmente oposto ao transdutor emissor, o último sensor foi posicionado em  $\theta=180^\circ$  de modo a captar a porção do sinal transmitida através da fase contínua do escoamento. A aquisição simultânea de dados de todos os sensores permite uma visão mais clara dos mecanismos de dissipação acústica pelas várias estruturas gasosas presentes no escoamento. Mais ainda, com esses dados é possível fazer inferências acerca da topologia instantânea do escoamento e distribuição da fase dispersa na seção transversal da tubulação. A simplicidade desta montagem foi proposital, pois o objetivo principal é possibilitar a aplicação da técnica em tempo real na indústria de petróleo e gás.

Uma fotografia da montagem instrumentada é mostrada na Figura 3-4. Além da instrumentação ultrassônica, pode ser vista ainda a filmadora de alta velocidade com o foco voltado para a seção onde são realizadas as medidas acústicas.



Figura 3-3: Sensores de ultrassom utilizados (Gonçalves, 2013).

A aquisição de dados ultrassônicos foi feita a 20MHz a fim de evitar possíveis erros de *aliasing*. A aquisição foi feita por meio de uma placa de aquisição PXIe-1062Q da *National Instruments* utilizando o programa *LabView®*. A placa de aquisição foi instalada em uma plataforma PXI-Express, também da *National Instruments* (Figura 3-5). O tempo de amostragem e a taxa de geração de pulsos eram de 1,5 segundos e 2 kHz, respectivamente, o que corresponde a 3000 pulsos para cada amostra acústica. Cinco amostras foram obtidas para cada condição de operação. Os dados obtidos foram armazenados em planilhas do *Microsoft Excel* e, posteriormente, filtrados e tratados utilizando o programa *MatLab®*.

Para essa montagem simplificada, foram realizados testes em misturas bifásicas água-ar (Oliveira *et al.*, 2013) e óleo-ar. Foram realizados, inicialmente, testes sem a barra central para a fim de, posteriormente, se fazer uma comparação direta com os testes com a barra central. Em todos os experimentos foram colhidas cinco amostras para cada FVG. Para a montagem com o eixo central, a FVG foi variada de 0 a 20% em passos de 1%. Foram também realizadas filmagens à alta velocidade sincronizadas com o ultrassom. Todavia, devido ao tamanho dos arquivos gerados, as filmagens foram realizadas apenas para a primeira amostra coletada e para frações de vazão de 1 a 10% (em passos de 1%), 12%, 14%, 16%, 18% e 20%. Cada filme durou oito segundos e foi feito à taxa de 500 quadros por segundo.



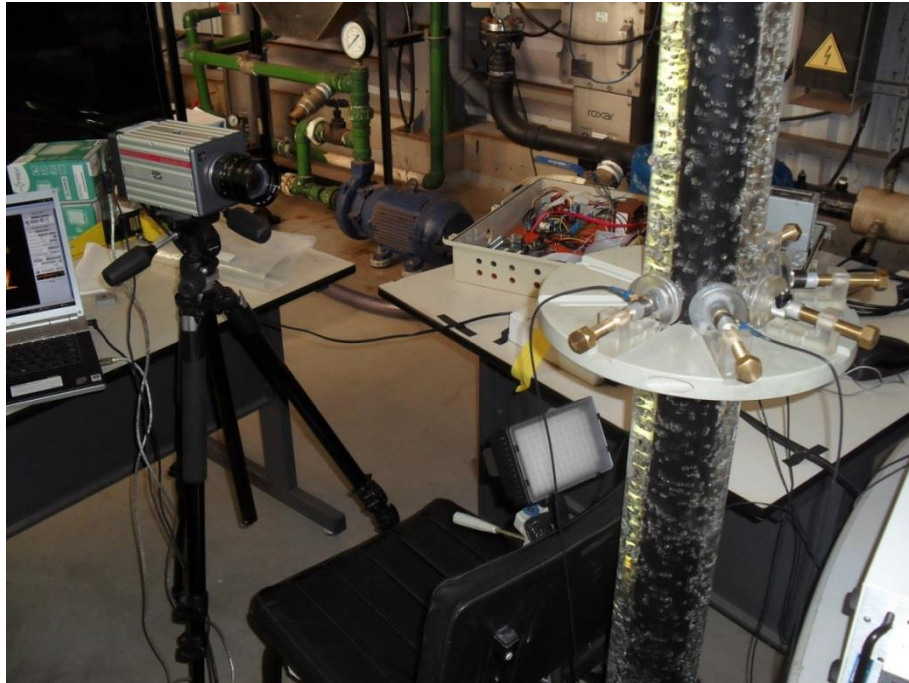


Figura 3-4: Fotografia da montagem simplificada com a instrumentação ultrassônica (LabPetro-UNICAMP).

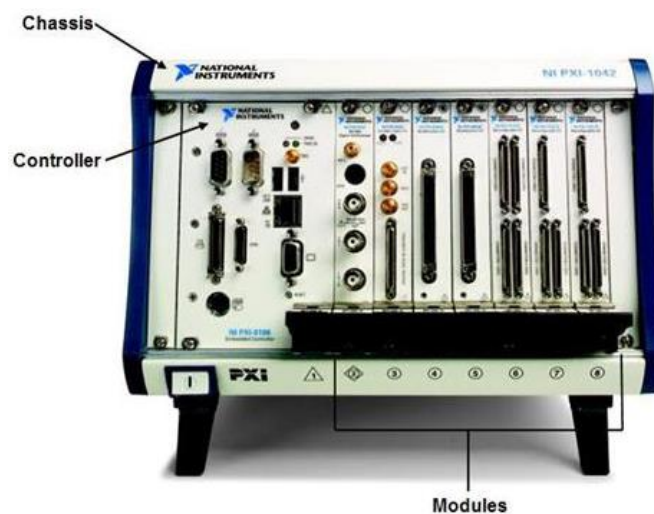


Figura 3-5: Plataforma PXI-Express da *National Instruments*.

Já para as misturas óleo-ar, tanto para o caso sem o eixo central quanto para o caso com o eixo central, a FVG foi variada de 0 a 12% em passos de 1%. Como no caso das misturas água-ar, os experimentos com eixo central foram filmados para ser possível a análise dos padrões de escoamento. As filmagens foram realizadas para a primeira amostra ultrassônica para condições de 1, 2, 3, 5, 7, 9 e 11 % de FVG.

### 3.2 Conjunto de Bombeio Centrífugo Submerso Horizontal

Este dispositivo experimental, mostrado esquematicamente na Figura 3-6, se encontra no LabPetro-UNICAMP. A bomba foi instalada horizontalmente devido à dificuldade de se montar a bomba na posição vertical. O grande comprimento da bomba e as altas rotações envolvidas, aliados aos escoamentos bifásicos líquido-gás nos testes, poderiam causar problemas de vibração. Embora estas bombas sejam mais comumente montadas na posição vertical, deve-se também ter em mente que existem casos onde bomba é instalada horizontalmente, como é o caso das SKID BCS utilizadas pela Petrobras.

A bancada de ensaio consiste de uma bomba J200N, sistema de alimentação da água e sistema de alimentação de ar, motor elétrico, e sistema de aquisição de dados. A vazão nominal da bomba é de 1.119 m<sup>3</sup>/dia. O diâmetro na entrada da bomba é 104 mm e o diâmetro do eixo que faz a ligação entre o motor e a bomba é 44,5 mm. Devido à presença deste eixo, forma-se um espaço anular por onde os fluidos irão escoar, conforme já discutido acima com relação a bombas instaladas em poços de petróleo. O motor elétrico é controlado por um inversor de frequência, o que torna possível o controle da rotação e da vazão da bomba. Uma bomba auxiliar (*booster*) é responsável por controlar e manter a pressão na entrada da BCS. A vazão de líquido era medida por um medidor Coriolis localizado à jusante da BCS e do ponto de injeção de ar. O sistema de aquisição de dados armazenava valores de pressão e temperatura na entrada e na saída da BCS. O sistema de ar comprimido consistia de uma linha de ar comprimido com um laminador para controlar a vazão mássica de gás e um adaptador na entrada da bomba onde foram inseridos os bicos de injeção de gás.

Para realização dos experimentos nesta montagem, foi construído um suporte para os transdutores ultrassônicos em polipropileno, inserido entre a entrada da bomba e a admissão de ar. Esse adaptador foi montado devido ao fato do aço atenuar muito o sinal ultrassônico. A distância resultante entre os pontos de coleta de dados ultrassônicos e de injeção de ar foi de aproximadamente 20 cm. O aparato ultrassônico é idêntico àquele utilizado no experimento simplificado. O transdutor pulso-eco foi posicionado na parte inferior da tubulação (0°), ficando o transdutor de 180° na parte superior da tubulação. A Figura 3-7 mostra o suporte onde foram fixados os transdutores ultrassônicos e a Figura 3-8 mostra aparato ultrassônico montado na entrada da bomba.

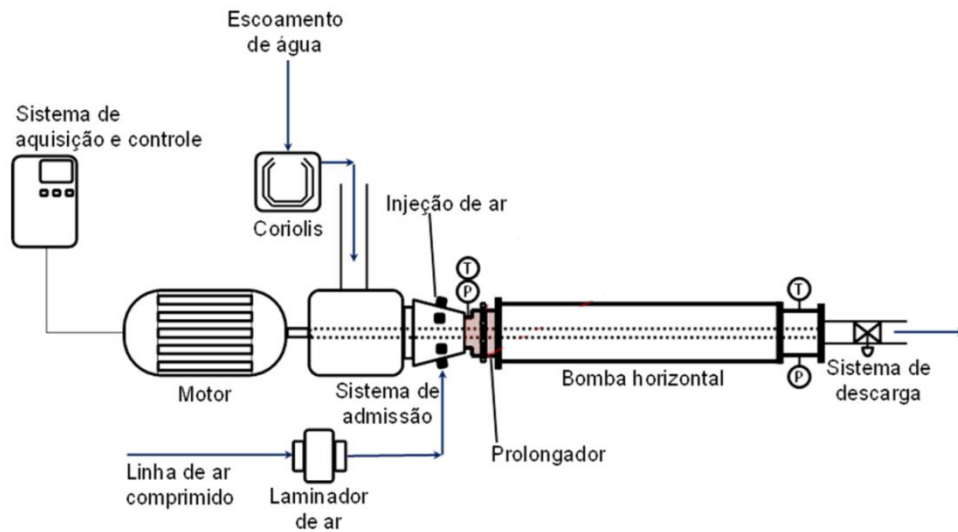


Figura 3-6: Aparato experimental na montagem em uma bomba centrífuga real.

Os experimentos foram realizados para misturas bifásicas água-ar. Foram realizadas quatro baterias de testes, variando-se os seguintes parâmetros: pressão de entrada da BCS, rotação, vazão mássica de ar e vazão volumétrica de água. A Tabela 3-1 mostra as condições de operação para as quais foram coletados os dados ultrassônicos. Estas condições operacionais foram selecionadas de modo a testar a bomba operando dentro e fora de região de intermitência (Figura 2-3). A região de intermitência, região hachurada da Figura 3-9, foi determinada experimentalmente verificando-se continuamente a altura de elevação da bomba. Quando a altura de elevação da bomba diminuía com a diminuição da vazão de líquido, sabia-se que a bomba estava operando na região de intermitência.

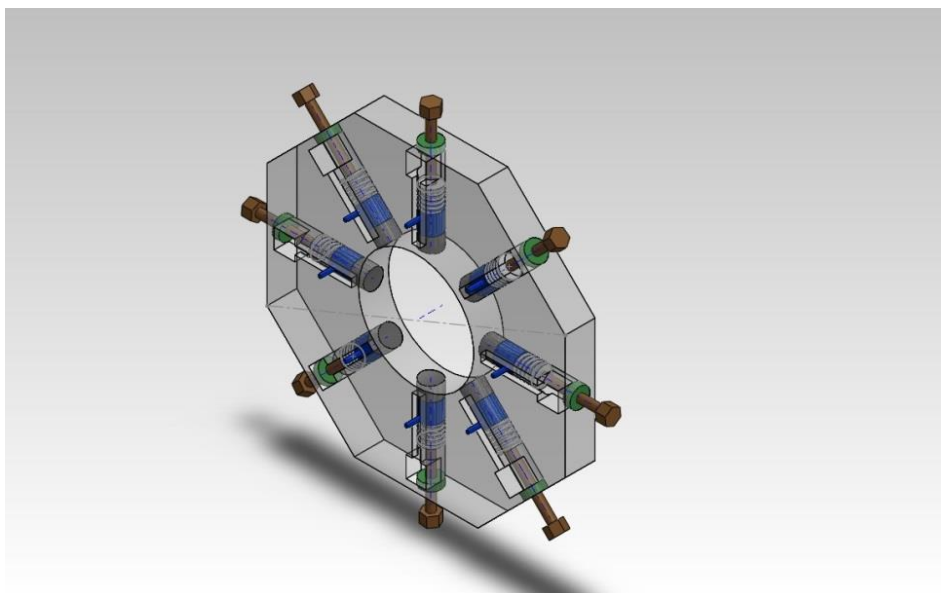


Figura 3-7: Prato de suporte dos transdutores ultrassônicos.

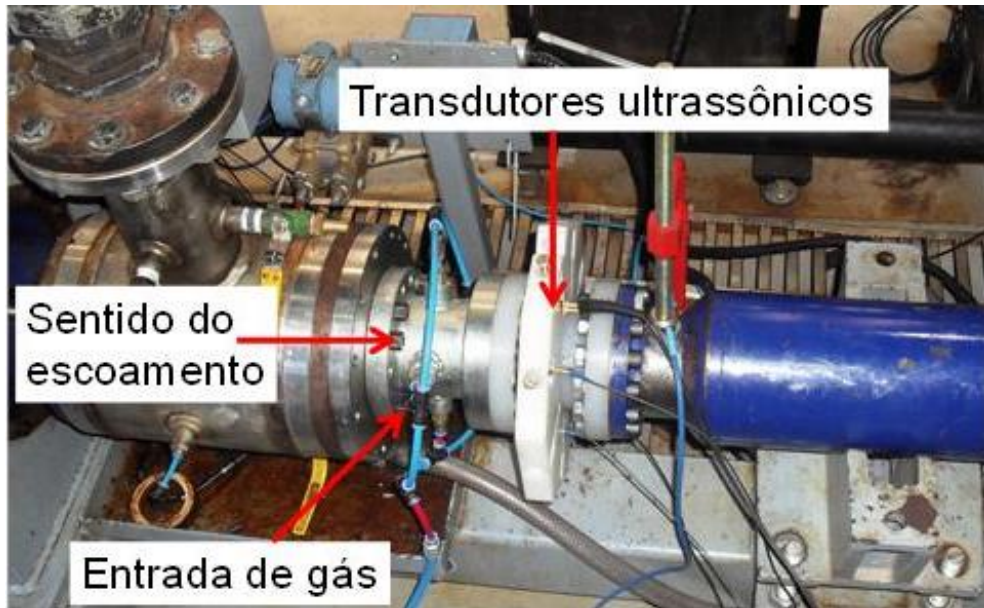


Figura 3-8: Aparato ultrassônico montado na entrada da BCS (LabPetro – UNICAMP).

Tabela 3-1: Condições de operação para aquisição dos dados ultrassônicos.

Série	$P_i$ [kPa]	RPM	$m_g$ [kg/h]	$m_f$ [m <sup>3</sup> /h]
1	100	1800	1, 2 e 3	10 a 27
2	100	3000	1, 2 e 3	7 a 41
3	200	1800	1, 2 e 3	12 a 28
4	200	3000	1, 2 e 3	8 a 36

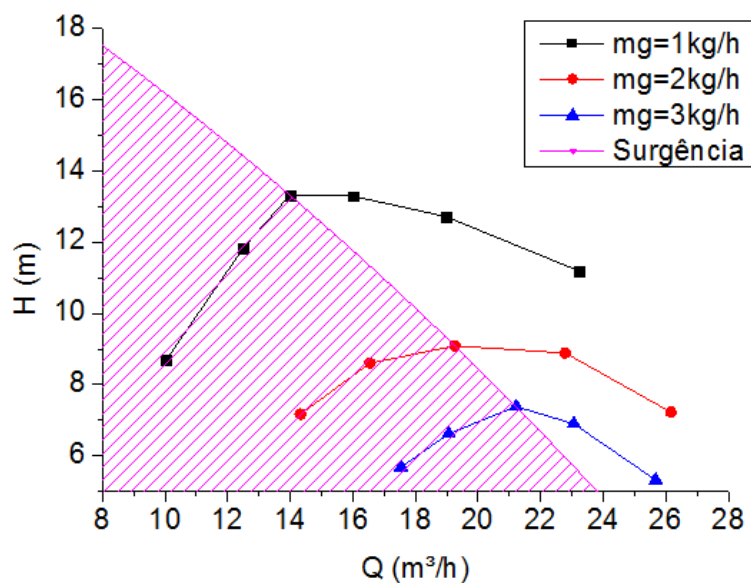


Figura 3-9: Altura de elevação em função da vazão de líquido (1800 RPM e 100 kPa).

## 4. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DO CONJUNTO BCS HORIZONTAL

Devido à inexistência de um método ou dispositivo independente para medida da FVG no conjunto BCS horizontal do LabPetro-UNICAMP (Figura 3-6), foram realizadas simulações numéricas tridimensionais dos escoamentos na entrada da bomba para as mesmas condições utilizadas nos ensaios discutidos no capítulo anterior. A realização destas simulações requereu estreita cooperação com o Prof. Nicolas Rios Ratkovich (*Universidad de los Andes, Bogotá, Colômbia*) e seus colaboradores Hugo Alejandro Pineda Pérez e Fabio Andrés López Gil. Com base nas informações geométricas e operacionais que lhes foram fornecidas pelo presente autor, o grupo liderado pelo Prof. Nicolas Ratkovich realizou simulações numéricas dos escoamentos para todas as condições mostradas na Tabela 3-1.

A estreita interação com estes pesquisadores da área de mecânica de fluidos computacional permitiu tornar o modelo numérico o mais fiel possível à realidade, observados os limites computacionais. Os resultados numéricos para a FVG na posição da estação ultrassônica (Figura 3-6) foram então comparados diretamente com as medidas ultrassônicas de tempo de trânsito de atenuação acústica. Foi possível também destas simulações numéricas depreender aspectos mais gerais da topologia do escoamento bifásico na entrada da bomba. O Apêndice A apresenta um relato detalhado das simulações numéricas realizadas, incluindo os resultados para a FVG e os gráficos para a configuração dos escoamentos para as condições da Tabela 3-1.

## 5. ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS COM A MONTAGEM SIMPLIFICADA

Como descrito anteriormente, foram realizados testes com misturas bifásicas água-ar e óleo-ar para as montagens simplificadas com e sem o eixo central. Para cada uma destas montagens, foram realizadas análises do padrão de escoamento, dos parâmetros acústicos e da sincronização dos sinais ultrassônicos com as filmagens rápidas.

### 5.1 Resultados para Misturas Bifásicas Água-Ar

Os resultados obtidos por Oliveira (2012) mostraram que é possível obter uma correlação entre a FVG do escoamento e a energia média recebida pelos transdutores para escoamentos líquido-gás em um espaço anular formado pela tubulação e pela barra central (Figura 5-1). Foi também possível fazer inferências sobre a estrutura da fase gasosa com base nos resultados dos pulsos ultrassônicos individuais sincronizados com as filmagens rápidas (Figura 5-2). Estes resultados mostraram a possibilidade de se utilizar a técnica ultrassônica para monitorar o escoamento bifásico na entrada de uma BCS real, abrindo caminho para os estudos posteriores apresentados nesta dissertação.

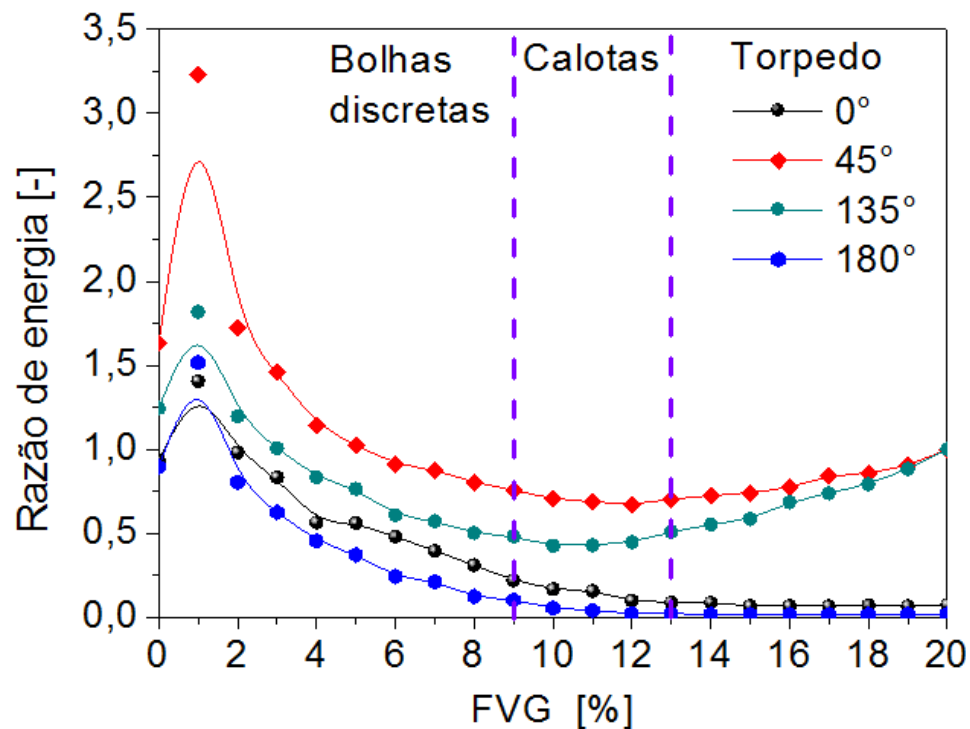


Figura 5-1: Razão de energia média em função da FVG (Oliveira, 2012).



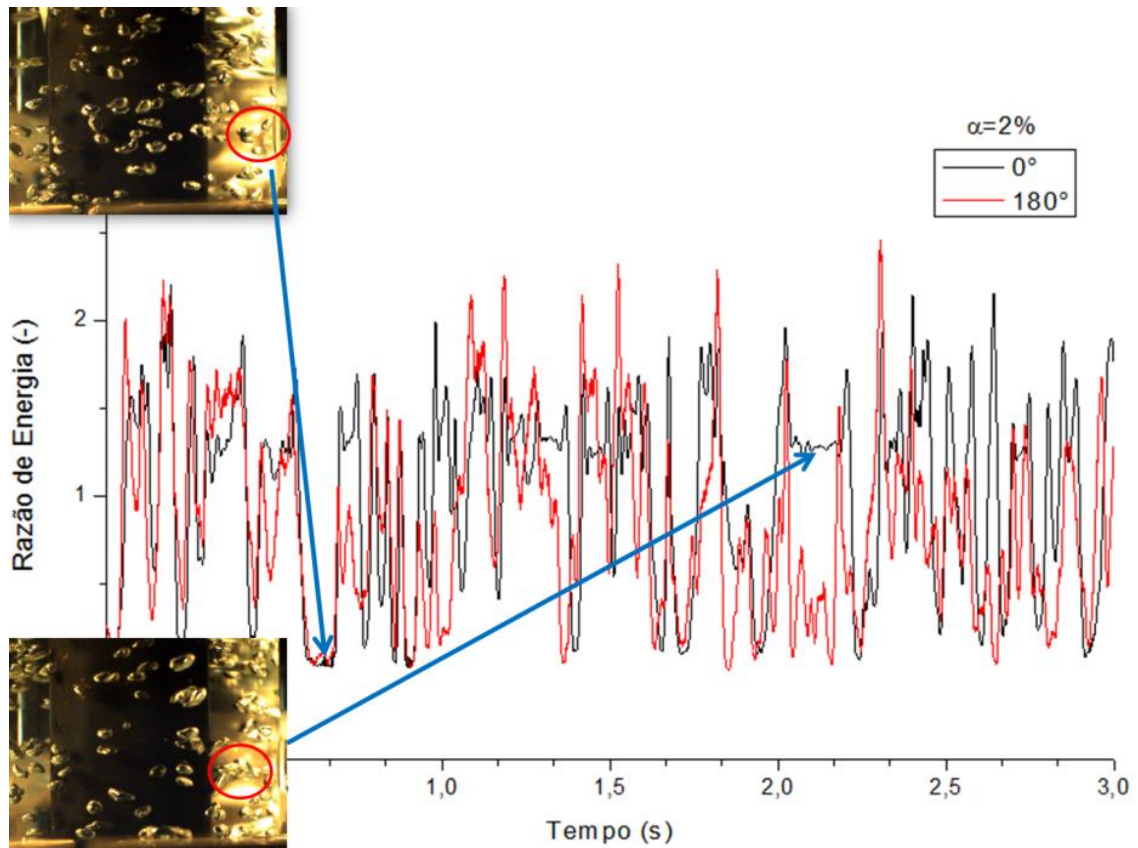


Figura 5-2: Exemplo de sincronização entre pulsos ultrassônicos individuais e filmagens rápidas (Oliveira, 2012).

## 5.2 Resultados para Misturas Bifásicas Óleo-Ar

Nestes experimentos, a tubulação foi preenchida com óleo mineral USP e o ar foi borbulhado pela parte inferior da tubulação. A FVG foi variada de 0 a 12 % em passos de 1%; para cada condição, foram obtidas cinco amostras ultrassônicas. As filmagens simultâneas foram realizadas para a primeira amostra das condições 1, 3, 5, 7, 9 e 11% de FVG.

### 5.2.1 Análise dos padrões de escoamento

Inicialmente foram estudados os padrões de escoamento em função da FVG, pois informações sobre os padrões simplificam substancialmente a análise e a compreensão dos sinais ultrassônicos. Conforme mostrado na Figura 5-3a, para FVG = 1% já se observa a formação de pequenas calotas e a presença de pequeníssimas bolhas em toda a tubulação. Para FVG  $\approx$  7%, apareceram os primeiros “torpedos”, semelhantes às bolhas de Taylor. Para essa concentração, é possível verificar grande concentração de bolhas diminutas. Estas bolhas muito pequenas atenuam ainda mais os sinais acústicos devido ao maior espalhamento do

feixe ultrassônico. Com o aumento da FVG de 1 a 5%, verificou-se o aumento do tamanho das calotas e do número das pequenas bolhas (Figura 5-3 *a, b, c*). Os torpedos formados a partir de  $FVG = 7\%$  aumentaram de comprimento à medida que se aumentou a concentração de gás (Figura 5-3 *d, e, f*).

A análise dos vídeos mostrou também uma grande turbulência no escoamento. As bolhas não seguiam uma trajetória ascendente retilínea, mas sim uma trajetória espiralada em torno do tubo central. Porém, a turbulência verificada foi ainda muito menor do que nas misturas água-ar devido à grande viscosidade do óleo USP comparada à da água. Além disso, as bolhas menores pareciam se mover na esteira de bolhas maiores que as precediam. Conforme se verá adiante, estas informações sobre as estruturas gasosas permitem compreender e fazer inferências sobre os resultados para os sinais ultrassônicos.

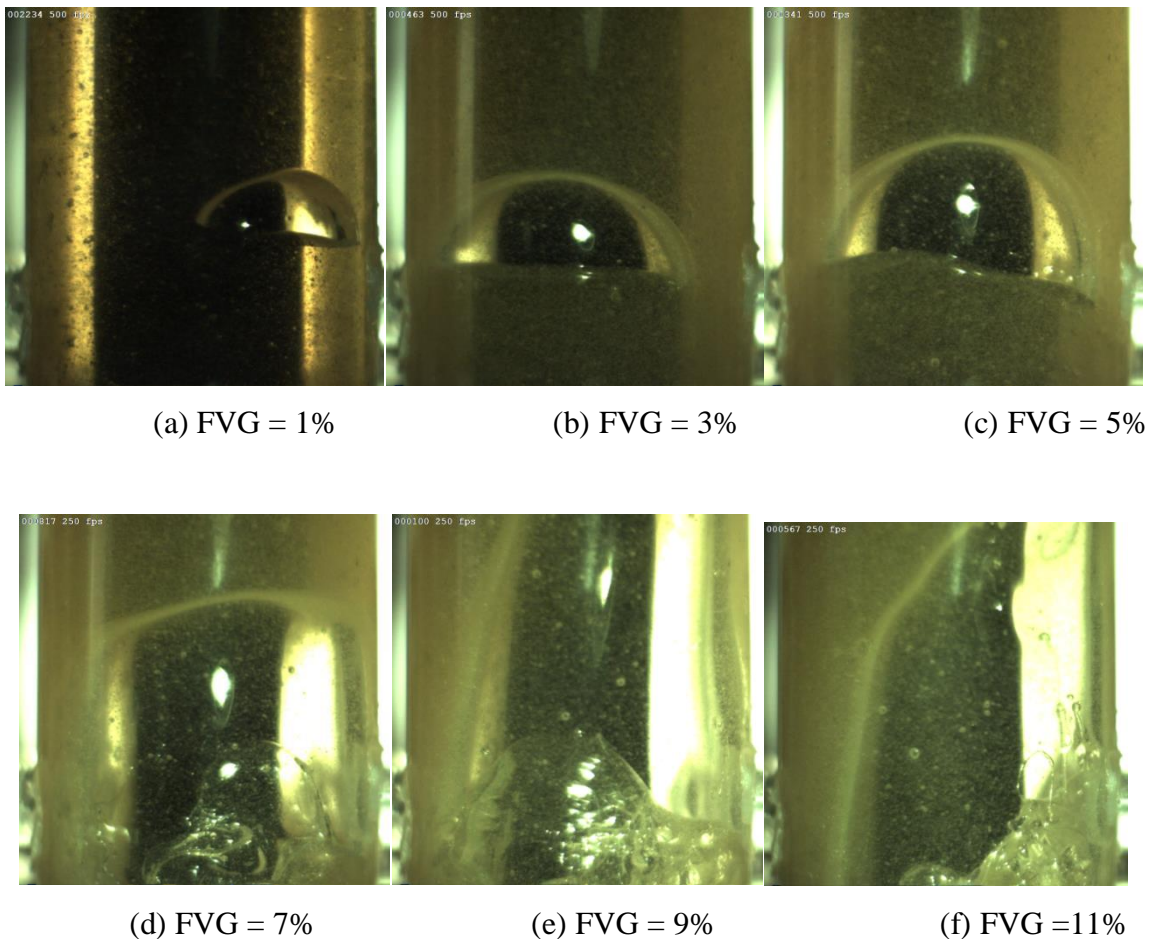


Figura 5-3: Padrões em função da FVG: calotas (a, b, c); torpedos (d, e, f).



### 5.2.2 Análise dos sinais ultrassônicos

Tendo analisado os padrões e estruturas gasosas do escoamento, o próximo passo foi identificar as várias trajetórias acústicas e o tempo de trânsito das ondas que se propagam pelo aparato ultrassônico. Torna-se assim possível identificar as porções dos sinais acústicos que carregam informações relevantes sobre o escoamento e aquelas que podem ser descartadas. A Figura 5-4 mostra os pontos no aparato ultrassônico pertinentes à identificação das trajetórias acústicas e a Tabela 5-1 relaciona as velocidades de propagação da onda sonora nos materiais construtivos e fluidos utilizados neste aparato. A velocidade do som na água foi obtida da literatura e a velocidade do som no óleo foi obtida experimentalmente (Gonçalves, 2013).

Dos comprimentos das várias trajetórias acústicas e dos dados na Tabela 5-1, foi construída a Tabela 5-2, que mostra o tempo de trânsito para cada trajetória. O tempo de trânsito do sinal acústico é definido como o intervalo entre o instante em que o pulso é disparado e o momento em que ele atinge o receptor. São estes resultados para o tempo de trânsito que possibilitaram demarcar as assim chamadas “janelas de atividade”, isto é, as regiões dos sinais acústicos que correspondem efetivamente à passagem pela mistura bifásica. Concentrando-se doravante somente nestas regiões, é possível diminuir o tempo gasto em processamento dos sinais e o espaço de memória requerido para armazená-los. Esta demarcação das janelas de atividade é mostrada na Figura 5-5 à Figura 5-8.

Para fins de medição do escoamento bifásico, só interessam os picos referentes à onda longitudinal LW1 (Tabela 5-2), pois somente ela atravessa os fluidos contidos no espaço anular. Nem a onda longitudinal LW2 nem a onda transversal SW1 trazem em si qualquer informação sobre o escoamento e, a rigor, deveriam ser eliminadas dos sinais acústicos. Todavia, nem sempre isto é possível, pois algumas vezes ocorre a superposição da onda legítima LW1 com as ondas espúrias LW2 e SW1.

Conforme mostra a Figura 5-5, os sinais para as várias frações de vazio testadas foram superpostos a fim de se verificar onde havia variações do sinal e onde estes eram insensíveis à quantidade de gás no escoamento. Observa-se que os picos correspondentes ao caminho acústico A-B-H-B-A são próximos do valor calculado na Tabela 5-2 para o sensor a 0°. Um procedimento análogo foi adotado para os demais sensores. Estas demarcações das janelas permitem identificar, no programa de tratamento de dados, os limites inferior e superior do sinal digitalizado para tratamento posterior. O tempo total de aquisição de cada pulso ultrassônico é de 150  $\mu$ s, que corresponde ao tempo requerido para o sinal ultrassônico no

transdutor  $0^\circ$  atingir o outro lado da tubulação e retorne. As janelas de atividade para cada transdutor se localizam dentro desse intervalo de aquisição, como mostrado a seguir:

- Transdutor a  $0^\circ$ : 24,0 a 102,5  $\mu\text{s}$  (Figura 5-5);
- Transdutor a  $45^\circ$ : 24,0 a 150,0  $\mu\text{s}$  (Figura 5-6);
- Transdutor a  $135^\circ$ : 62,5 a 150,0  $\mu\text{s}$  (Figura 5-7);
- Transdutor a  $180^\circ$ : 62,5 a 75,0  $\mu\text{s}$  (Figura 5-8).

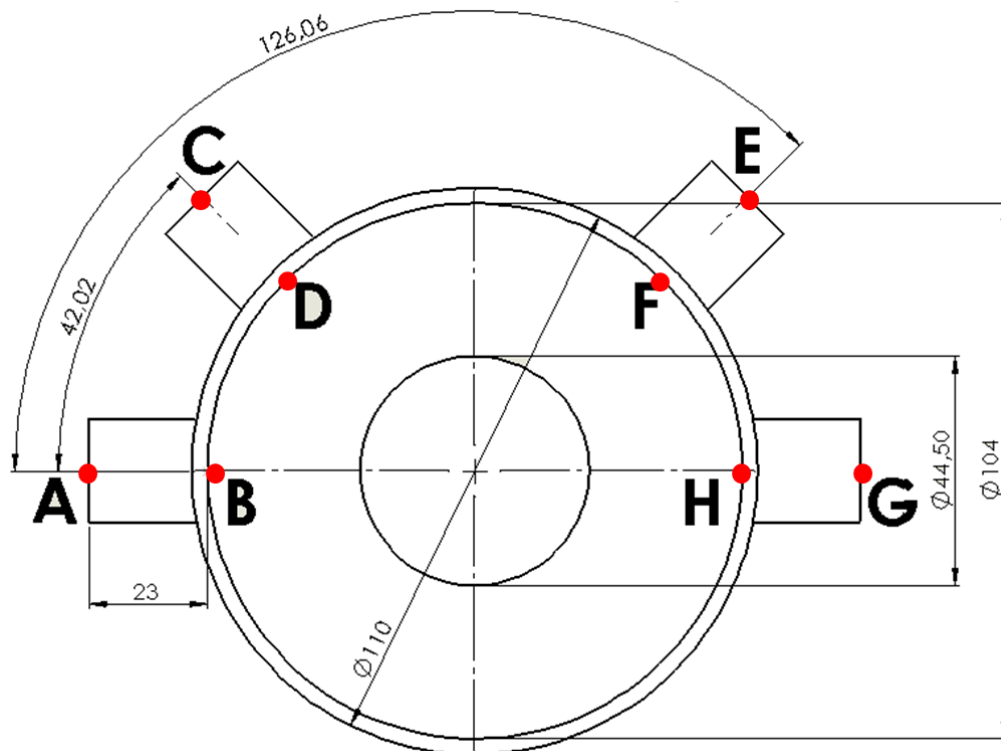


Figura 5-4: Pontos para identificação das trajetórias acústicas na montagem de simulação entrada da BCS.

Tabela 5-1: Velocidades de propagação do som.

Meio	Tipo de Onda	Velocidade de Propagação [m/s]
Acrílico	Longitudinal	2740
	Cisalhante	1400
Aço	Longitudinal	5980
	Cisalhante	3240
Água	Longitudinal	1480
Óleo	Longitudinal	1434

Tabela 5-2: Tempos de trânsito para as várias trajetórias acústicas.

Trajetória Acústica	Transdutor	Comprimento [mm]			Tempo de Trânsito [ $\mu$ s]			Tempo de Trânsito Total [ $\mu$ s]
		Acrílico	Óleo	Aço	Acrílico	Óleo	Aço	
<b>A-B-H-B-A</b>	0°	46	119	89	16,79	82,98	14,88	114,66
<b>A-B-aço-D-C</b>	45°	44,5	39,8 - 69,5	0	16,24	27,7 < t < 48,5	0	59,0 < t < 79,7
<b>A-B-aço-F-E</b>	135°	44,5	95,9-60,9	0 - 42,9	16,24	42,5 < t < 66,9	0 < t < 7,2	80,9 < t < 98,1
<b>A-B-H-G</b>	180°	46	59,5	44,5	16,79	41,49	7,44	65,72
<b>A-B-A</b>	0°	46	0	0	16,79	0	0	16,79
<b>A-B-D-C</b>	45°	86,52	0	0	31,58	0	0	31,58
<b>A-B-D-F-E</b>	135°	170,56	0	0	62,25	0	0	62,25
<b>A-B-D-F-H-G</b>	180°	209,36	0	0	76,41	0	0	76,41
<b>B-A</b>	0°	23	119	89	8,39	82,98	14,88	106,26

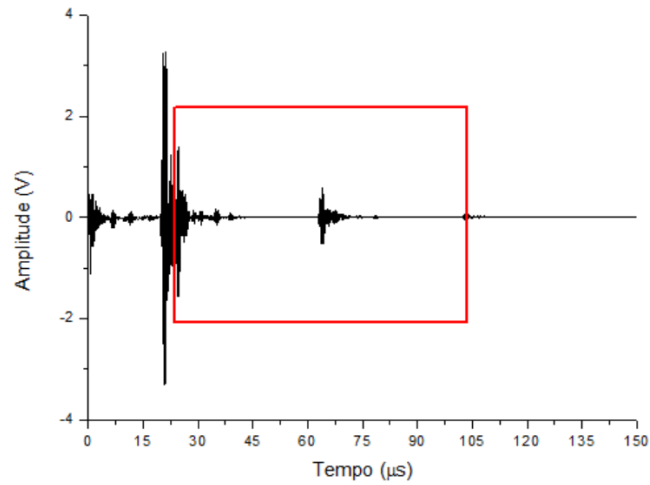


Figura 5-5: Demarcação da janela de atividade para o transdutor a  $0^\circ$ .

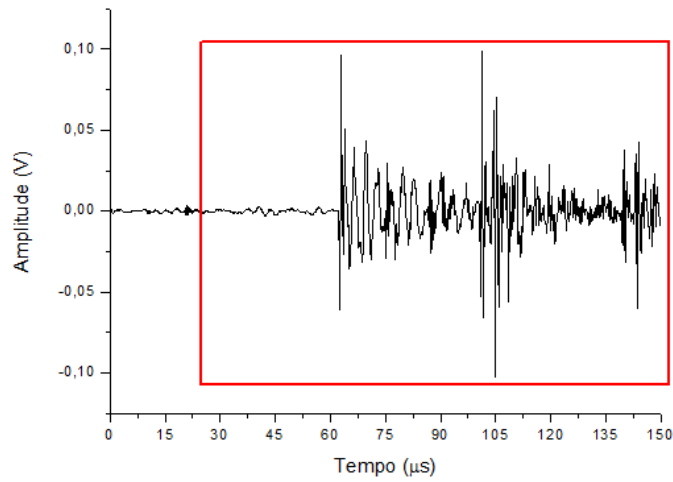


Figura 5-6: Demarcação da janela de atividade para o transdutor a  $45^\circ$ .

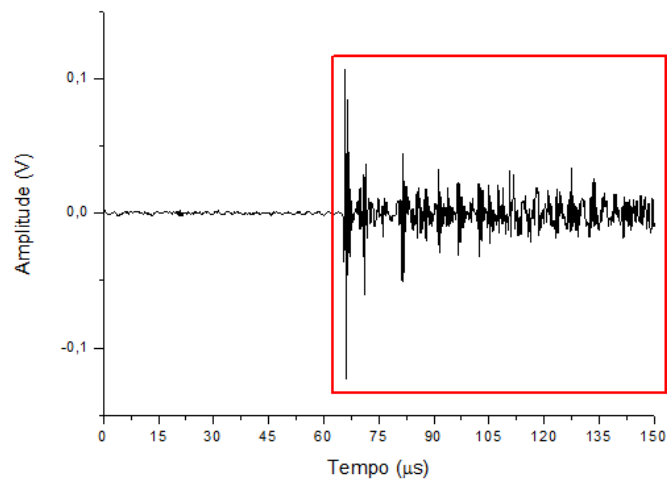


Figura 5-7: Demarcação da janela de atividade para o transdutor a  $135^\circ$ .

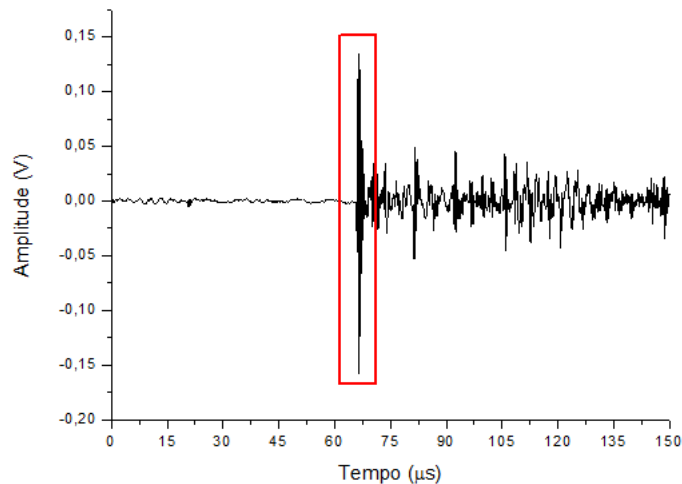


Figura 5-8: Demarcação da janela de atividade para o transdutor a 180°.

A razão de energia de cada pulso era então facilmente calculada a partir das formas de onda pela equação:

$$\frac{E_{2\emptyset}}{E_{1\emptyset}} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} I_{2\emptyset}^2 dt}{\int_{t_1}^{t_2} I_{1\emptyset}^2 dt} \quad (5.1)$$

Conforme discutido anteriormente, as referências para os transdutores a 0° e 180°, ou seja, o denominador da equação acima, eram os sinais correspondentes quando havia apenas óleo mineral na montagem. Esta condição corresponde também à máxima recepção de energia para estes transdutores. Porém, para os sensores a 45° e 135°, a condição de máxima recepção de energia ocorre quando há o máximo espalhamento do sinal, isto é, quando a seção transversal do tubo está com a maior concentração de bolhas discretas. Esta condição era identificada experimentalmente e utilizada como referência para os sensores a 45° e 135°.

As janelas de atividade demarcadas para o espaço anular nesta montagem simplificada, cujas dimensões são muito próximas daquele na entrada da bomba J200N, foram utilizadas para a análise descrita a seguir. Entretanto, devido a dificuldades experimentais encontradas no LabPetro-UNICAMP, o fluido utilizado para este estudo foi o óleo e o fluido de trabalho na bomba foi a água. Como a velocidade do som no óleo é diferente da velocidade do som na água, foram realizadas as devidas correções nas janelas de atividade para o caso da bomba.

## 6. ANÁLISE DOS RESULTADOS PARA O CONJUNTO BCS HORIZONTAL

Foram coletados dados para a bomba operando dentro e fora da região de intermitência a fim de verificar eventuais mudanças no sinal ultrassônico relacionadas especificamente a este fenômeno. Os sinais ultrassônicos obtidos foram analisados segundo duas técnicas diferentes: atenuação acústica e tempo de trânsito. A seguir, são discutidos os resultados desta análise.

### 6.1 Análise da Atenuação Acústica

Nesta análise, foram calculadas as razões de energia para cada um dos transdutores. A Figura 6-1 à Figura 6-3 mostram que o eixo central causa uma forte atenuação nos sinais nos transdutores a 45°, 135° e 180°. Este comportamento foi verificado para todas as condições estudadas. Já o transdutor a 0° (Figura 6-4 à Figura 6-7) apresentou comportamentos muito distintos dependendo das condições de operação, não sendo, portanto, possível estabelecer uma relação funcional única e confiável entre atenuação acústica e a FVG. Além disso, não se observou em nenhum caso uma diferença significativa na razão de energia quando a bomba começava a operar dentro da região de intermitência.

Assim sendo, decidiu-se, por ora, pela exclusão da razão de energia como parâmetro acústico para monitoramento de bombas centrífugas submersas. O próximo passo foi verificar a possibilidade de fazê-lo utilizando o tempo de trânsito da onda sonora.

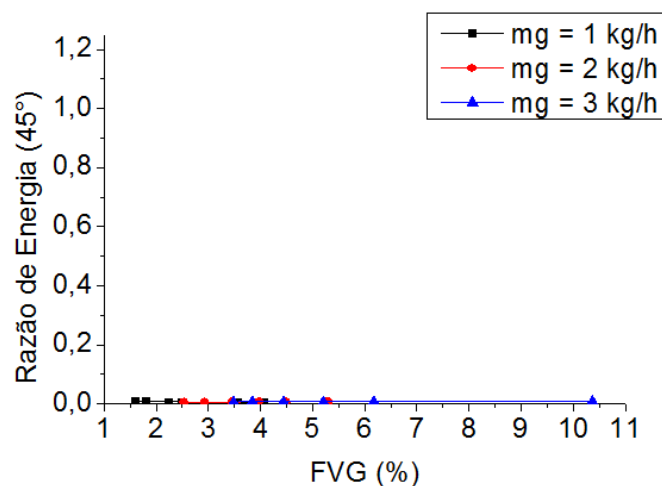


Figura 6-1: Razão de energia para o transdutor a 45° (1800 RPM e 200 kPa).

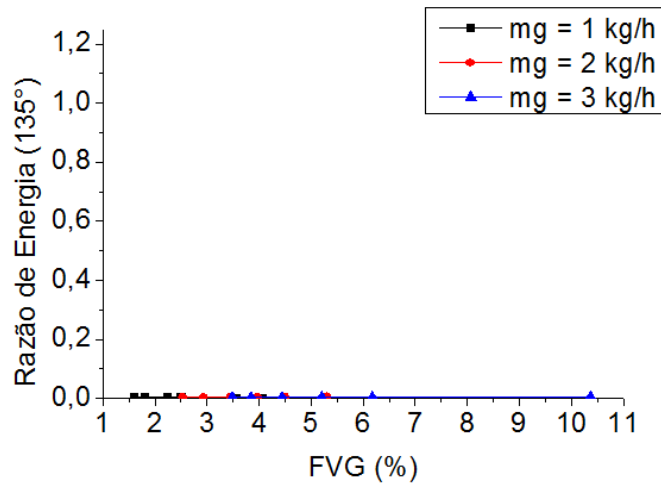


Figura 6-2: Razão de energia para o transdutor a 135° (1800 RPM e 200 kPa).

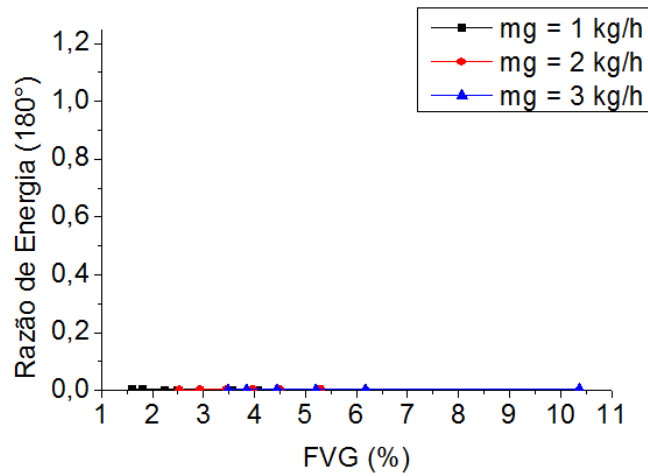


Figura 6-3: Razão de energia para o transdutor a 180° (1800 RPM e 200 kPa).

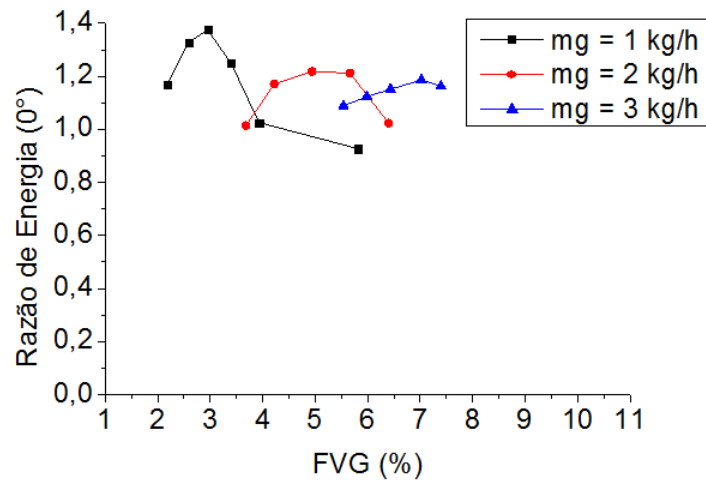


Figura 6-4: Razão de energia para o transdutor a 0° (1800 RPM e 100 kPa).

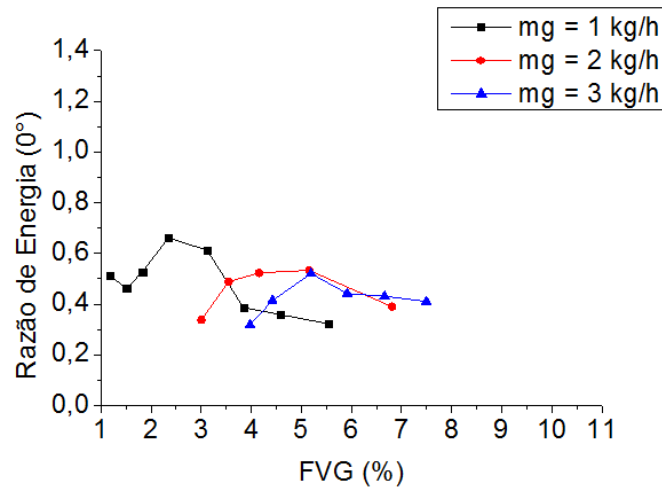


Figura 6-5: Razão de energia para o transdutor a 0° (3000 RPM e 100 kPa).

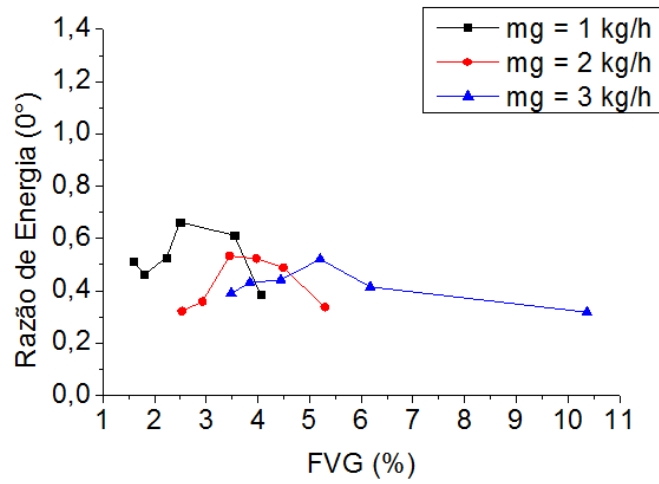


Figura 6-6: Razão de energia para o transdutor a 0° (1800 RPM e 200 kPa).

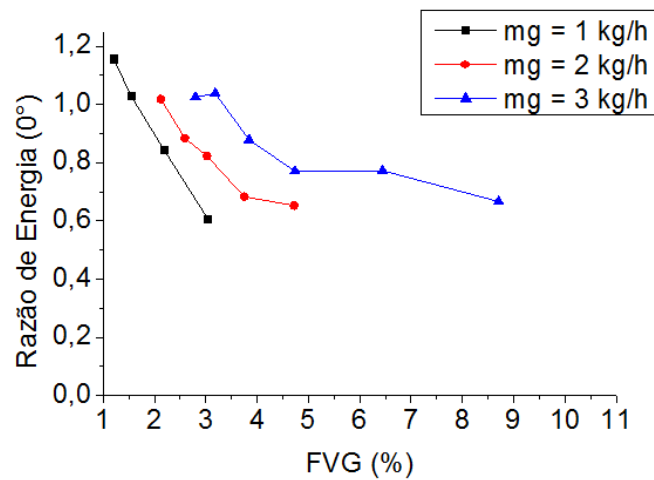


Figura 6-7: Razão de energia para o transdutor a 0° (3000 RPM e 200 kPa).



## 6.2 Análise dos Tempos de Trânsito

A Figura 6-8 mostra uma vista esquemática da trajetória do sinal ultrassônico no espaço anular. O tempo necessário para o sinal ultrassônico sair do transdutor, atingir o eixo central e retornar ao transdutor é de aproximadamente 62  $\mu\text{s}$ . A Figura 6-9 mostra o tempo de trânsito em função do tempo de aquisição do sinal ultrassônico para três valores de FVG diferentes. Para FVG=3,1% é possível verificar que a maior parte dos sinais atinge o eixo central, interceptando apenas poucas bolhas dispersas no escoamento. A variação do tempo de trânsito associado à interceptação destas bolhas dispersas indica que elas estão espalhadas aleatoriamente no espaço anular. Com o aumento da FVG para 4%, ocorre um aumento na população de bolhas e elas permanecem próximas ao eixo. Já para FVG = 6,8 %, percebe-se um aumento tanto na população de bolhas quanto no seu tamanho. Este aumento do tamanho das bolhas é medido pelo aumento do tempo de residência das bolhas em frente ao transdutor.

Estas tendências mostram a possibilidade de se utilizar o tempo de trânsito para localizar interfaces líquido-gás no espaço anular. Para cada condição de operação, um tempo de trânsito médio foi calculado – Equação 6.1 – e esses valores foram relacionados aos valores de FVG calculados numericamente conforme discutido no Capítulo 4 e Apêndice A. Na equação abaixo,  $t_m$  é o tempo de trânsito médio,  $tt$  é o tempo de trânsito instantâneo medido para cada pulso individual,  $\Delta t$  é o tempo de residência associado a cada valor de  $tt$  e  $t$  é o tempo de amostragem do sinal ultrassônico (7,5 segundos).

$$t_m = \frac{\sum tt \times \Delta t}{t} \quad (6.1)$$

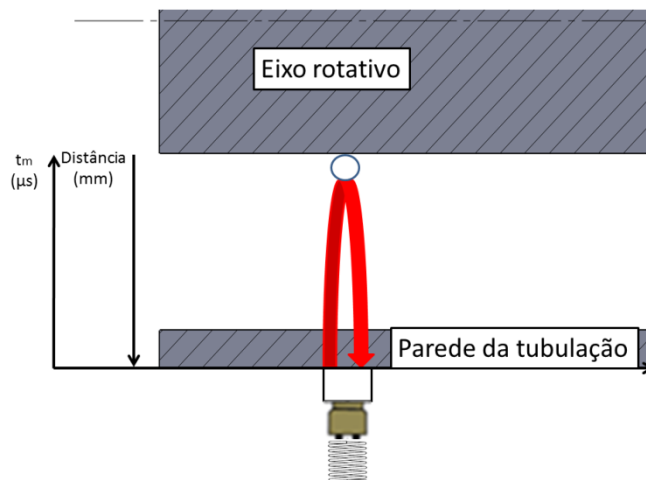


Figura 6-8: Vista esquemática do sinal ultrassônico no espaço anular

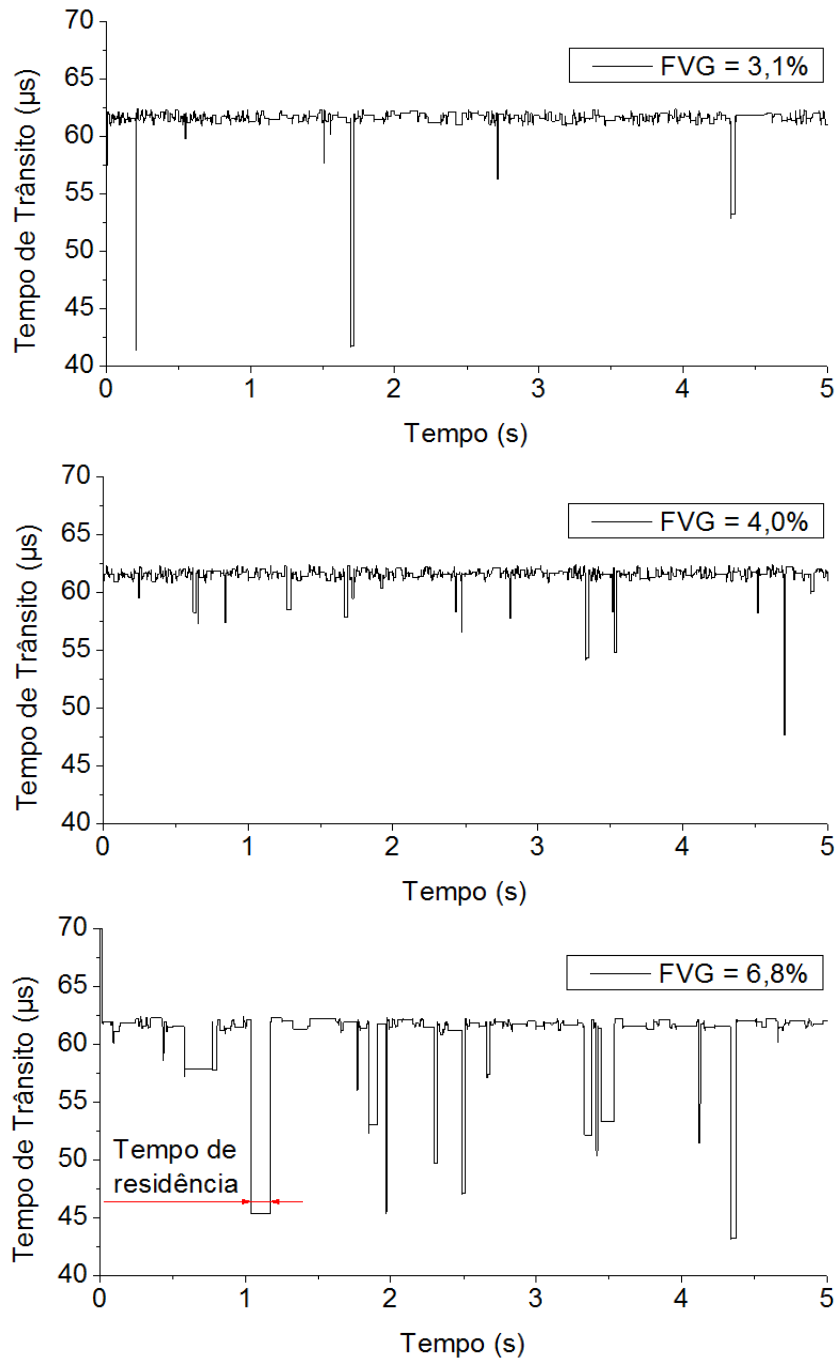


Figura 6-9: Tempo de trânsito em função do tempo de aquisição (1800 RPM e  $p_i = 200$  kPa).

O próximo passo foi verificar o efeito de cada um dos parâmetros variados durante o experimento (pressão na entrada da BCS, rotação e vazão mássica de gás) sobre o tempo de trânsito médio calculado conforme descrito acima. Os resultados desta análise são discutidos a seguir.

### 6.2.1 Efeito da pressão

Como mostra a Figura 6-10, para um mesmo valor de FVG, o tempo de trânsito é menor para a maior pressão. Isto significa que a fase gasosa está localizada em regiões mais distantes do eixo giratório para a maior pressão. Este comportamento foi verificado para todas as condições estudadas. Este efeito é mais visível para a maior rotação.

Uma explicação para este fenômeno é que, para maiores pressões, a fase gasosa fica mais densa e, conseqüentemente, afasta-se mais do eixo central devido ao aumento da força centrífuga sobre ela. Verifica-se também que, com o aumento da FVG, o efeito da pressão diminui. Isto pode significar que a população de bolhas na seção transversal está aumentando, logo, as variações nas posições das bolhas na seção transversal são menos aparentes.

Nos gráficos, são demarcadas as fronteiras para operação da bomba em intermitência. Para 1800 RPM, não existe nenhuma mudança brusca no valor do tempo de trânsito que indique esta transição. Entretanto, para 3000 RPM é possível verificar uma queda brusca no tempo de trânsito, indicando que o gás está mais distante do eixo quando a bomba entra na região de intermitência.

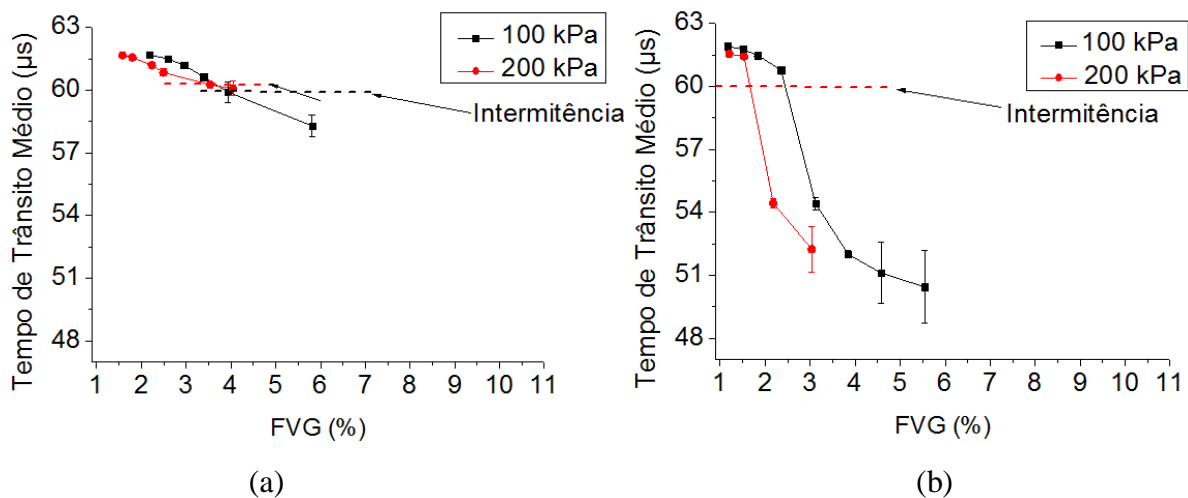


Figura 6-10: Tempo de trânsito médio em função da FVG: (a) 1800 RPM;  $m_g = 1$  kg/h e (b) 3000 RPM;  $m_g = 1$  kg/h.

### 6.2.2 Efeito da rotação

O efeito da rotação é mostrado na Figura 6-11. Para baixos valores de FVG, a rotação não parece ter qualquer efeito significativo sobre o tempo de trânsito médio. No entanto, com o aumento da FVG, verifica-se uma grande redução do tempo de trânsito para a maior rotação.

Para 100 kPa – Figura 6-11a – o tempo de trânsito estabiliza-se em aproximadamente 50  $\mu\text{s}$ ; um comportamento semelhante é verificado na Figura 6-11b. Observando a Figura 6-10 e a Figura 6-11, pode-se concluir que o efeito da rotação sobre a distribuição da fase gasosa no espaço anular é maior do que o efeito da pressão.

Novamente, foi demarcado nos gráficos o início da operação da bomba na região de intermitência. Mais uma vez, foi verificada uma diminuição brusca no tempo de trânsito quando a bomba passa a operar dentro da região de intermitência. Esta diminuição é maior para a maior rotação.

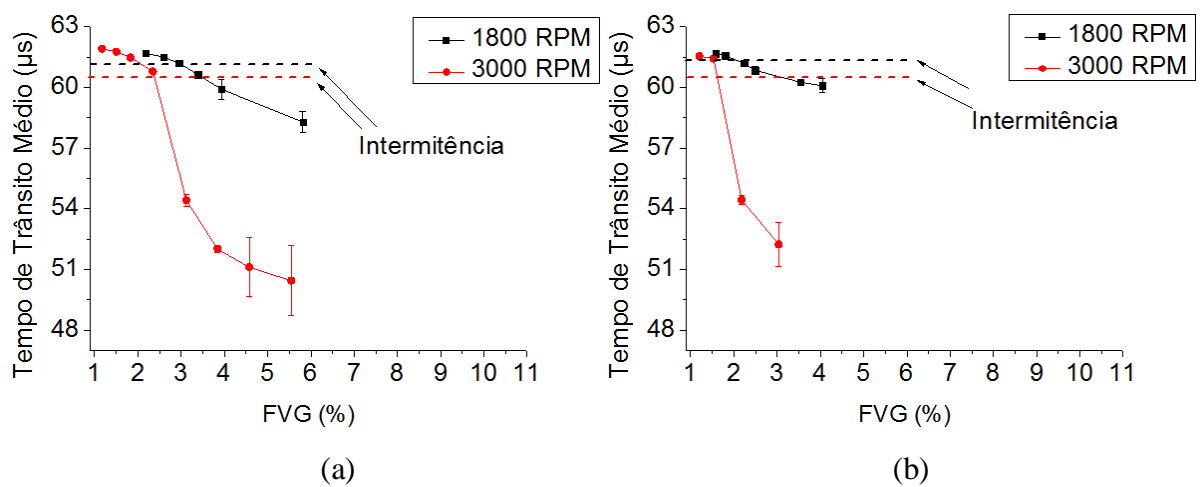


Figura 6-11: Tempo de trânsito médio em função da FVG: (a) 100 kPa;  $m_g = 1$  kg/h e (b) 200 kPa;  $m_g = 1$  kg/h.

### 6.2.3 Efeito da vazão mássica de ar

A Figura 6-12 mostra o efeito da vazão mássica de ar. Para as duas pressões, pode-se verificar que, para uma mesma FVG, quando a vazão mássica de ar aumenta, a fase gasosa tende a permanecer próxima ao eixo. Este efeito pode estar relacionado à maior velocidade da fase gasosa quando a vazão mássica de ar aumenta. Quanto maior a velocidade do ar, maior a turbulência e menos provável a coalescência das bolhas. Logo, menor será a força centrífuga sobre as bolhas, o que as mantém próximas ao eixo. Pode-se verificar novamente que a pressão tem pouco efeito sobre a distribuição da fase gasosa.

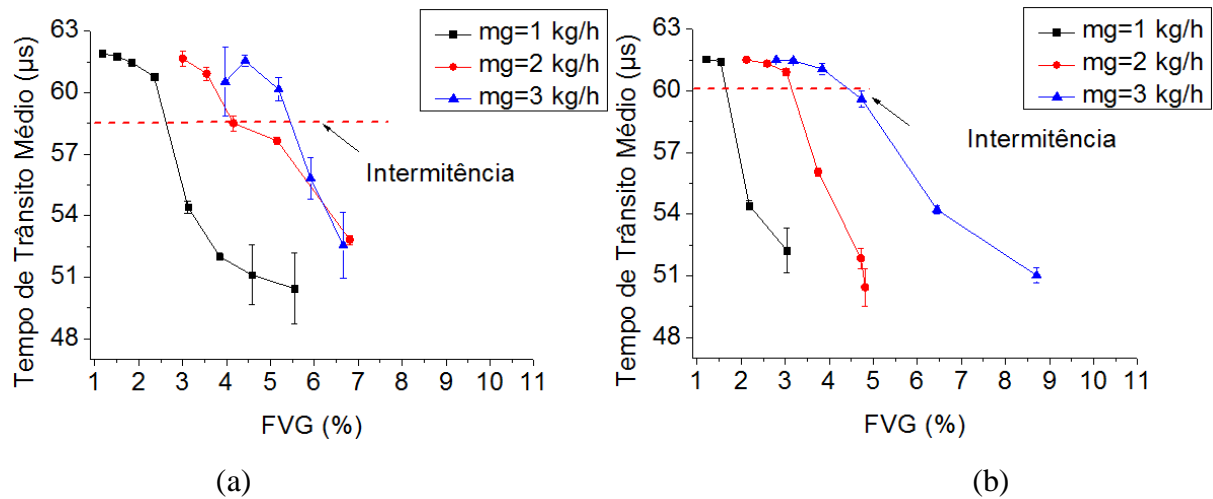


Figura 6-12: Tempo de trânsito médio em função da FVG: (a) 100 kPa, 3000 RPM; e (b) 200 kPa, 3000 RPM.

### 6.3 Identificação do Início da Intermitência

As figuras acima mostram que, entre todos os parâmetros estudados (rotação, pressão e vazão mássica de gás), a rotação é o parâmetro que mais afeta a distribuição da fase gasosa. Todavia, nenhum dos gráficos indicou uma mudança brusca na distribuição da fase gasosa para um determinado valor de FVG que pudesse ser associada ao início da intermitência na bomba. Entretanto, os gráficos acima mostraram que, para a maior rotação, o tempo de trânsito médio sofre uma queda brusca com o aumento da FVG quando a bomba começa a operar na região de intermitência. Todavia, esta diminuição brusca no tempo de trânsito não foi verificada para a menor rotação.

De qualquer maneira, em aplicações reais, as pressões envolvidas são muito maiores, o gás é mais denso, e as forças centrífugas maiores. Logo, é razoável esperar que, mesmo para rotações menores, o decréscimo do tempo de trânsito associado à intermitência irá ocorrer. Isto indica que o tempo de trânsito pode ser utilizado para monitorar a operação da bomba e verificar se a mesma está prestes a operar em intermitência. Além disso, simulações numéricas preliminares para as condições de operação mais frequentes da bomba podem indicar a melhor posição para instalação do aparato ultrassônico para detecção mais precisa da intermitência. A este respeito, as simulações numéricas no Apêndice A mostraram que o acúmulo de gás ao redor do eixo ocorreria também para 1800 RPM se o comprimento de entrada da bomba fosse maior. Isto é, o acúmulo de gás ao redor do eixo ocorreria em um ponto ocorre mais à jusante do ponto onde foi instalado o aparato ultrassônico. Portanto, existe a possibilidade da técnica ser utilizada, também, para rotações menores.

Finalmente, a possibilidade de se monitorar o desempenho da BCS diretamente utilizando a técnica ultrassônica concorrerá para a preservação de sua integridade. As informações fornecidas pela técnica podem auxiliar o operador na tomada de medidas preventivas destinadas a evitar que a bomba opere na região de intermitência. A produção seria assim menos afetada por este indesejável fenômeno.

## 6.4 Inferências sobre a Configuração do Escoamento no Espaço Anular

Para uma análise mais detalhada do escoamento no interior da tubulação, foram gerados gráficos com base no tempo de trânsito dos pulsos individuais e nos tempos de residência conforme mostrado na Figura 6-9. A fim de converter os tempos de residência em tamanho de bolhas, foi utilizada em primeira aproximação a velocidade superficial da fase gasosa. Futuramente, pretende-se integrar medidas da velocidade local das bolhas por efeito Doppler às medidas de atenuação acústica e tempo de trânsito da onda sonora. Será então possível obter uma visão mais refinada da configuração do escoamento no espaço anular. Os pontos escolhidos para esta análise correspondem a condições antes e depois do estabelecimento da intermitência na bomba. Para facilidade de visualização, estes pontos são mostrados em termos do tempo de trânsito médio na Figura 6-13.

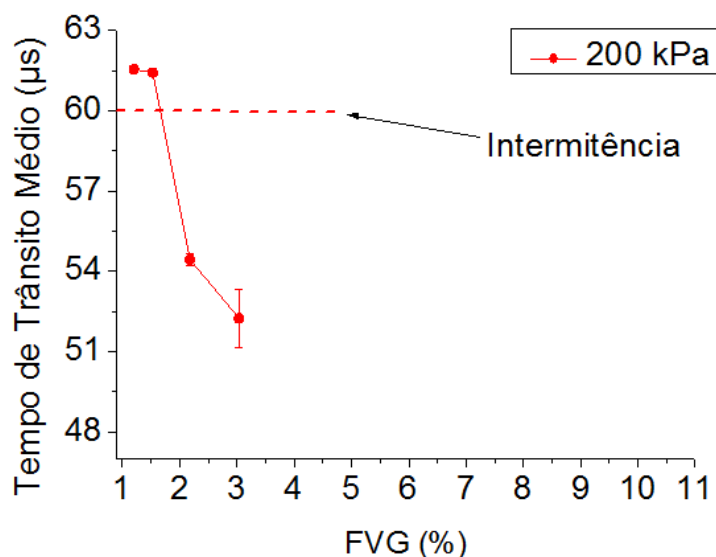


Figura 6-13: Pontos escolhidos para análise da configuração do escoamento na entrada da bomba (3000 RPM, 200 kPa,  $m_g = 1\text{kg/h}$ ).

A Figura 6-14 à Figura 6-17 mostram gráficos resultantes desta análise nos quais o eixo “x” corresponde a comprimentos calculados na direção axial em vez de tempo; o eixo “y”, também em unidades de comprimento, corresponde às distâncias radiais reais no espaço anular. Observa-se que, para operação fora da região de intermitência (Figura 6-14 e Figura 6-15), a fase gasosa se concentra em uma fina camada em torno do eixo, o que explicaria a ausência de sinal nos transdutores a 45°, 135° e 180°. Nos experimentos com a montagem simplificada, como o eixo não estava girando, não havia este acúmulo de gás em torno do eixo central, logo, parte do sinal, ainda que fraco, chegava aos transdutores receptores.

Para operação na região de intermitência (Figura 6-16 e Figura 6-17), o eixo giratório fica envolto pela fase gasosa. À medida que aumenta a FVG, a espessura desta camada de gás se torna mais regular, indicando coalescência das bolhas. A observação destes gráficos revela ainda que a seção transversal não fica completamente cheia de ar mesmo quando a bomba está operando na região de intermitência. Em outras palavras, esta não é uma condição necessária para que ocorra este fenômeno.

Outro fato observado para os casos onde ocorre a intermitência (Figura 6-16 e Figura 6-17) é que estruturas gasosas com tempos de residências maiores e que, em princípio, corresponderiam a bolhas coalescidas parecem se localizar em uma região preferencial da seção transversal. Na Figura 6-16 tem-se  $r \sim 28$  mm e na Figura 6-17 tem-se  $r = 30$  mm. Mesmo para uma espessura muito irregular da camada de gás em torno do eixo (Figura 6-16), a espessura média é ainda bem caracterizada.

Finalmente, estes resultados obtidos do tempo de trânsito da onda sonora, além de permitirem inferências importantes sobre a configuração do escoamento no espaço anular, evidenciam o potencial da técnica ultrassônica para aplicação na indústria petrolífera.

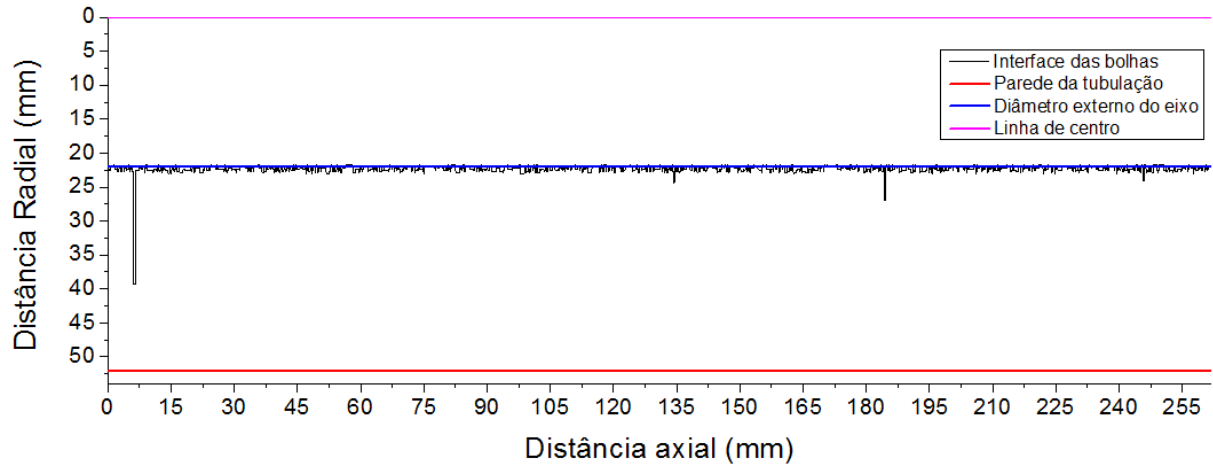


Figura 6-14: Configuração do escoamento detectada pelos pulsos individuais (FVG = 1,2 %  
3000 RPM, 200 kPa,  $m_g = 1\text{ kg/h}$ )

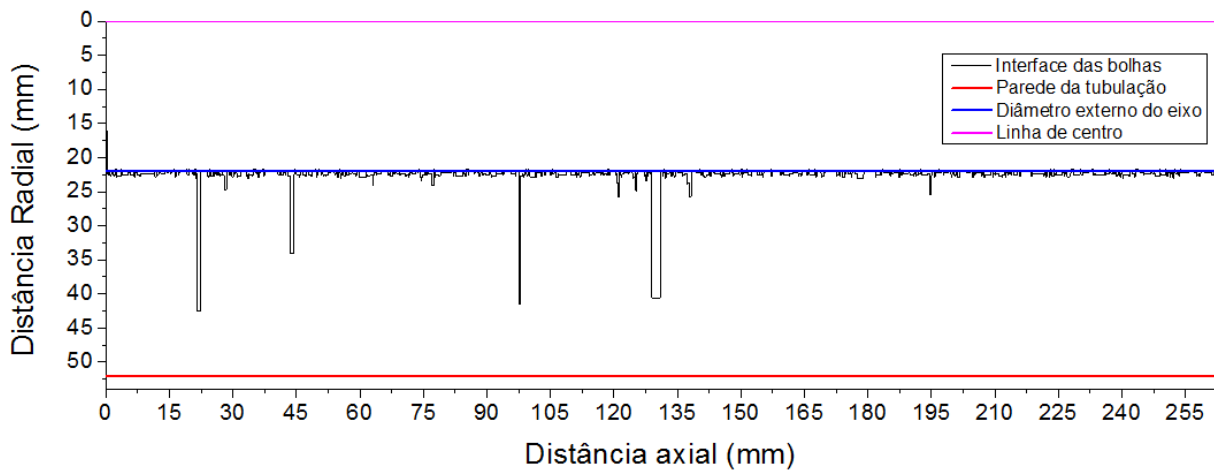


Figura 6-15: Configuração do escoamento detectada pelos pulsos ultrassônicos individuais  
(FVG = 1,5 % 3000 RPM, 200 kPa,  $m_g = 1\text{ kg/h}$ )



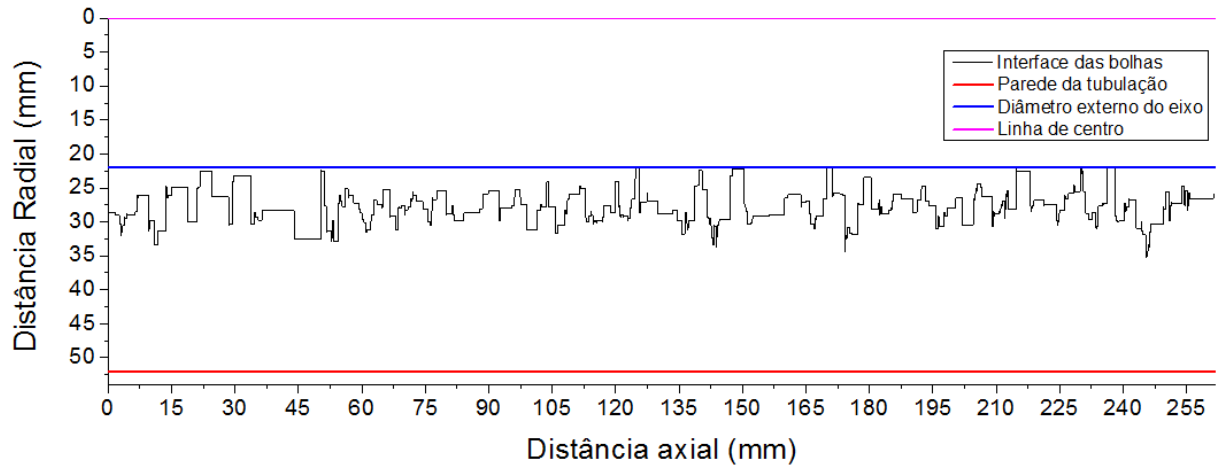


Figura 6-16: Configuração do escoamento detectada pelos pulsos ultrassônicos individuais  
(FVG = 2,2 % 3000 RPM, 200 kPa, mg = 1kg/h)

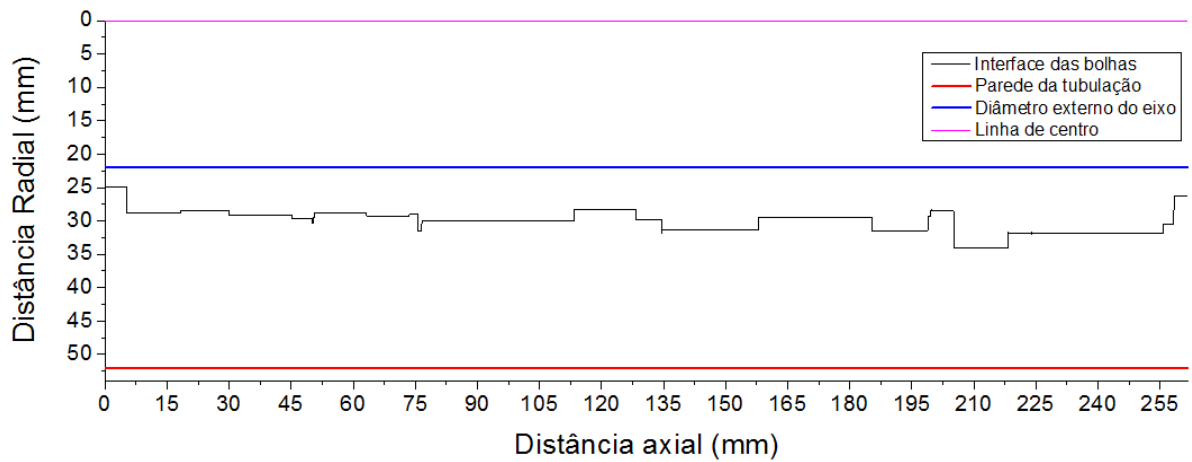


Figura 6-17: Configuração do escoamento detectada pelos pulsos ultrassônicos individuais  
(FVG = 3,0 % 3000 RPM, 200 kPa, mg = 1kg/h)

## 7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 7.1 Principais Resultados Obtidos

As principais conclusões tiradas deste trabalho foram:

- O eixo metálico central causa forte atenuação do sinal ultrassônico, o que faz a geometria da entrada de bombas centrífugas submersas diferir ainda mais de tubulações no que se refere à aplicação da técnica ultrassônica.
- Esta forte atenuação dos sinais pelo eixo central não permitiu obter sinais mensuráveis nos transdutores a  $45^\circ$ ,  $135^\circ$  e  $180^\circ$ .
- Os resultados para a atenuação acústica no transdutor a  $0^\circ$  apresentaram diferentes comportamentos para diferentes condições de operação, não tendo sido possível estabelecer uma relação entre a atenuação acústica e a FVG. Além disso, não foi encontrada nenhuma diferença significativa na razão de energia quando a bomba começava a operar na região de intermitência.
- O tempo de trânsito da onda sonora se mostrou o parâmetro adequado para monitorar o desempenho da bomba. Por meio deste parâmetro, foi ainda possível identificar o início da operação da bomba na região de intermitência.
- Com base nos dados das simulações numéricas e das informações obtidas pelos sensores ultrassônicos, pode-se afirmar que a rotação exerce o maior efeito na distribuição da fase gasosa no espaço anular na entrada da bomba.
- Mesmo na condição de intermitência, o gás não preencheu toda a seção transversal do espaço anular, mostrando que esta não é uma condição necessária para a ocorrência deste fenômeno.

### 7.2 Sugestões Para Trabalhos Futuros

As seguintes atividades são recomendadas para continuidade destes trabalhos:

- Aprimoramento da técnica de tratamento dos dados de modo a incluir métodos de filtragem dos sinais ultrassônicos, tornando os sinais mais claros e a análise mais simples.
- Incorporação de medidas de velocidade da fase gasosa por efeito Doppler que, em conjunto com as atuais medidas do tempo de trânsito, permitirão calcular o tamanho das bolhas no espaço anular.

- Realização de medidas ultrassônicas com fluidos reais na entrada da BCS.
- Desenvolvimento de uma rede neural para utilização especificamente com medidas ultrassônicas na entrada de bombas centrífugas submersas.

## REFERÊNCIAS

- Barriatto, L. C. (2014). Desempenho de Bombas Centrífugas Submersíveis em Escoamento Bifásico Gás-Líquido Graduação, UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - UNICAMP.
- CD-adapco. (2013). "Documentation." Retrieved 02/02/2014, 2013, from [https://support.cd-adapco.com/ViewDocs/authdocs/starccmplus\\_latest\\_en/index.htm#page/STARCCMP/navigatingHelp.001.1.html#26987](https://support.cd-adapco.com/ViewDocs/authdocs/starccmplus_latest_en/index.htm#page/STARCCMP/navigatingHelp.001.1.html#26987).
- Diego A. Narvaez, J. C. (2014). Gas Handling Device Boost Mississippi Line Production. Upstream Pumping Solutions.
- Gonçalves, J. L. (2013). Desenvolvimento de uma Técnica Ultrassônica para Medição da Concentração das Fases Dispersas em Escoamentos Multifásicos Representativos da Indústria de Petróleo e Gás Natural. Doutorado, Universidade Federal de Itajubá.
- Grangeiro, F. A. (2010). Caracterização do escoamento intermitente horizontal água-ar através de ultrassom auxiliado por filmagem ultrarrápida. Mestrado, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP.
- Hutter, K., Wang, Y. e Chubarenko, I. P. (2011). Physics of Lakes Springer Berlin Heidelberg.
- Karthik, T. e Durst, F. (2011). Turbulence models and their applications. 10th Indo German Winter Academy Chennai, India.
- Lobianco, L. F. e Wardani, W. (2010). Electrical Submersible Pumps for Geothermal Applications. Second European Geothermal Review. Mainz, Germany.
- Milovan Peric, S. F. (2005). The advantage of polyhedral meshes: 2.
- Moreira, J. R. F., Farias, J. B., Ribeiro, M. P. e Destro., W. (2006). "The construction of the well 7-JUB-6HB-ESS using a high power electrical submersible pump." Boletim técnico da Produção de Petróleo 1: 233-254.
- Oliveira, B. D. d. (2012). Escoamento Líquido-Gás na Entrada de uma Bomba Centrifuga Submersa Utilizada na Indústria Petrolífera. Trabalho Final de Graduação, Universidade Federal de Itajuba.

Oliveira, B. D. d., Carvalho, R. D. M. d., Gonçalvez, J. L., Pérez, H. A. P., Gil, F. A. L. e Ratkovich, N. (2014). Application of the ultrasonic technique for monitoring the void fraction in an experimental simulation of an electrical submersible pump. 9th North American Conference on Multiphase Technology. Banff - Alberta - Canada, BHR Group.

Takacs, G. (2009). Electrical submersible pump manual: design, operations, and maintenance. Burlington, MA, Gulf Professional Publishing.

Tanahashi, E. I. (2010). Desenvolvimento da Técnica de Ultrassom para Medição da Fração de Vazio e Detecção do Padrão de Escoamentos Água-Ar. Mestrado, Universidade Federal de Itajubá.

Thomas, J. E. (2001). Fundamentos de Engenharia de Petróleo. Rio de Janeiro, Editora Interciência.

Verde, W. M. (2011). Estudo Experimental de Bombas de BCS Operando com Escoamento Bifásico Gás-Líquido. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campinas.

Weatherford. (2014). "Weatherford ESP Pumps." Retrieved 16/07/2014, 2014, from <http://www.weatherford.com/Products/Production/ElectricSubmersiblePumping/Pumps/>.

Diego A. Narvaez, J. C. (2014). Gas Handling Device Boost Mississippi Line Production. Upstream Pumping Solutions.

## **APÊNDICE A**

### **Simulações Numéricas de Escoamentos Bifásicos Líquido-Gás na Entrada de uma Bomba Centrífuga Submersa**

## A.1 Criação do Modelo Numérico

A fim de garantir a confiabilidade dos resultados numéricos, a criação do modelo computacional dos escoamentos passou pelas seguintes etapas:

- Montagem virtual do aparato experimental;
- Criação e teste de independência da malha;
- Seleção do modelo físico e estabelecimento das condições de contorno.

A geometria da BCS foi gerada utilizando o programa Autodesk® Inventor. A geometria simulada contém os sistemas de injeção de água e o ponto de injeção de ar (quatro bicos de injeção), o carretel onde foi instalado o aparato ultrassônico e um estágio da bomba (Figura A-1 e Figura A-2). Como o motor é instalado à jusante da bomba, o eixo que transmite torque do motor para a bomba interage com o fluido antes de ele entrar na bomba. Apenas um estágio da bomba foi simulado (rotor e difusor) devido à alta complexidade da geometria envolvida. Depois que os modelos em CAD foram gerados (Figura A-2b), os mesmos foram importados para o programa STAR-CCM+. Obteve-se assim o volume interno por onde os fluidos irão escoar (Figura A-3), que é a região utilizada para as simulações do escoamento propriamente ditas. A fim de atribuir à região do rotor eixos de referência rotativos, este volume interno foi dividido em três partes: (i) pré-rotor, (ii) rotor e (iii) pós-rotor. Admitiu-se então que a parte do rotor gira a uma velocidade constante e que as partes adjacentes são estacionárias.

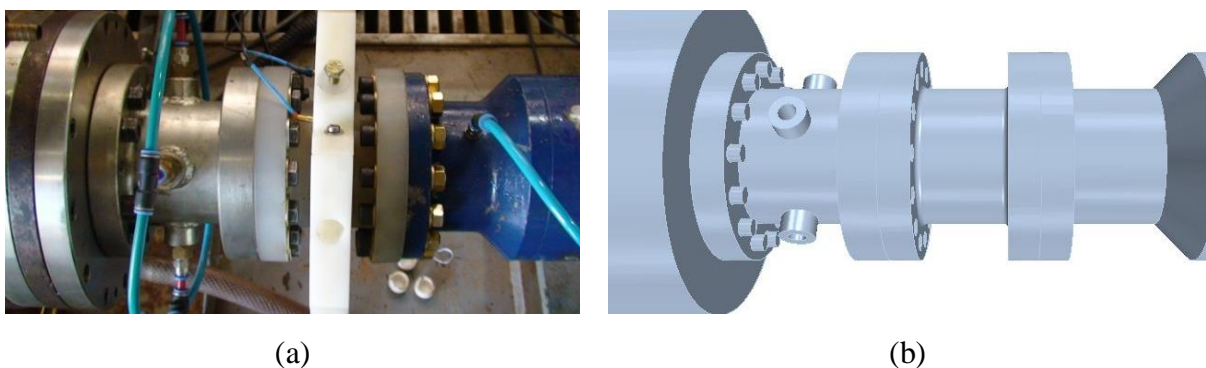


Figura A-1: (a) Trecho para aquisição de dados ultrassônicos e (b) geometria utilizada no STAR-CCM+.

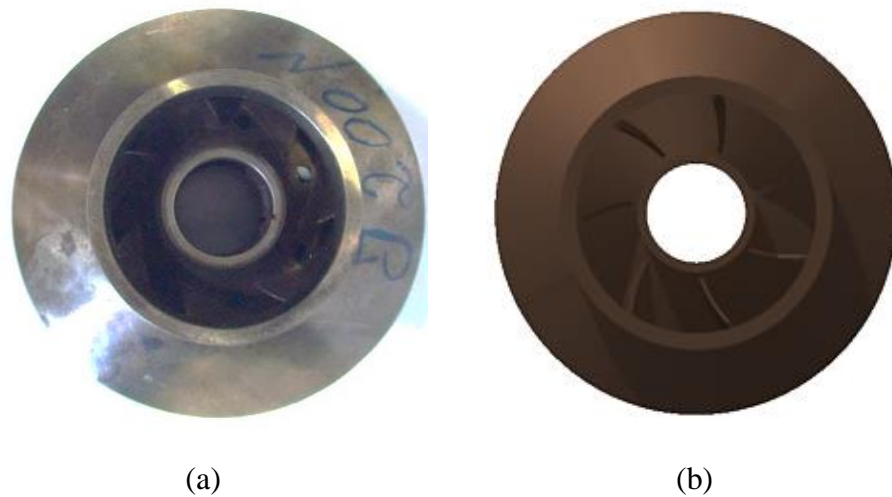


Figura A-2: (a) Rotor real e (b) rotor gerado no Autodesk® Inventor (Oliveira *et al.*, 2014).

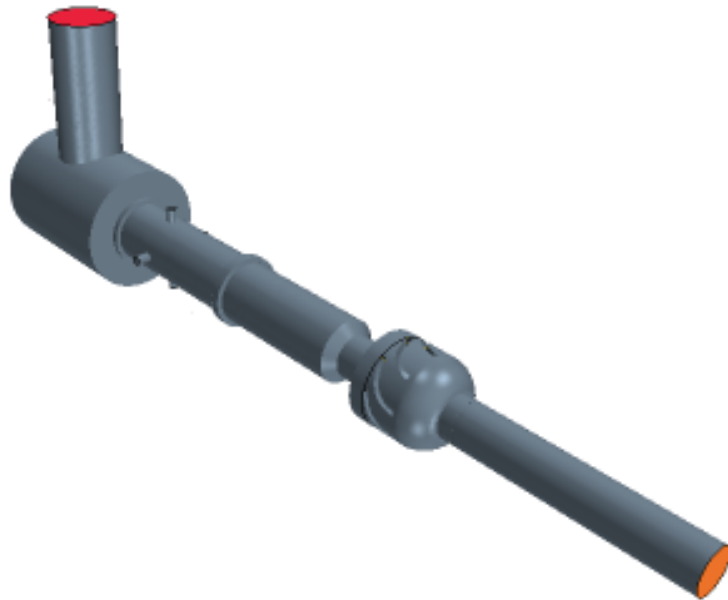


Figura A-3: Volume interno gerado no STAR-CCM + (Oliveira *et al.*, 2014).

A fim de criar a malha, foram utilizados dois tipos de elementos: prismáticos e poliédricos (Figura A-4). Duas camadas de prismas foram utilizadas próximas das paredes para assegurar uma boa resolução nos valores de velocidade na camada limite. Uma malha poliédrica gerada automaticamente no STAR-CMM+ foi utilizada no restante do volume. Esta malha permite obter bons resultados com um número menor de elementos e o tempo computacional pode ser reduzido para menos de um décimo do tempo necessário para uma malha tetraédrica (Milovan Peric, 2005).



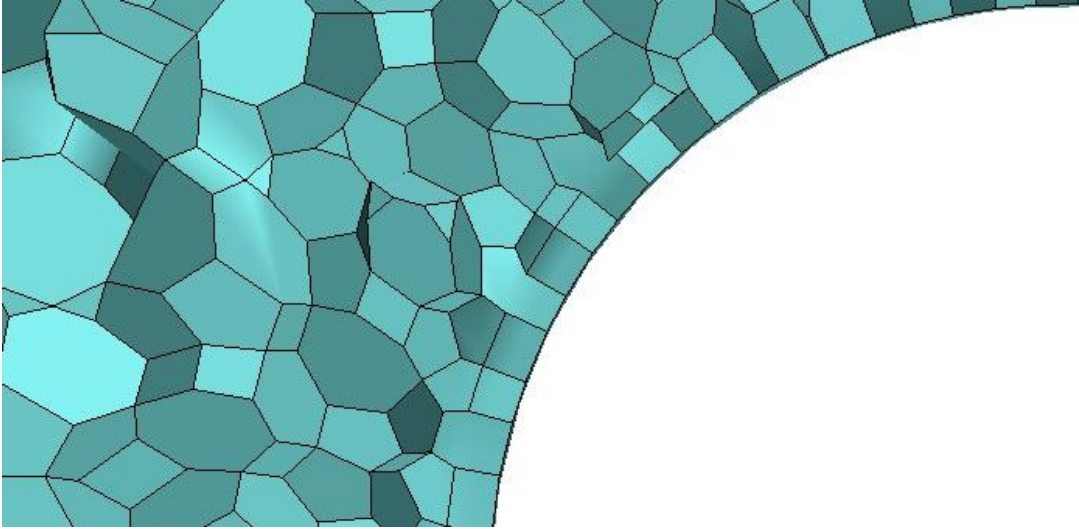


Figura A-4: Detalhes da malha na região do transdutor (Oliveira *et al.*, 2014).

Em relação aos modelos físicos, o modelo *Volume Fluid Model* (VOF) foi adotado devido a sua alta eficiência numérica e sua rápida velocidade de convergência em problemas complexos. O modelo VOF geral simula a fase contínua (água) e a fase dispersa (ar) (CD-adapco, 2013) conforme mostram as Equações A.1 e A.2:

$$\alpha_i = \frac{V_i}{V} \quad (A.1)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \alpha_i dV + \int_A \alpha_i (v - v_g) \cdot dA = \int_V \left( s_{\alpha_i} - \frac{\alpha_i D \rho_i}{\rho_i} \frac{D}{Dt} \right) dV \quad (A.2)$$

Nestas equações,  $V$  é o volume de cada célula,  $A$  é a área de frontal de cada célula,  $FVG$  é a FVG,  $\rho$  é a massa específica,  $v$  é a velocidade e  $t$  é o tempo. Estas equações de transporte escritas em termos da FVG permitem o cálculo de FVG em cada célula do domínio gerado.

Para a turbulência, foi selecionado o modelo  $k$ - $\epsilon$  para cada uma das fases; este modelo é normalmente utilizado com duas equações, uma para a energia cinética turbulenta e outra para a taxa de dissipação turbulenta (Hutter *et al.*, 2011) e constitui uma variação do modelo  $k$ - $\epsilon$  normal para aplicação em geometrias que envolvem partes giratórias (Karthik *et al.*, 2011). As Equações A.3 e A.4 foram utilizadas no modelo adotado:

$$\rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{u_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \epsilon \quad (A.3)$$

$$\rho u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{u_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \mu_t \frac{\epsilon}{k} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - C_2 \frac{\epsilon}{k} \rho \epsilon \quad (A.4)$$

onde  $k$  é a energia cinética turbulenta,  $\epsilon$  é a taxa de dissipação de momento turbulenta,  $\sigma_k, \sigma_\epsilon$ ,  $C_1$  e  $C_2$  são constantes cujos valores são 1,0; 1,2; 1,44 e 1,9, respectivamente. Nas equações de Navier-Stokes deve-se corrigir a viscosidade do fluido devido à turbulência, que é a viscosidade efetiva dada pela Equação A.5.

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \quad (A.5)$$

onde  $\mu_t$  é a viscosidade turbulenta.

Para as simulações, foi utilizado um período inicial transiente de 20 segundos. Este período de tempo permite que o fluido passe pelo volume de controle quatro vezes a fim de atingir um escoamento estável e garantir uma solução adequada. Isto é feito porque a simulação se inicia apenas com água na tubulação, então se tem que aguardar que o gás escoe por todo o domínio para iniciar a simulação do escoamento bifásico líquido-gás.

As condições de contorno selecionadas na entrada foram as vazões mássicas de cada uma das fases, líquido e gás. Também foi especificada a FVG para cada uma das fases na entrada antes de se misturarem (zero para líquido e um para ar), Como condição de contorno de saída, foi selecionada a pressão de saída da bomba. Para a simulação numérica, foi então adicionado um trecho de tubulação à jusante da bomba para homogeneizar o escoamento e assim garantir que esta condição de contorno não afete a simulação a montante da bomba. Além disso, o primeiro estágio da bomba foi simulado devido ao efeito que ele possui na topologia do escoamento na região onde está localizado o aparato ultrassônico. Assim, o modelo numérico possui dois elementos rotativos, o eixo e o rotor da bomba. Para o eixo, a velocidade de rotação dependia apenas da rotação do rotor. Já para o rotor, foi necessário gerar uma nova região de fluido a fim de estabelecer um sistema de coordenadas rotativo, completando-se assim, as condições necessárias para montagem do modelo virtual do aparato experimental.

Descrita a montagem virtual do aparato experimental, no próximo tópico discute-se a criação e teste de independência da malha.

## A.2 Avaliação do Modelo Numérico

Foi realizado um teste de independência da malha para avaliação do número de elementos necessários para se realizar uma simulação suficientemente precisa do escoamento e analisar como sua variação afeta os resultados da simulação.

Foi gerada inicialmente uma malha grosseira a fim de se avaliar o efeito da geometria no comportamento do escoamento. Foi obtido então o perfil de velocidade na direção do escoamento para duas condições: com e sem o rotor da bomba (Figura A-5), a fim de verificar se a presença do rotor da bomba tem efeito significativo no perfil de velocidades do escoamento.

Pode-se verificar uma grande variação no campo de velocidades nos dois casos, apesar da velocidade média ser a mesma em ambos (0,89 m/s). Esta variação no perfil de velocidades pode levar a diferentes resultados para o escoamento da fase dispersa, concluindo-se então ser necessário levar em conta o rotor nas simulações.

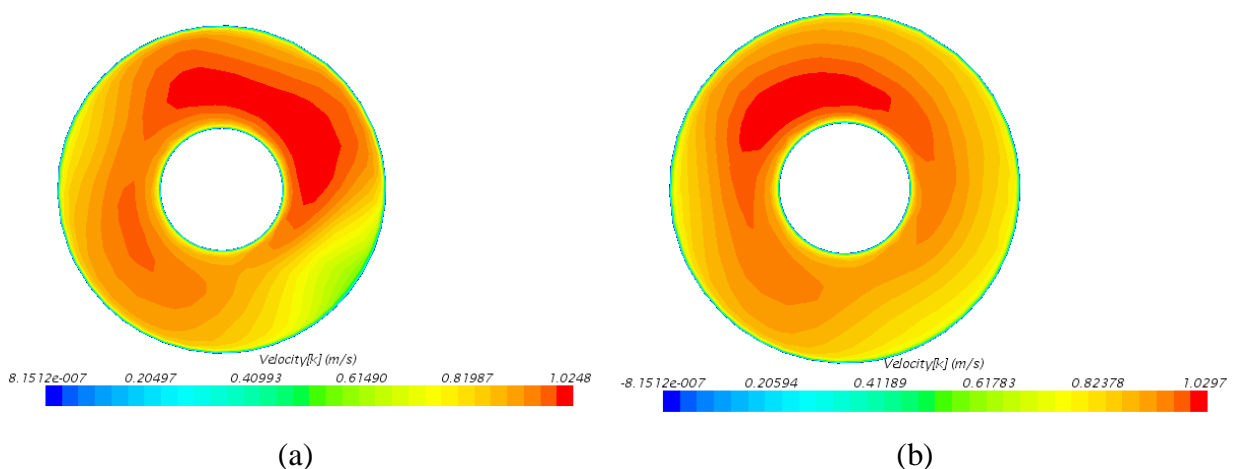


Figura A-5: Perfil de velocidades: (a) com rotor e (b) sem o rotor (Oliveira *et al.*, 2014).

O próximo passo foi analisar como o número de elementos na malha afetava o resultado da simulação. Foram realizadas simulações para quatro malhas diferentes. A Tabela A-1 mostra o número de elementos para cada caso. Com uma malha mais fina, a precisão aumentou, mas também aumentou o tempo computacional para que os valores convergissem. Então, foi necessário avaliar diferentes tamanhos de malha a fim de se encontrar uma solução de compromisso entre precisão dos resultados e tempo computacional.

Tabela A-1: Número de elementos e tempo computacional para cada tipo de malha.

Malha	Nº de elementos	Tempo computacional [h]
Grosseira	321.223	7,65
Média	589.340	13,48
Fina	1.761.475	44,79
Muito fina	3.825.656	93,55

Foi utilizada a condição de 1800 RPM, 100 kPa, 1 kg/h de vazão de ar e 20.000 kg/h de vazão de água para observar a resposta de 20 segundos de tempo físico para cada uma das malhas apresentadas na Tabela A-1. A Figura A-6a mostra que a FVG decresce rapidamente para um valor assintótico quando se aumenta o número de elementos da malha. A variação de FVG entre a malha grosseira e muito fina foi de 0,1476, o que corresponde a um erro de 5,7%. Por outro lado, o tempo computacional aumenta linearmente com o número de elementos da malha. O tempo computacional necessário para convergência utilizando a malha fina foi 11,2 vezes maior que o tempo necessário para a malha grosseira (Figura A-6b). Isto torna inviável o uso de malhas muito finas para simular múltiplas condições de operação. Com base nestes resultados e considerando que um erro de 6% na simulação é aceitável, a malha grosseira foi utilizada para realizar todas as outras simulações.

A Figura A-7 mostra a malha poliédrica gerada para simular o rotor utilizando a malha grosseira. Pode-se verificar que os elementos da malha são pequenos quando comparados com o volume a ser estudado.

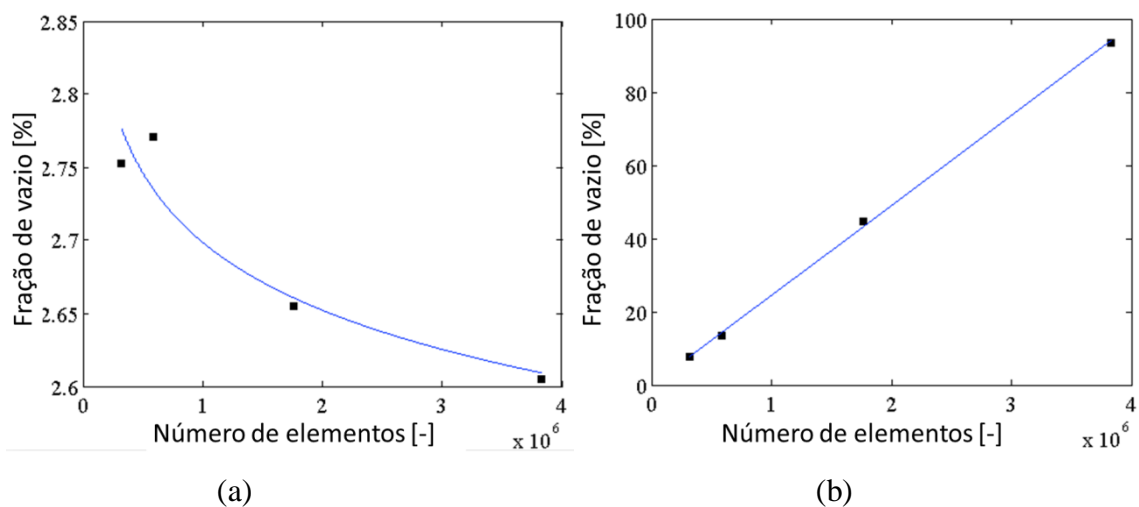


Figura A-6: (a) FVG em função do número de elementos e (b) tempo computacional em função do número de elementos (Oliveira *et al.*, 2014).

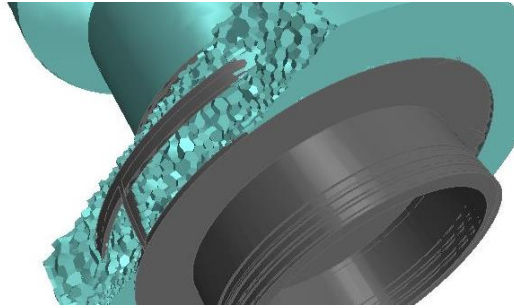


Figura A-7: Malha gerada no STAR-CCM+ para a região do fluido utilizando tamanho grosseiro dos poliedros (Oliveira *et al.*, 2014).

### A.3 Avaliação das Condições de Operação

Os resultados numéricos para a FVG podem ser vistos na Tabela A-2. Foram estes os valores utilizados no Capítulo 5 para correlação com os parâmetros acústicos. As simulações numéricas forneceram ainda informações sobre a topologia das fases conforme mostrado na Figura A-8 à Figura A-17. Em todos os casos, a fase gasosa tende a ficar próxima à superfície do eixo devido à menor força centrífuga sobre o ar comparada à água. Quanto mais à jusante estiver o ponto de interesse do ponto de injeção de gás, mais o ar irá tender a ficar próximo ao eixo. Entretanto, para a menor rotação ensaiada isto acontece em um ponto à jusante do aparato ultrassônico, pois o escoamento necessita de um comprimento para se desenvolver.

As simulações mostraram ainda que altas vazões de líquidos tornam mais difícil o acúmulo de ar em torno do eixo, havendo uma tendência da fase gasosa em se aproximar da parede da tubulação. Por outro lado, pode-se verificar um forte efeito da rotação para baixas vazões de água. Nesta condição, o ar tende a se juntar próximo ao eixo. Para vazões de líquido acima de 15000 kg/h, verifica-se um forte efeito da força gravitacional. Nestes casos, é possível verificar um acúmulo de gás na parte superior da tubulação.

Além de fornecer resultados para a FVG para eventual correlação com os parâmetros acústicos, as simulações numéricas permitiram estas inferências sobre o comportamento do escoamento na região de instalação do aparato ultrassônico. Esta compreensão mais aprofundada do escoamento facilita sobremaneira a análise dos sinais ultrassônicos obtidos, a seguir.

Tabela A-2: FVG para diferentes condições de escoamento.

<b>Condição</b>	<b>P<sub>i</sub> [kPa]</b>	<b>Rotação [RPM]</b>	<b>Vazão de líquido [kg/h]</b>	<b>Vazão de ar [kg/h]</b>	<b>FVG nos transdutores</b>
1	100	3000	27669,2	1,0	1,77%
2	100	3000	21491,3	1,0	2,31%
3	100	3000	15967,6	1,0	2,89%
4	100	3000	12982,7	1,0	4,62%
5	100	3000	10935,1	1,0	4,81%
6	200	3000	29179,3	1,0	1,21%
7	200	3000	23412,3	1,0	1,45%
8	200	3000	16138,9	1,0	2,43%
9	200	3000	10899,8	1,0	3,12%
10	200	3000	8059,0	1,0	3,83%

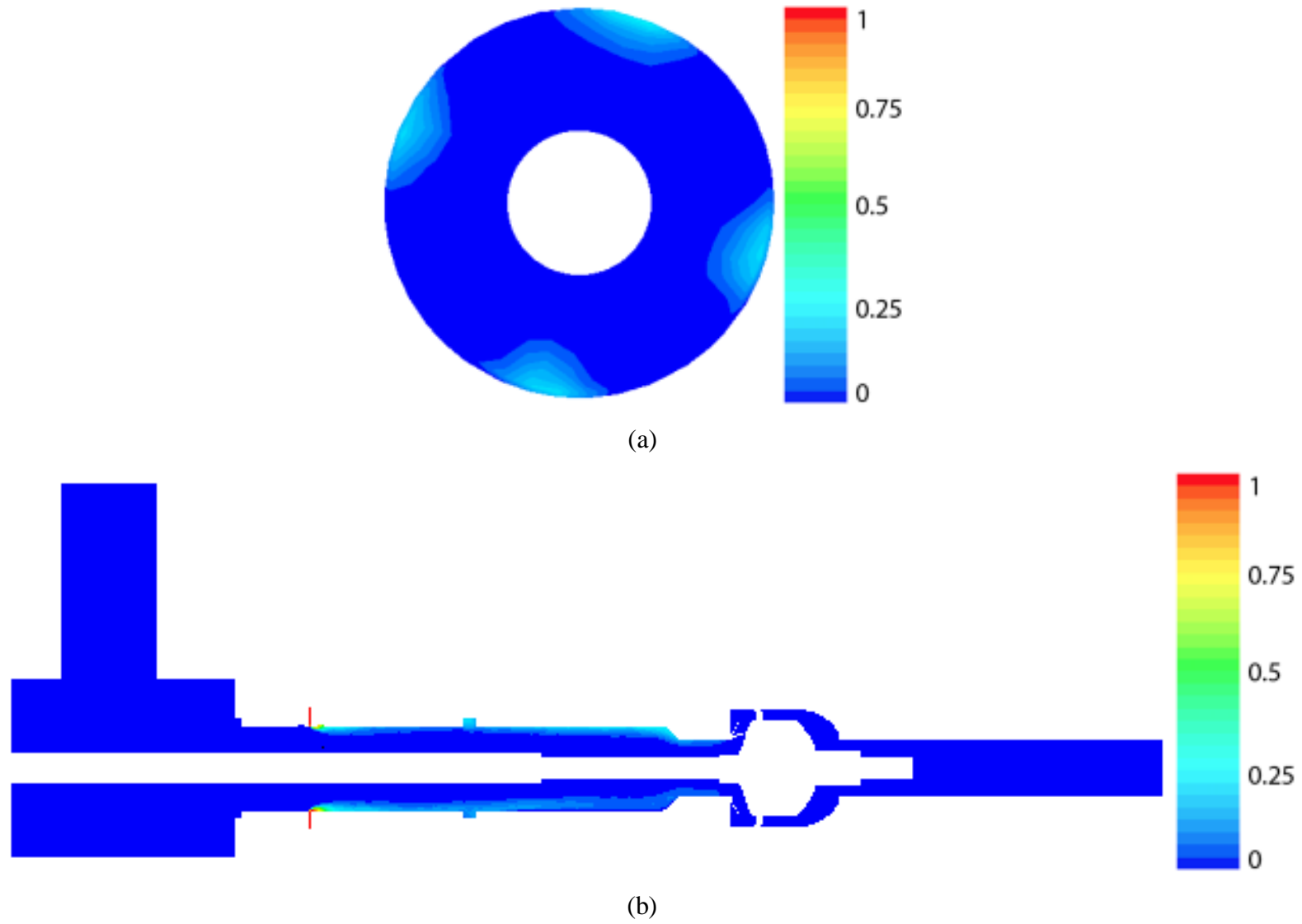


Figura A-8: Distribuição da FVG na seção transversal na região dos transdutores e em todo o domínio para a condição 1.

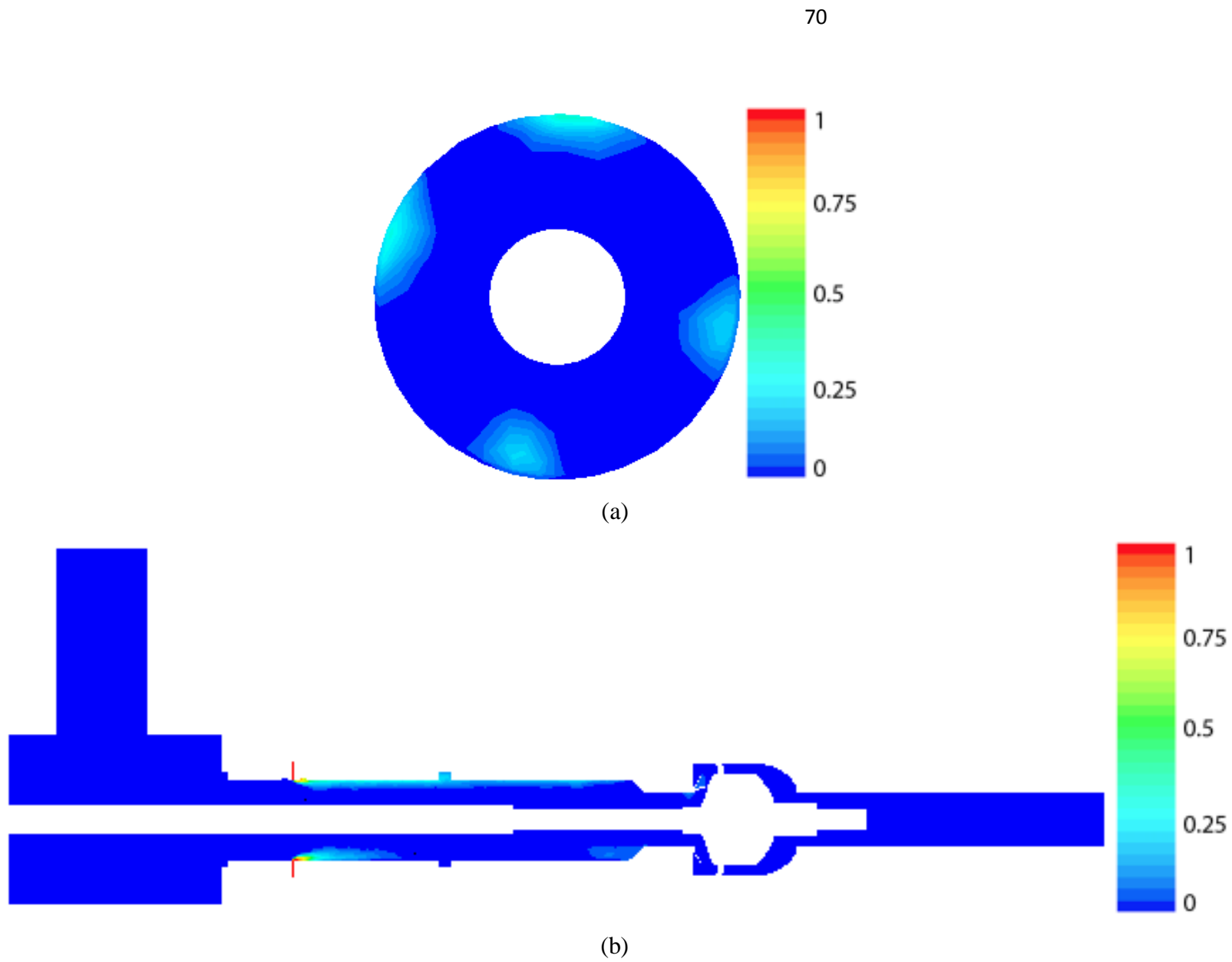


Figura A-9: Distribuição da FVG na seção transversal na região dos transdutores e em todo o domínio para a condição 2.



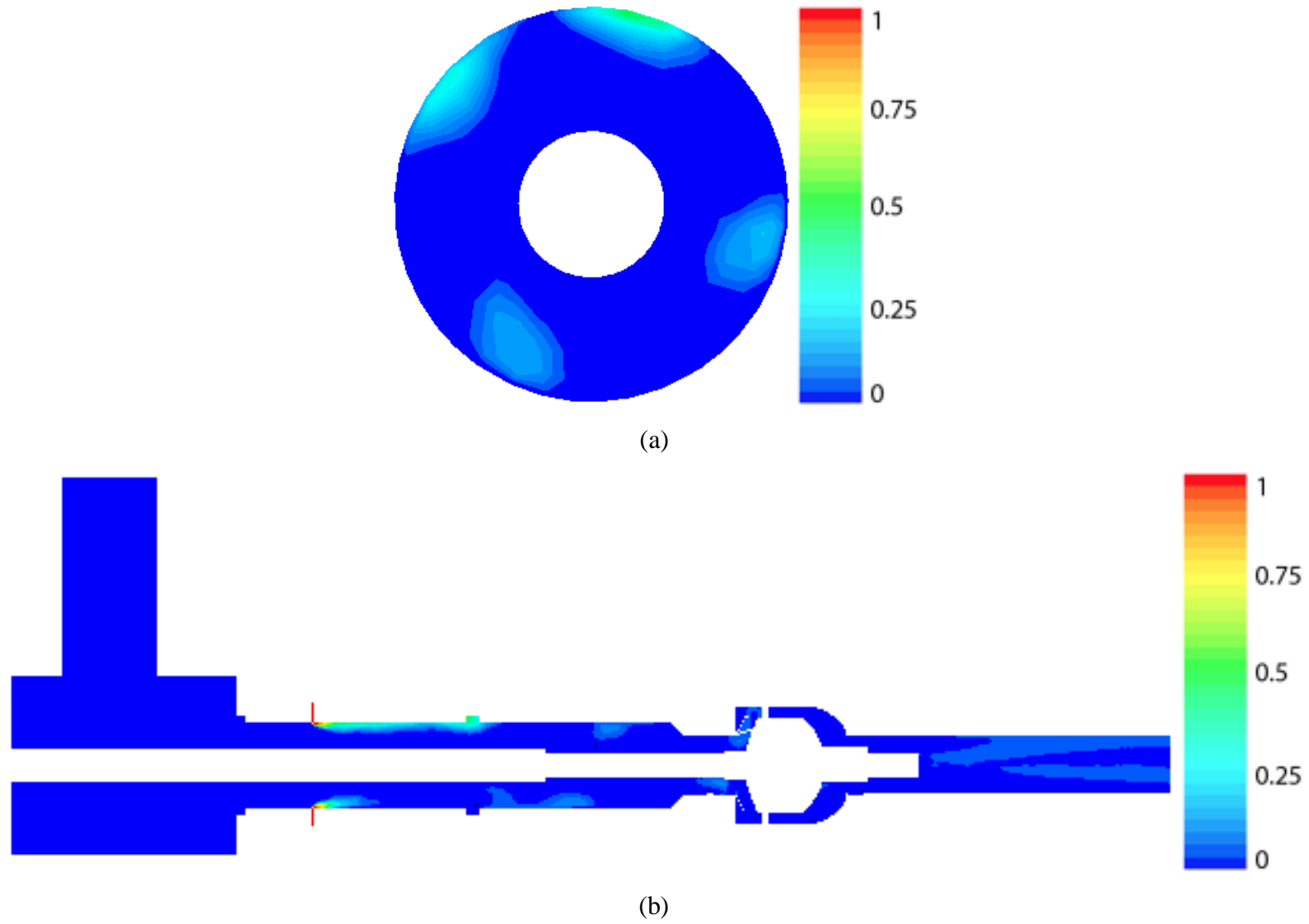


Figura A-10: Distribuição da FVG na seção transversal na região dos transdutores e em todo o domínio para a condição 3.

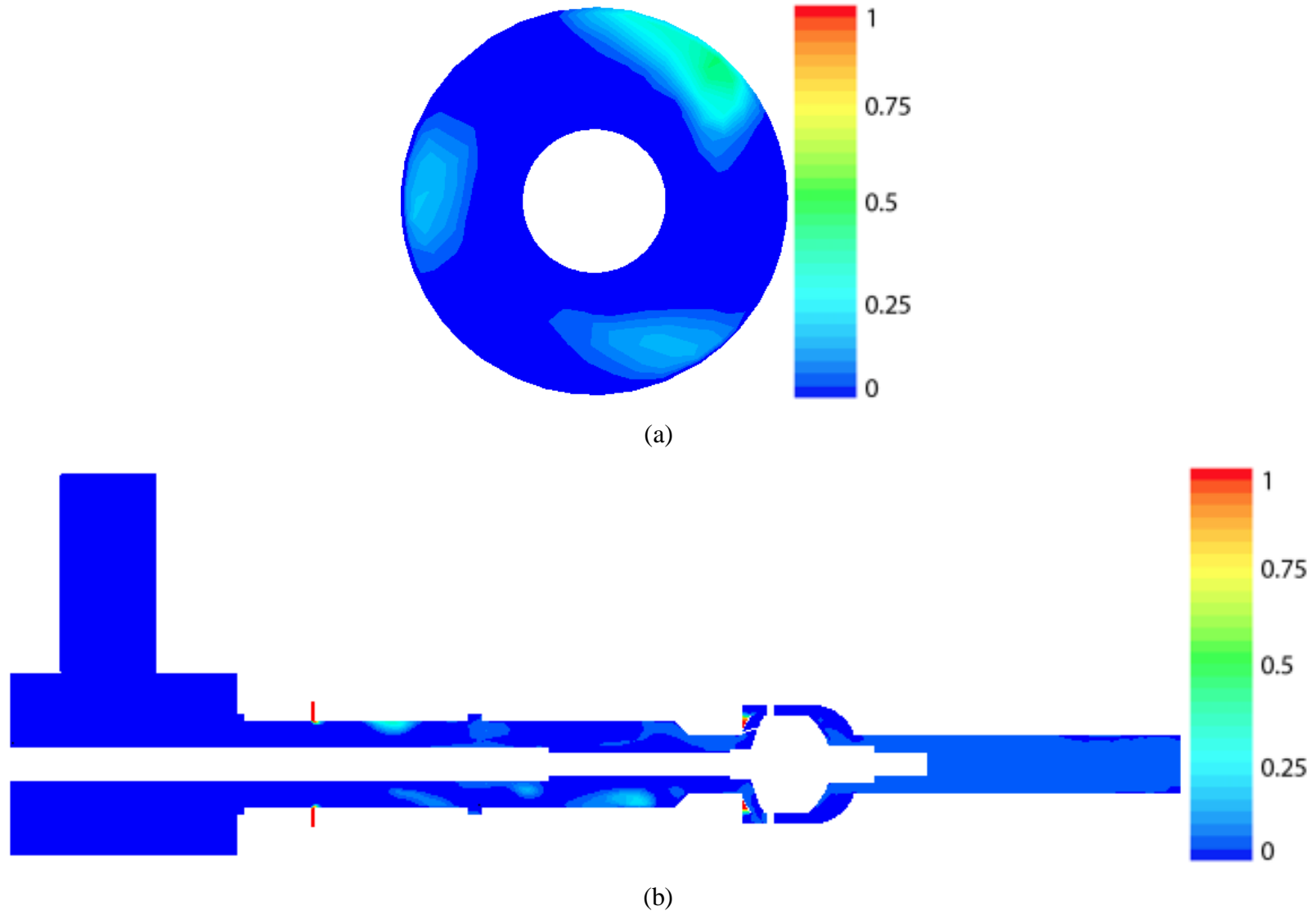


Figura A-11: Distribuição da FVG na seção transversal na região dos transdutores e em todo o domínio para a condição 4.

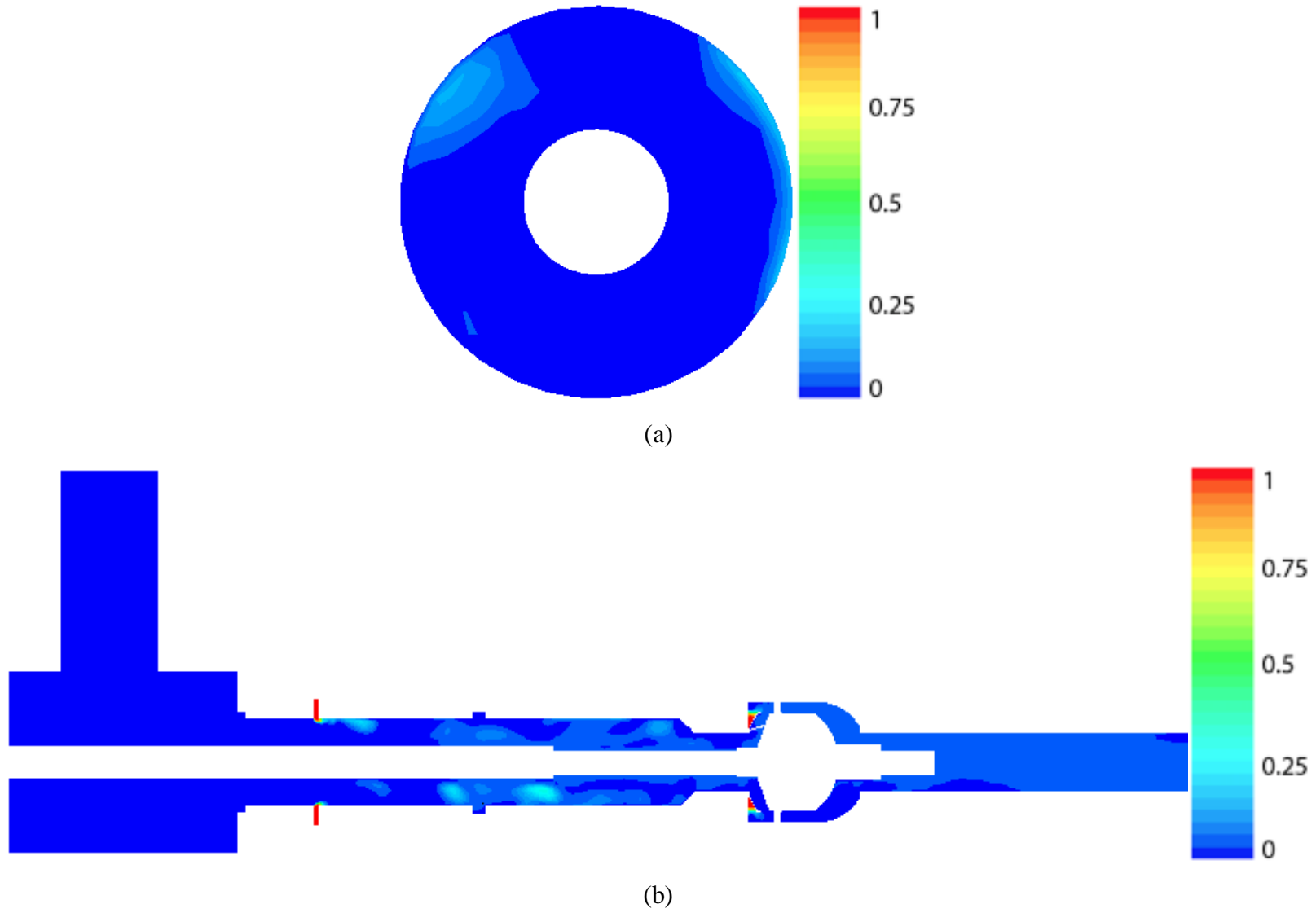


Figura A-12: Distribuição da FVG na seção transversal na região dos transdutores e em todo o domínio para a condição 5.

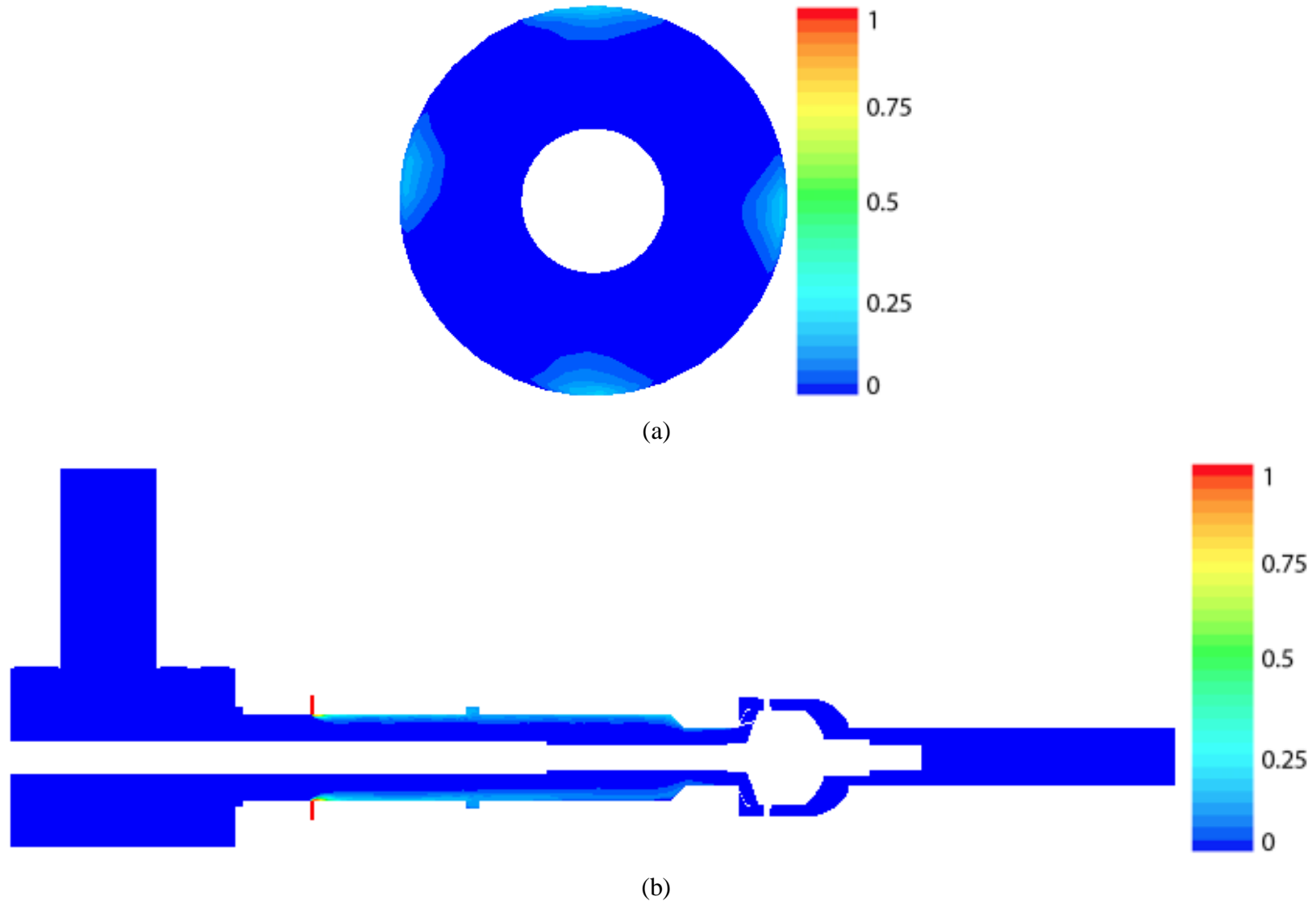


Figura A-13: Distribuição da FVG na seção transversal na região dos transdutores e em todo o domínio para a condição 6.

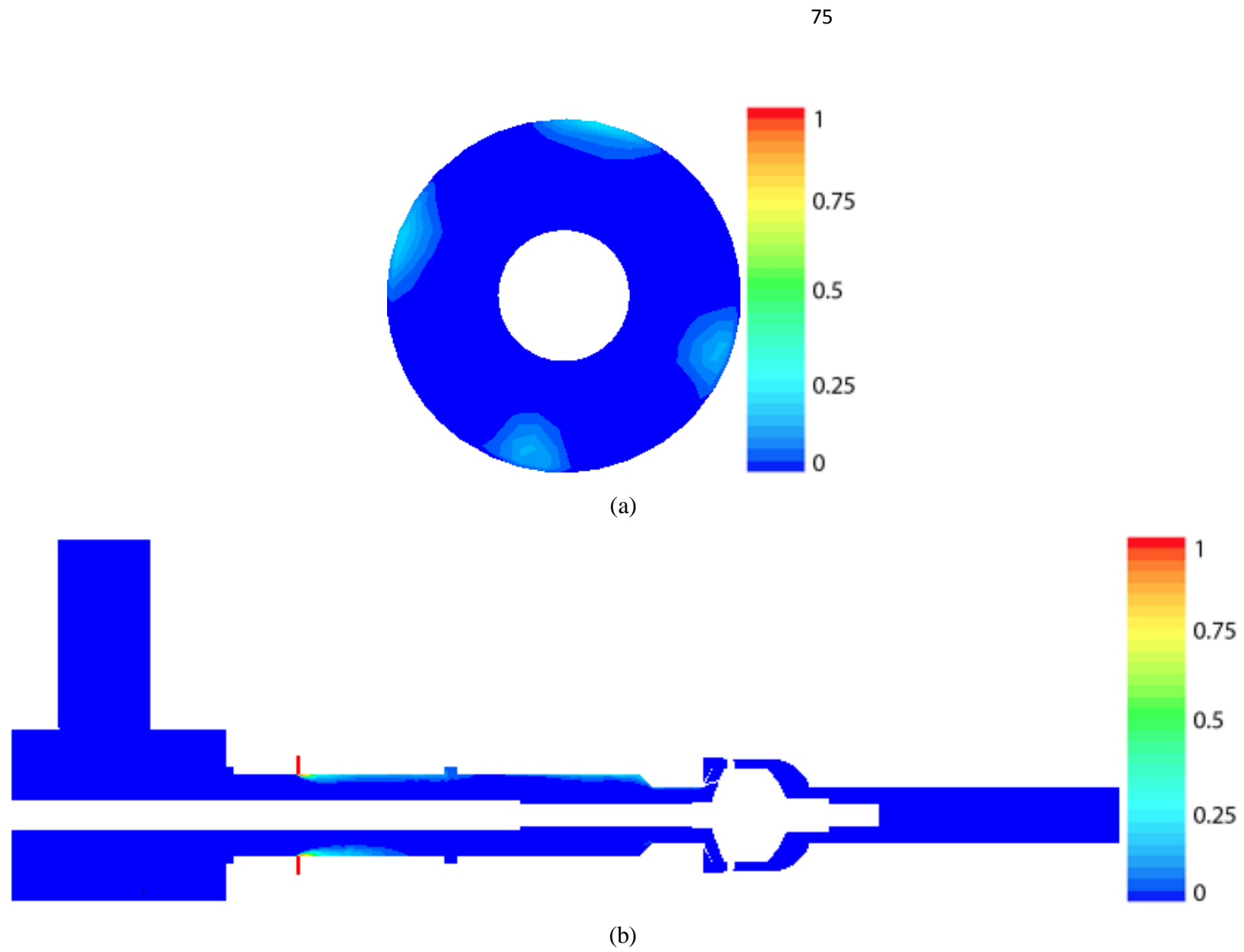


Figura A-14: Distribuição da FVG na seção transversal na região dos transdutores e em todo o domínio para a condição 7.

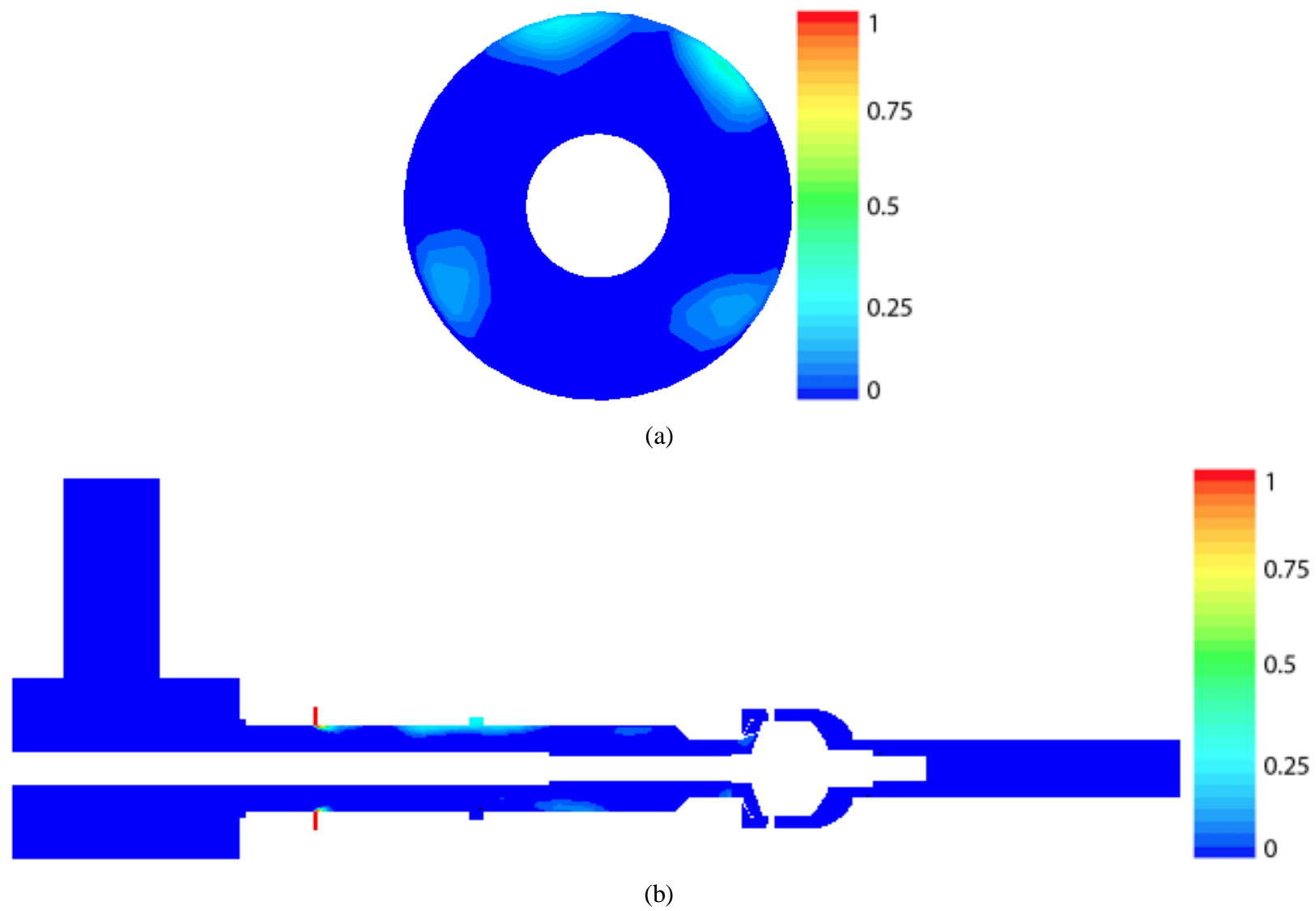


Figura A-15: Distribuição da FVG na seção transversal na região dos transdutores e em todo o domínio para a condição 8.

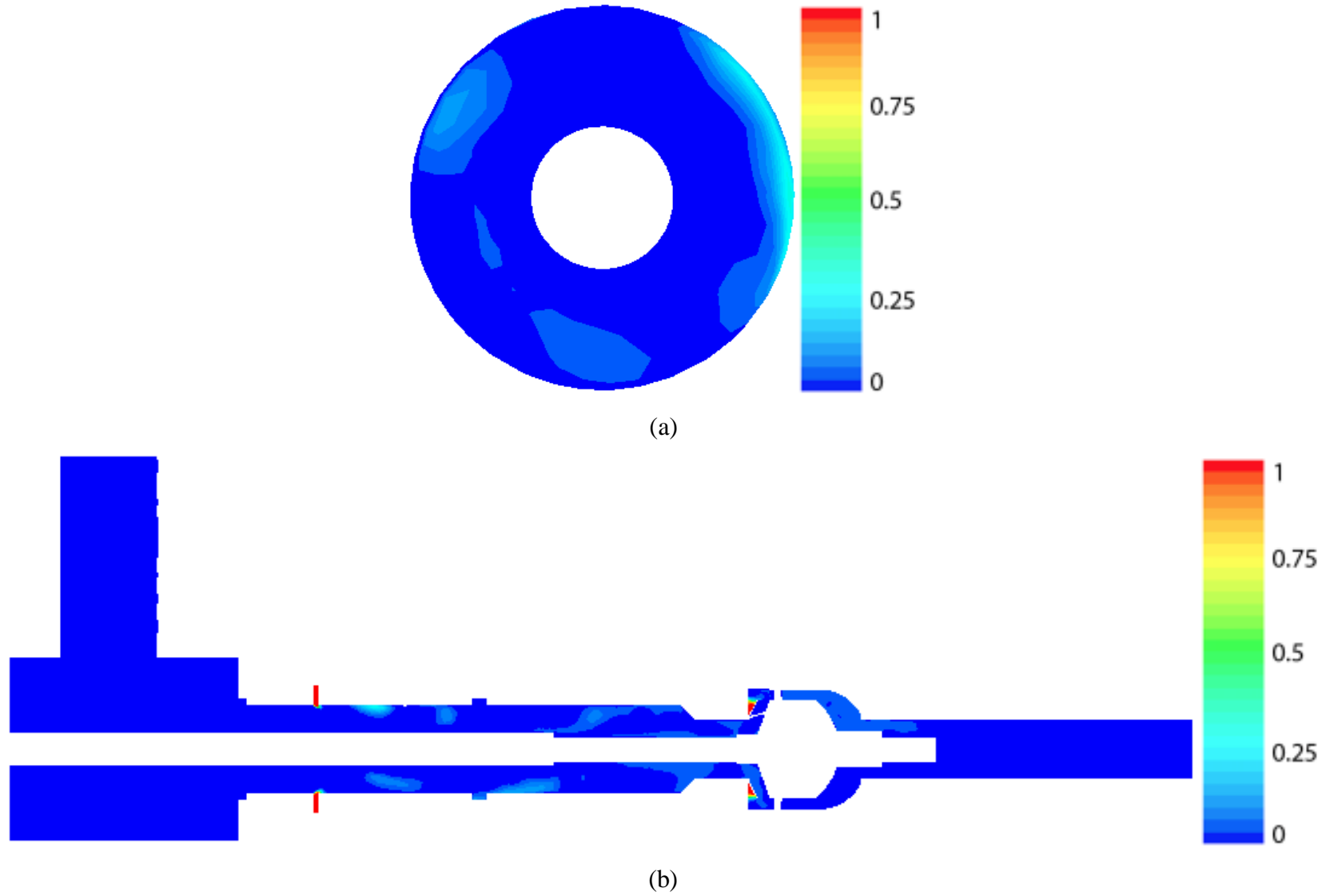


Figura A-16: Distribuição da FVG na seção transversal na região dos transdutores e em todo o domínio para a condição 9.

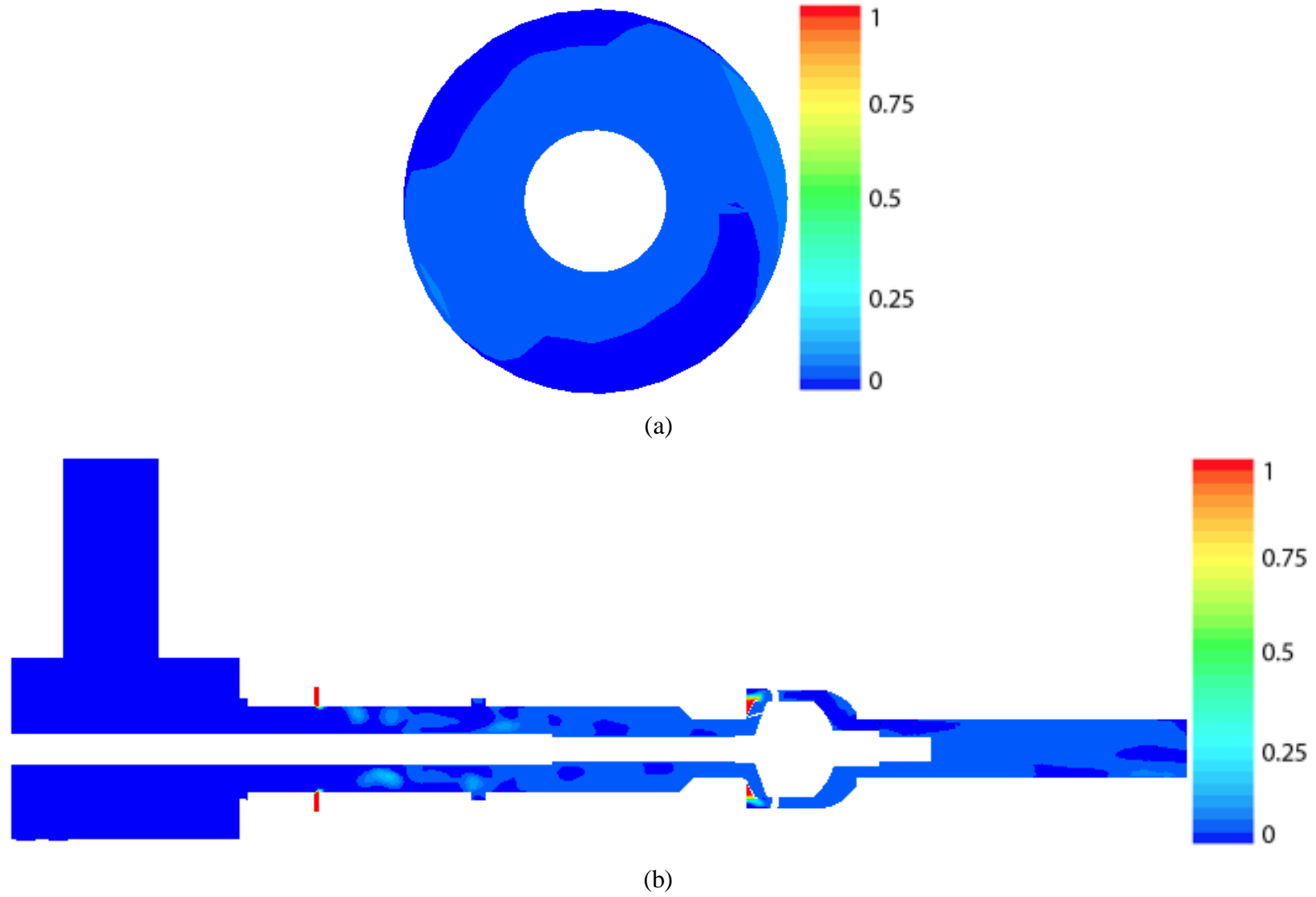


Figura A-17: Distribuição da FVG na seção transversal na região dos transdutores e em todo o domínio para a condição 10.