



ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM SEPARADOR GÁS-LÍQUIDO CICLÔNICO

Cíntia Nogueira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientadores: Juliana Braga Rodrigues
Loureiro
Átila Pantaleão Silva Freire

Rio de Janeiro
Março de 2013

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM SEPARADOR GÁS-LÍQUIDO
CICLÔNICO

Cíntia Nogueira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Examinada por:

Prof. Juliana Braga Rodrigues Loureiro, D.Sc.

Prof. Átila Pantaleão Silva Freire, Ph.D.

Prof. José Luiz da Silva Neto, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2013

Nogueira, Cíntia

Análise Experimental de um Separador Gás-Líquido Ciclônico/Cíntia Nogueira. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

XIII, 78 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Juliana Braga Rodrigues Loureiro

Átila Pantaleão Silva Freire

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Mecânica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 76 – 78.

1. Separação Multifásica. 2. hidrociclones. 3. Anemometria Laser-Dopler. I. Braga Rodrigues Loureiro, Juliana *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Mecânica. III. Título.

Agradecimentos

Agradeço à Professora Juliana pela orientação deste trabalho, pela paciência ao me ensinar a técnica da Anemometria Laser-doppler bem como o rigor necessário ao realizar um pesquisa científica de alto nível. Gostaria de registrar minha admiração por seu trabalho e dedicação ao NIDF e dizer que aprendi muito com seus conselhos, mas especialmente com o exemplo de profissional que é. Agradeço também pela amizade e companheirismo que tornaram os longos dias de trabalho menos árduos.

Ao professor Átila agradeço por me receber no NIDF, abrindo as portas de um laboratório tão bem conceituado na COPPE/UFRJ e fora dela. Agradeço pela confiança depositada em mim e pelos inúmeros conselhos que me guiaram e incentivaram ao longo do caminho. Deixo aqui minha admiração por seu trabalho de liderança no desenvolvimento de pesquisas aplicadas na solução de problemas cruciais ao desenvolvimento do país e por abraçar os enormes desafios do "pré-sal".

Aos meus pais Jair e Bet pelo amor incondicional, pelo apoio em todas as fases da minha vida. Obrigada pela confiança e pelo carinho. Agradeço ao meu pai por sempre me incentivar a seguir estudando e me ensinar que o conhecimento é o mais poderoso agente de mudança pessoal e social. À minha mãe pelo incentivo a buscar meus sonhos e por me ensinar a fazer tudo com alegria.

Ao Matheus por compartilhar comigo os sonhos e a vida, obrigada por todo amor e cuidado.

Aos meus sogros Nilton e Maristela, obrigada por me acolherem sempre como uma filha, pelos conselhos, pelo carinho e amizade. Obrigada por matarem as nossas saudades do Rio Grande sempre que vamos pra casa. À Ju pelo exemplo de amor e entusiasmo pela pesquisa que me empolgou a seguir o mesmo caminho.

Aos meus colegas de laboratório, que hoje posso chamar de amigos. Luis, Matheus, Eric, Daniel, Eridson, Carol, Ricardo, Gabriel, obrigada por estarem sempre dispostos a ajudar. Obrigada pela convivência e pelas risadas, sem as quais o trabalho seria muito mais pesado.

Obrigada à DETEK engenharia, que realizou a instalação do separador e de toda a infra-estrutura para suportar os equipamentos de medição. Obrigada pelas idéias na solução dos vários problemas que encontramos ao longo do trabalho.

Ao CNPq pela bolsa de mestrado que permitiu a realização deste trabalho.

Cíntia Nogueira

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (Msc)

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM SEPARADOR GÁS-LÍQUIDO CICLÔNICO

Cíntia Nogueira

Março/2013

Orientadores: Juliana Braga Rodrigues Loureiro

Átila Pantaleão Silva Freire

Programa: Engenharia Mecânica

O objetivo central do trabalho foi de executar uma seqüência de experimentos capazes de fornecer de forma rigorosa, dados críticos para uma correta interpretação e formulação teórica do escoamento no interior do separador gás-liquido que atua por efeito ciclônico, como perfis de velocidade média e de estatísticas turbulentas. Para tanto foi construído um protótipo em laboratório, feito de material transparente de forma a permitir a visualização interna do escoamento. Os testes de avaliação estão completamente viabilizados através do projeto do protótipo e construção da bancada experimental, esforços que demandaram a maior parte do trabalho até o momento e são vistos como parte dos resultados. Foram realizados testes de eficiência em tres razões gás-liquido que forneceram um melhor entendimento do equipamento bem como a visualização de alguns fenômenos como a precessão do núcleo gasoso em torno do eixo do equipamento. O estudo forneceu um grande número de dados, porém ainda não são completos a ponto de viabilizar a construção de um modelo matemático que é o objetivo final do estudo. Os testes estão sendo continuados a fim de chegar a este objetivo.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (Msc)

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF A GAS-LIQUID CYCLONIC SEPARATOR

Cíntia Nogueira

March/2013

Advisors: Juliana Braga Rodrigues Loureiro

Átila Pantaleão Silva Freire

Department: Mechanical Engineering

The central objective of this study was to perform a sequence of experiments capable of providing rigorously critical data for a correct interpretation and theoretical formulation of the flow inside the gas-liquid separator that acts by cyclonic effect, as mean velocity profiles and turbulent statistics. To do so we built a prototype laboratory, made of transparent material to allow the visualization of internal flow. The assessment tests are completely feasible through the design and construction of bench prototype experimental effort that required the most work to date and are seen as part of the results. Tests were performed efficiency in three gas-liquid ratios which provide a better understanding of the equipment and the visualization of such phenomena as the precession of the nucleus gas around the axis of the machine. The study provided a lot of data, but are not yet complete enough to enable the construction of a mathematical model that is the ultimate goal of the study. The tests are being continued in order to reach this goal.

Sumário

Agradecimentos	iv
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiii
1 Processamento Primário de Petróleo	1
1.1 O separador ciclônico na produção de gás natural	2
1.1.1 Objetivos	4
2 Separadores Ciclônicos	5
2.1 Princípios de funcionamento de um Separador Ciclônico	5
2.1.1 Escoamento Rotativo	6
2.1.2 Movimento de uma Partícula	8
2.1.3 Cálculo do Diâmetro do Separador	11
2.1.4 Detalhamento do Separador	13
2.2 Parâmetros de Influência na Eficiência de Separação	16
2.2.1 Arraste de Gotículas	16
2.2.2 Perfis de Velocidade	20
2.2.3 Fenômeno do fim de Vórtice	26
2.2.4 Pressão de trabalho	29
3 Método Experimental	32
3.1 Características do Modelo do Separador	32
3.2 A técnica de anemometria Laser-Doppler	34
3.3 A técnica de anemometria Phase-Doppler	39
3.4 Velocimetria por imagem de partículas	41
3.5 Condições Experimentais	43
4 Resultados	50
4.1 Construção e Instrumentação do Protótipo	50
4.2 Avaliação Qualitativa do Separador	51

4.3	Avaliação com Caixa Coalescedora	52
4.4	Avaliação do equipamento completo em condições ideais de operação	54
4.5	Avaliação do equipamento completo $RLG = 0.04$	62
4.6	Avaliação do equipamento completo com $RLG=0.06$	63
5	Conclusão	72
	Referências Bibliográficas	76

Lista de Figuras

1.1	Histórico da Produção de gás natural no brasil [1].	2
1.2	Corte de um reservatório de Petróleo.	3
1.3	Processamento Primário de Fluidos	4
2.1	Padrão de Escoamento em um Separador Ciclônico	6
2.2	Elemento de fluido sendo rotacionado, de dois diferentes pontos de observação, onde a é um sistema de coordenadas fixo e b um sistema de coordenadas que gira com o elemento	7
2.3	Esboço mostrando os dois casos ideais e a distribuição de velocidade tangencial em um vórtice real [2]	8
2.4	Forças relevantes atuantes em uma partícula de fluido em um escoamento de gás ascendente	9
2.5	Corte vertical do separador segundo o documento de patente [3] . . .	14
2.6	Corte horizontal do separador segundo o documento de patente [3] . .	15
2.7	Corte horizontal do separador segundo o documento de patente [3] . .	15
2.8	Mecanismo de arraste por enrolamento de onda ilustrado pelo clássico artigo de Ishii e Grolmes(1975)	17
2.9	Regimes de arraste ocorrendo em diferentes regiões do gráfico em função do número de Reynolds do filme líquido	18
2.10	Ciclone de corpo cônico e ciclone cilíndrico com helicóides, analisados por Peng (2002)	21
2.11	Velocidade tangencial em um ciclone de corpo cilíndrico com helicóide, obtidos por Peng (2002)	22
2.12	Velocidade axial em um ciclone de corpo cilíndrico com helicóide, obtidos por Peng (2002)	22
2.13	Velocidade radial em um ciclone de corpo cilíndrico com helicóide, obtidos por Peng (2002)	23
2.14	Fronteira entre a parte interna e externa do vórtice [4]	25
2.15	Trajetória de uma partícula em um hidrociclone [5])	26
2.16	a) Ilustração de um ciclone com vórtice centralizado e b) de um escoamento com a presença do fenômeno do fim de vórtice [6])	27

2.17	Visualização do vórtice utilizando luz estroboscópica [6])	28
3.1	Modelo 3D do Separador	33
3.2	Modelo 3D da instalação experimental	34
3.3	Atomizador	35
3.4	Distribuição Gaussiana da intensidade do feixe laser	36
3.5	Franjas de Interferência	37
3.6	Sinal bruto para uma partícula atravessando o volume de controle	39
3.7	Sinal filtrado	40
3.8	Espalhamento de luz em função do diâmetro da partícula relacionado com o comprimento de onda da luz, teoria de Lorentz-Mie	41
3.9	Diferença de fase entre dois detectores em diferentes ângulos	42
3.10	Diferença de fase entre dois detectores em diferentes ângulos	43
3.11	Relação ideal entre diâmetro da partícula e diferença de fase	43
3.12	Aparato experimental para velocimetria por imagem de partícula utilizada em um túnel de vento [7]	44
3.13	Imagem do protótipo construído em acrílico	45
3.14	Atomizador	46
3.15	Misturador	47
3.16	Foto ilustrativa do separador instrumentado com LDA	48
3.17	Raios emitidos pela sonda se cruzando no ponto central da tubulação	49
3.18	Esquema mostrando o posicionamento do espelho em relação ao plano do laser e a câmera	49
4.1	Caixa Coalescedora	53
4.2	Campo de Velocidades Tangenciais Instantâneas	57
4.3	Campo de Velocidades Tangencial Média	58
4.4	Velocidade Radial	60
4.5	Velocidade Axial	61
4.6	Intensidade turbulenta axial	62
4.7	Intensidade turbulenta radial	63
4.8	Diâmetro das gotículas na saída de gás	64
4.9	Concentração de gotículas por centímetro cúbico na saída de gás	65
4.10	Histogramas de velocidade axial no ponto de intensidade turbulenta média	65
4.11	Histogramas de velocidade radial no ponto de intensidade turbulenta média	66
4.12	Histogramas dos diâmetros no ponto de intensidade turbulenta média	66
4.13	Histogramas de velocidade axial no ponto de maior intensidade turbulenta	67

4.14	Histogramas de velocidade radial no ponto maior de intensidade turbulenta	67
4.15	Histogramas de diâmetros no ponto de maior intensidade turbulenta	67
4.16	Histogramas de velocidade axial no ponto de menor intensidade turbulenta	67
4.17	Histogramas de velocidade radial no ponto de menor intensidade turbulenta	67
4.18	Histogramas de diâmetros no ponto de menor intensidade turbulenta	68
4.19	Campo de Velocidades Instantânea	68
4.20	Campo de Velocidades Média	69
4.21	Campo de Velocidades Instantânea	70
4.22	Campo de Velocidades Médias	71

Lista de Tabelas

4.1	Observações do comportamento do separador com $RGL = 0.005$. . .	54
4.2	Observações do comportamento do separador com $RLG=0.02$	54
4.3	Observações do comportamento do separador com $RLG=0.04$	55
4.4	Condições de operação na $RLG=0.02$	56
4.5	Condições de operação na $RLG=0.02$ utilizando ALD	59
4.6	Condições de operação na $RLG=0.04$	62
4.7	Condições de operação $RLG=0.06$	64

Capítulo 1

Processamento Primário de Petróleo

O cenário nacional de exploração de petróleo e gás natural tem lançado desafios à ampliação de conhecimentos e ao desenvolvimento tecnológico do país. À medida que novos campos produtores são encontrados em regiões de difícil acesso, as técnicas de perfuração e produção tornam-se obsoletas e a busca por tecnologias inovadoras pode ser a única alternativa para tornar um campo economicamente viável.

As plantas de processamento primário de petróleo são um gargalo na produção limitando a capacidade de processamento de uma instalação. Muitas técnicas convencionalmente adotadas recorrem à separação gravitacional, tecnologia que, quando aplicada a altas pressões e vazões pode demandar um espaço físico grande, alto custo e instalações pesadas. Alternativamente, a utilização de separadores compactos pode ampliar significativamente a capacidade de produção de uma unidade, pois utiliza técnicas mais eficientes como a separação por efeito ciclônico.

Os separadores ciclônicos apresentam grande capacidade de processamento por área instalada, não possuem partes móveis, requerendo baixa manutenção mecânica e baixa demanda energética. Como os ciclones operam com alta velocidade linear, também não sofrem efeito de balanço.

Separadores compactos podem ser opções para uma tendência futura: unidades separadoras desenvolvidas para trabalharem no fundo do mar, com o objetivo de diminuir a demanda energética ao recalcar toda a água existente no produto bruto e descartá-la posteriormente. Neste caso, a água é reinjetada no poço quase que imediatamente à sua produção, minimizando a possibilidade de sua emulsificação e contaminação, que tantos problemas acarretam a seu posterior tratamento.

O propósito deste trabalho é projetar e construir um protótipo do separador e uma bancada experimental a fim de explorar e discutir em sua integridade os princípios de funcionamento deste um tipo particular de separador gás-líquido.

1.1 O separador ciclônico na produção de gás natural

A produção de gás natural do Brasil em maio de 2012 foi de sessenta e oito milhões de metros cúbicos por dia entre gás natural associado (GASA) e não associado (GASN) e existem expectativas de encontrar reservatórios ainda maiores que os já existentes com a exploração da camada "pré-sal". Fig. 1.1

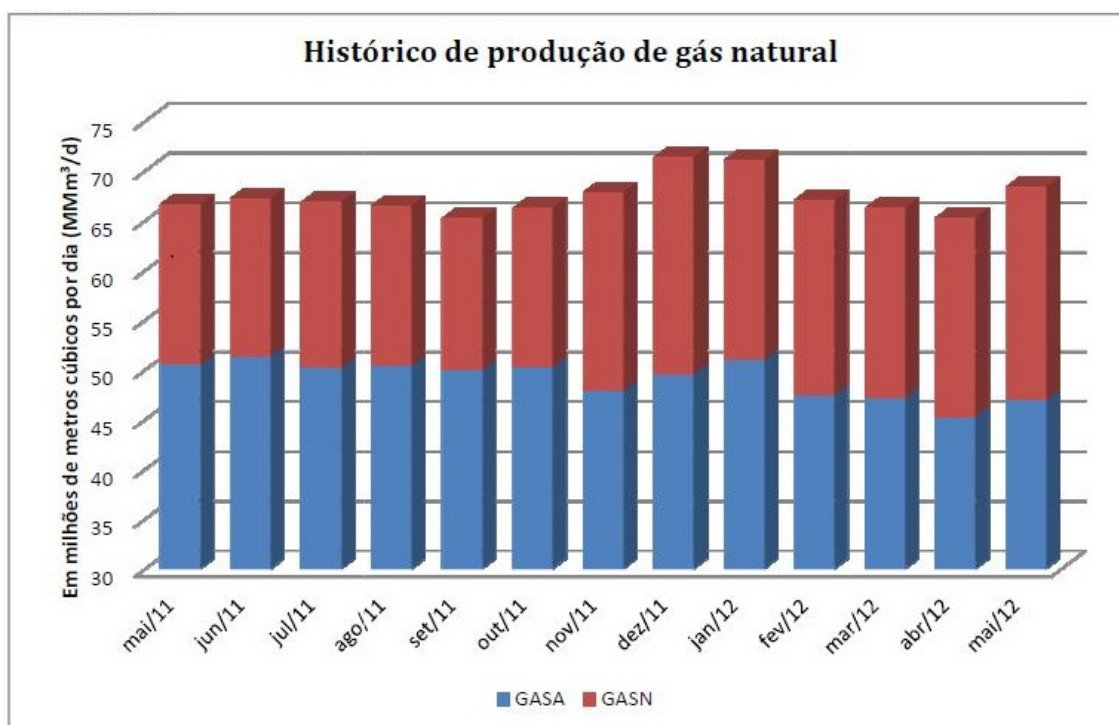


Figura 1.1: Histórico da Produção de gás natural no brasil [1].

O mais limpo dos combustíveis fósseis, o gás natural aumenta a durabilidade dos equipamentos que o utilizam e reduz impactos ambientais, pois emite baixíssimas quantidades de dióxido de enxofre e resíduos no processo de combustão. Versátil, o gás natural pode ser utilizado em aplicações domésticas, industriais e automotivas, substituindo a gasolina, o etanol, o óleo diesel e como fonte de geração de energia elétrica. O gás natural é comumente encontrado ocupando a parte superior de um reservatório de petróleo, onde o óleo e a água ocupam as partes mais baixas devido à diferença de densidade. Fig. 1.2

As condições inerentes à extração impedem que essas fases sejam produzidas isoladamente. Assim, o gás é produzido em quantidade e composições variadas podendo arrastar consigo gotículas de óleo na forma de névoa, da mesma forma a água de formação pode ser levada pelo gás em forma de vapor. O interesse econômico na exploração de poços de petróleo está na produção de hidrocarbonetos (óleo e



Figura 1.2: Corte de um reservatório de Petróleo.

gás) e, para tanto é preciso dotar os campos de instalações destinadas a realizar o processamento primário dos fluidos. A fim de reduzir custos de transporte, esse processamento é feito no próprio local de extração. A figura 1.3 mostra um esquema simplificado do processamento primário de fluidos.

O processamento primário de fluidos tem então como finalidades promover a separação entre óleo, gás e água e condicionar os hidrocarbonetos para que possam ser transferidos para refinaria ou unidades de processamento de gás natural (UPGNs) bem como tratar a água produzida para que possa ser reaproveitada ou descartada conforme for a opção tecnicamente mais adequada.

Em uma instalação de processamento primário, a separação gás/líquido é feita inicialmente por ação da gravidade, devido à grande diferença de densidades através de equipamentos denominados separadores. O desenvolvimento de equipamentos mais compactos conduziu quase que unicamente ao desenvolvimento de separadores do tipo ciclônicos, que ocupam um volume muito inferior ao de um separador gravitacional com a mesma capacidade. Os separadores ciclônicos ou centrífugos não possuem partes móveis e, portanto tem um baixo custo de manutenção, podem ser utilizados em condições severas de processo, como altas temperaturas e pressões, sendo bastante robustos.

O separador ciclônico de corpo cilíndrico com aletas defletoras é um modelo de separador compacto para gás e água que é utilizado nos primeiros estágios do processamento primário durante a extração do gás natural. Este equipamento é considerado um separador compacto devido a sua grande capacidade de processamento ocupando um volume pequeno da planta de processamento. O separador ciclônico

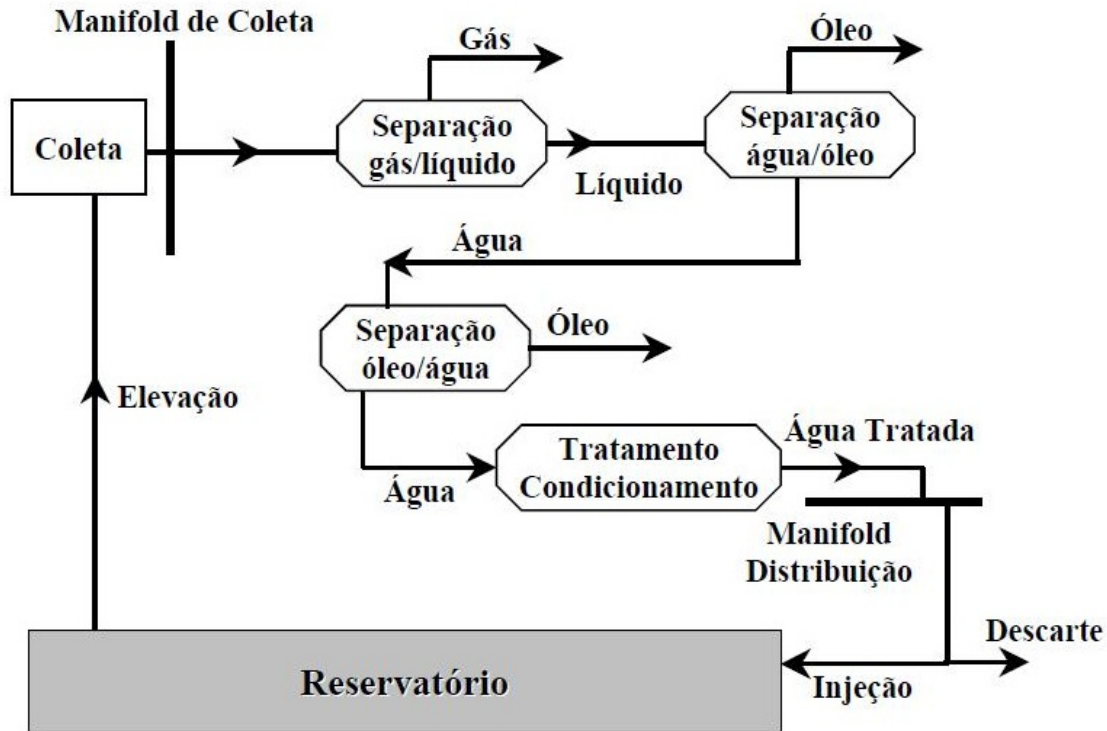


Figura 1.3: Processamento Primário de Fluidos

de corpo cilíndrico com aletas defletoras será o objeto deste estudo.

1.1.1 Objetivos

A caracterização do escoamento interno no separador gás-líquido em questão é uma demanda urgente da cadeia de produção de gás natural e seus resultados devem fornecer meios para a melhoria das práticas de projeto e operação do mesmo. Para tanto, a construção de um protótipo que permita a visualização do escoamento no interior do separador se mostra como sendo um recurso inédito e de grande valor para o entendimento dos fenômenos físicos que interferem na eficiência de separação da mistura proveniente dos poços de exploração. O dimensionamento e construção do protótipo bem como de uma bancada de testes consistem na primeira grande fase deste estudo.

O objetivo central do trabalho será de projetar e construir um separador gás-líquido em escala laboratorial e executar uma sequência de experimentos capazes de fornecer de forma rigorosa, dados críticos para uma correta interpretação e formulação teórica do escoamento no interior do separador como perfis de velocidade média e de estatísticas turbulentas. A formulação teórica sobre o escoamento bifásico em seu interior deve ser um meio para o entendimento amplo e detalhado do processo de separação.

Capítulo 2

Separadores Ciclônicos

2.1 Princípios de funcionamento de um Separador Ciclônico

Os separadores ciclônicos são uma evolução dos separadores gravitacionais que apresentam uma maior capacidade de processamento e são menos sujeitos a efeitos de balanço. Estes separadores podem trabalhar com substâncias em diferentes estados físicos fazendo uso da diferença de densidade entre as mesmas. É comum encontrarmos separadores ciclônicos que trabalham com gás e partículas sólidas, fazendo o trabalho de purificação do escoamento de gás. Os ciclones de líquido também são bastante comuns, e fazem a separação entre gás e líquido ou até mesmo entre dois líquidos. Os ciclones de líquido são comumente chamados de hidrociclones.

Os separadores do tipo ciclônicos funcionam através da ação de forças centrífugas que atuam nas partículas suspensas no escoamento de gás. A mistura de gás e partículas, líquidas ou sólidas entra no equipamento em alta velocidade na direção tangencial ao corpo do ciclone. A energia cinética proveniente do escoamento induz uma rotação do fluido que percorre internamente o ciclone, fazendo com que as partículas dispersas sejam centrifugadas para as paredes. A aceleração do fluido muitas vezes é melhorada com a utilização de palhetas defletoras que diminuem a seção percorrida pelo escoamento, aumentando sua velocidade.

As partículas de líquido ou sólido a serem retiradas do escoamento apresentam uma considerável diferença de densidade em relação ao gás e, devido a esta diferença, o líquido ou sólido é acelerado no sentido radial do corpo do ciclone, aderindo à parede do equipamento e escoando para ser descartado na saída inferior. As partículas de gás, ou em alguns casos do líquido de menor densidade, tendem a se concentrar no centro de rotação do ciclone devido à formação de uma zona de baixa pressão, onde são capturadas por um duto central e conduzidas a uma saída superior. A Fig. 2.1 ilustra o padrão de escoamento e um ciclone de corpo cônico.

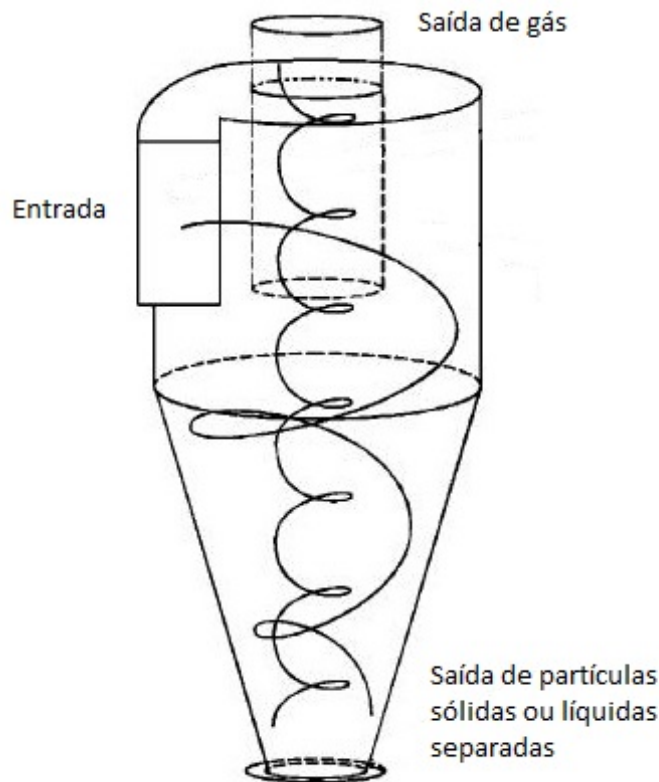


Figura 2.1: Padrão de Escoamento em um Separador Ciclônico

Existem ciclones de configurações variadas onde podem ter corpo cônico ou cilíndrico e seus componentes internos podem incluir palhetas defletoras que melhoram a transformação da energia cinética em força centrífuga, eliminadores de névoa que são emaranhados de fios onde as gotículas de líquido dispersas em um escoamento de gás coalescem favorecidas pela vasta área superficial formadas pelos fios de modo a melhorar a eficiência de separação. Ciclones podem possuir pratos de contenção que no caso de separadores que funcionam com alguma quantidade de óleo, fazem a contenção da espuma formada devido à turbulência do escoamento. Devido ao seu formato, em alguns casos são chamados de chapéu chinês.

2.1.1 Escoamento Rotativo

O escoamento rotativo é particularmente relevante para o estudo de separadores ciclônicos e exerce um papel central no desenvolvimento de novas tecnologias para a intensificação de processos. As equações que regem o movimento são obtidas segundo Hoffmann (2002) [2] considerando inicialmente dois tipos de escoamento rotativo ideal, o escoamento rotativo forçado onde o escoamento é rotacionado com a mesma distribuição de velocidade tangencial de um corpo rígido e o escoamento de vórtice livre que conserva o momento angular do elemento de fluido nos diferentes raios de

rotação. A distribuição da velocidade tangencial em um fluido real é intermediária a estes dois extremos.

Inicialmente, consideramos as forças atuantes em um elemento de fluido, representado por coordenadas cilíndricas (r, θ, z) fixas no espaço por seu eixo de rotação z . O elemento de fluido é rotacionado e acelerado na direção do centro de rotação pela chamada aceleração centrípeta. Ao se observar o mesmo a partir de um sistema de coordenadas não-fixos, mas que rotaciona juntamente com a partícula, a aceleração centrípeta não é verificada mas uma força aparente chamada força centrífuga surge fora do eixo de rotação, figura 2.2.

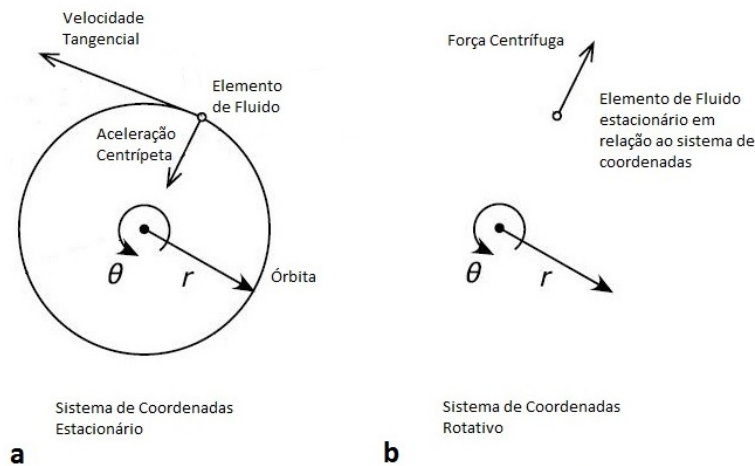


Figura 2.2: Elemento de fluido sendo rotacionado, de dois diferentes pontos de observação, onde a é um sistema de coordenadas fixo e b um sistema de coordenadas que gira com o elemento

Quando o movimento é considerado como uma rotação de corpo rígido (viscosidade infinita) os elementos de fluido localizados em diferentes posições radiais devem ter a mesma velocidade angular Ω medida em radianos por segundo e uma velocidade tangencial v_0 medida em metros por segundo.

$$v_0 = \Omega \times r \tag{2.1}$$

No caso oposto, onde um fluido não tem viscosidade, o movimento de um elemento de fluido não será influenciado por elementos vizinhos independente do raio dos mesmos. Se diminuirmos o raio de um elemento, sua velocidade tangencial aumenta pela lei da conservação do momento angular. Um vórtice que obedece a essa lei é chamado "livre de perdas" e

$$v_0 \times r = C \tag{2.2}$$

Onde C é uma constante. Estes dois padrões ideais de escoamento rotacional

são derivados das equações fundamentais da mecânica dos fluidos. Um fluido real terá alguma viscosidade finita, que causa transferência de momento angular entre as camadas e este fenômeno será ampliado com a presença de turbulência. Um escoamento rotacional real normalmente tem um centro de rotação próxima à de corpo-rígido, cercada por uma região próxima à rotação livre de perdas, chamado vórtice de Rankine mostrado na figura 2.3.

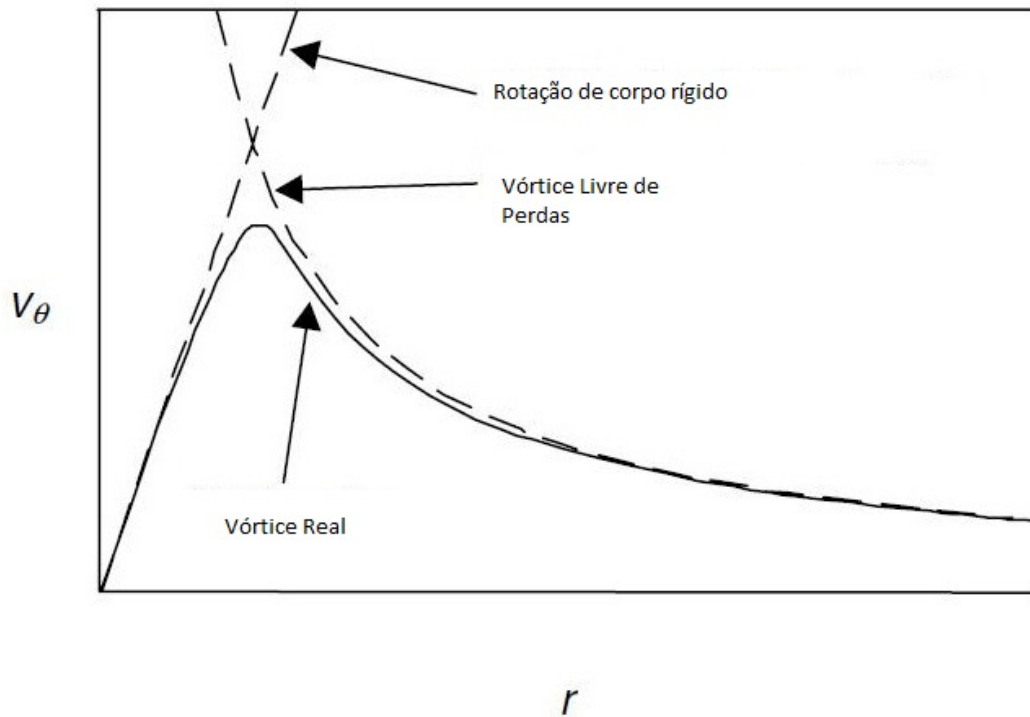


Figura 2.3: Esboço mostrando os dois casos ideais e a distribuição de velocidade tangencial em um vórtice real [2]

2.1.2 Movimento de uma Partícula

Em um separador ciclônico as partículas presentes se movem em relação ao gás a uma velocidade terminal e a velocidade de uma partícula determina se esta será capturada ou perdida para o escoamento. Para calcular a velocidade terminal de uma partícula, inicia-se por fazer o balanço de forças no elemento de fluido, onde a aceleração da partícula é dada pela diferença entre a força de corpo atuante e o arrasto causado pelo escoamento do fluido, os termos de força variável segundo Hoffmann [2] podem ser ignorados para hidrociclones.

Se a partícula rotaciona com a mesma velocidade terminal do gás, e escolhermos um sistema de coordenadas que gira juntamente com a partícula podemos considerar a força de corpo (neste caso a força centrífuga) como análoga à força gravitacional

e encontrar sua velocidade terminal a partir da largamente utilizada equação de Souders-Brown [8].

A equação de Souders-Brown é muito utilizada para o dimensionamento de separadores gravitacionais. Foi originalmente desenvolvida em 1934 para aplicação em separadores do tipo sólido-gás, porém vem sendo aplicada a todos os tipos de separadores centrífugos de forma generalizada. A equação de Souders-Brown não leva em consideração muitos fatores específicos dos ciclones de líquido, porém apresenta resultados bastante aproximados que, baseados em testes de escala laboratoriais confirmaram a validade de sua aplicação. Os contrapontos a esse método serão levantados posteriormente em uma análise em condições reais de operação.

Este método se baseia no fato da capacidade de processamento de um vaso separador poder ser limitada pela quantidade de arraste de partículas que pode ser tolerado, onde limita a máxima velocidade de vapor que permitirá uma operação satisfatória. O carregamento de partículas acontece devido à ação dinâmica do gás, que sobe carregando parte do líquido ou das partículas em processamento. Souders-Brown faz uso das propriedades aerodinâmicas da partícula e da influência do campo gravitacional sobre a mesma, não levando em consideração fatores como a tensão superficial da substância no caso de líquido nem a viscosidade.

Com equações teóricas que fazem o balanço entre a resistência oferecida por uma partícula de um determinado diâmetro ao escoamento e o peso da mesma e fazendo uso de constantes empiricamente derivadas, obtém-se uma equação para a máxima velocidade de vapor permitida de acordo com o máximo carregamento de partículas que pode ser tolerado nas condições de operação. A velocidade de suspensão teórica de uma partícula é a velocidade de subida da corrente de fluido requerida para suspender a mesma e pode ser determinada pela diferença entre a resistência da partícula ao movimento do fluido e a ação da gravidade.

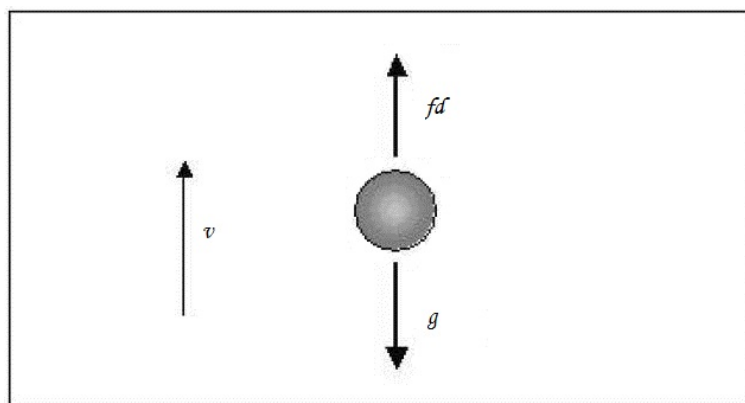


Figura 2.4: Forças relevantes atuantes em uma partícula de fluido em um escoamento de gás ascendente

Considerando que esta partícula seja esférica, a expressão para a resistência ao escoamento é dada por

$$f_a = K\mu\frac{\pi^{1/2}}{2} + k\rho_2\frac{\pi d^2}{4}v^2 \quad (2.3)$$

Onde f_a é a força total atuante na partícula, K e k são constantes empíricas, μ é a viscosidade do fluido, ρ_2 a massa específica, d é o diâmetro da partícula e v a velocidade linear relativa entre o fluido e a partícula. Sendo a viscosidade do vapor muito baixa (segundo Souders-Brown, da ordem de 0.01 a 0.001Cp), o primeiro termo à direita pode ser negligenciado.

$$f_a = k\rho_2\frac{\pi d^2}{4}v^2 \quad (2.4)$$

A força gravitacional subtraída do empuxo gerado pelo volume ocupado pelo elemento de fluido é dado por

$$f_g = \frac{\pi d^3}{6}(\rho_1 - \rho_2)g \quad (2.5)$$

Onde ρ_1 é a massa específica da partícula, e g a aceleração da gravidade. Quando a resistência da partícula ao escoamento do gás se igualar à diferença entre a força gravitacional e o empuxo, o elemento de fluido permanecerá suspenso.

$$f_a = f_g = k\rho_2\frac{\pi d^2}{4}v^2 = \frac{\pi d^3}{6}(\rho_1 - \rho_2)g \quad (2.6)$$

E a velocidade de suspensão é dada por

$$v = \left[\frac{2gd}{3k\rho_2}(\rho_1 - \rho_2)\right]^{1/2} \quad (2.7)$$

Sendo d e k constantes,

$$v = \left[B\frac{(\rho_1 - \rho_2)}{\rho_2}\right]^{1/2} \quad (2.8)$$

Onde

$$B = \left[\frac{2gd}{3k}\right]^{1/2} \quad (2.9)$$

Austrheim [9] aproxima a constante empírica k por

$$k = \frac{1}{2}C_d \quad (2.10)$$

Sendo C_d o coeficiente de arrasto da partícula, portanto:

$$B = K = \lambda = \left[\frac{4gd}{3C_d}\right]^{1/2} \quad (2.11)$$

Se o número de Reynolds for muito alto ou muito próximo em duas pressões diferentes, então o coeficiente de arrasto C_d é aproximadamente o mesmo e o significado físico da constante K foi interpretado por Austrheim [9] da seguinte forma: Partículas de fluidos com o mesmo diâmetro e velocidade inicial igual a zero terão a mesma aceleração se o valor de K for mantido o mesmo para duas diferentes pressões.

2.1.3 Cálculo do Diâmetro do Separador

A velocidade de separação do gás é determinada por meio do valor crítico da constante K . Austrheim afirma que este valor crítico é normalmente determinado experimentalmente e representa o valor para o qual a velocidade do gás é igual à velocidade terminal da partícula:

$$v = K \left[\frac{(\rho_1 - \rho_2)}{\rho_2} \right]^{1/2} \quad (2.12)$$

O valor da constante K para separadores ciclônicos com elementos internos pode alcançar, segundo Orange [10], valores como $K \leq 1m/s$. A velocidade máxima encontrada é utilizada para calcular o diâmetro D do separador para uma vazão de gas proposta \dot{Q}_g :

$$v = \frac{\dot{Q}_g}{A} = \frac{\dot{Q}_g}{\pi \left(\frac{D}{2}\right)^2} \quad (2.13)$$

$$D \geq \left[\frac{4\dot{Q}_g}{\pi v} \right]^{1/2} \quad (2.14)$$

Substituindo a equação para a velocidade crítica, obtém-se:

$$D \geq \left[\frac{4\dot{Q}_g}{\pi K \left[\frac{(\rho_1 - \rho_2)}{\rho_2} \right]^{1/2}} \right]^{1/2} \quad (2.15)$$

O critério de Souders-Brown fornece assim um diâmetro mínimo necessário para a capacidade de processamento proposta. Porém, outros fatores inerentes ao processo devem ser considerados e a queda de pressão dentro de um equipamento é um dado importante em uma planta de processamento primário e deve ser minimizada tanto quanto possível. O procedimento normal para medir a queda de pressão em um processo industrial é medir a pressão estática na parede na tubulação à montante e à jusante ou aspirante. Porém, a rotação do fluido faz com que a pressão estática junto a parede seja maior do que a média na seção transversal e existe a questão de o que fazer com a pressão estática armazenada no movimento giratório [2].

Austrheim (2007) [11] avalia criticamente o emprego da equação de Souders-Brown baseada no valor K e compara com resultados experimentais em condições

de elevada pressão em busca de métodos mais robustos de projeto e operação de separadores a fim de melhorar fatores como a compacidade do equipamento. Na prática quando uma coluna de separação é projetada, objeto inicial da aplicação do método de Souders-Brown, o valor K recomendado para baixas pressões para evitar o carregamento de partículas pelo escoamento de gás ascendente é $K \leq 0.1m/s$. Frequentemente uma margem de segurança é adotada para equipamentos sem componentes internos.

Ao se aumentar a pressão de trabalho o valor K é usualmente declinado, o que não surpreende visto que subindo a pressão de trabalho, a tensão superficial decai, diminuindo o diâmetro das gotas. Recomenda-se que para uma pressão de $85bar$ uma diminuição de 25% do valor K . É claro que para separadores equipados com componentes internos, o valor K pode subir significativamente.

Os resultados de Austrheim (2007) mostraram que a eficiência de separação caiu com o aumento da vazão de gás. Entre 20 e $50bar$ a performance do sistema foi praticamente a mesma enquanto que a $92bar$ a eficiência foi radicalmente abaixo do esperado, indicando que variações nas propriedades do fluido são cruciais para a performance.

As diferenças nas propriedades físicas são especialmente devido a tensão interfacial, à densidade e viscosidade do líquido. Nos casos onde se usou apenas gás natural, a eficiência de separação sob as mesmas condições de operação foi muito maior do que o caso com a presença de óleo. A pressão dinâmica do gás aumenta se a velocidade superficial do gás é mantida constante enquanto que a pressão é aumentada.

Austrheim afirma que , considerando a eficiência de separação para pequenas gotas próximas ao limite de separação, é preciso que se mantenha o número de Stokes constante, sendo este:

$$Stk = \frac{(\rho_l - \rho_g)d^2v_g}{18\mu_g D} \quad (2.16)$$

onde D é o diâmetro do separador, v_g a velocidade superficial do gás no corpo do ciclone. Se as densidades e a viscosidade do gás não variarem muito com a pressão, então a eficiência pode ser mantida garantindo-se a velocidade do gás constante. Os resultados mostram que o valor de Souders-Brown é relativamente bom na prática do design de separadores. No entanto, o fato de o método não levar em consideração a natureza dos líquidos utilizados resulta em uma diferença significativa entre a eficiência obtida e a eficiência prevista. Da mesma forma a pressão de operação teve fortes influencias sobre a separação.

Os ciclones atuaram de forma muito diferente a altas pressões para os fluidos utilizados, esclarecendo que as tensões interfaciais devido à natureza dos fluidos podem

ser a causa das diferenças. Austrheim conclui que as regras de dimensionamento de ciclones existentes até o momento não são suficientes.

Nanninga et. al [12] utiliza um critério que limita a queda de pressão admissível ao longo do corpo do hidrociclone e afirma que a queda de pressão total no corpo de um ciclone pode ser descrita por:

$$\Delta P = K_w \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_g \cdot (v_0)^2 \quad (2.17)$$

Nesta fórmula o fator de atrito K_w é obtido a partir da medida da perda de carga ΔP tomada experimentalmente e da expressão da energia cinética baseada na velocidade superficial v_0 e da densidade do gás ρ_g sendo que o fator K_w é adimensional se forem utilizadas unidades do SI. A velocidade superficial do gás é calculada a partir da vazão de gás e da área da seção transversal do separador. Nanninga [12] estimou o fator de atrito para um separador cilíndrico com design padrão $K_w = 385$ (adimensional).

Substituindo a expressão para a velocidade máxima e utilizando o fator de atrito $K_w = 385$ obtém-se

$$D \geq \frac{Q_{gmax}^2 \cdot \rho_g \cdot 16}{2 \cdot \pi^2 \cdot \Delta P} \quad (2.18)$$

que nas condições de operação reproduzíveis no laboratório forneceram um diâmetro $D \geq 150mm$.

2.1.4 Detalhamento do Separador

O separador gás-líquido ciclônico de corpo cilíndrico e com elementos internos é uma evolução dos separadores ciclônicos de corpo cônico desenvolvido para melhorar a separação de líquidos ou sólidos de uma corrente de gás. Trata-se de um separador cilíndrico onde a corrente de gás é rotacionada por pás helicoidais que aceleram o escoamento. A exaustão do gás separado se dá através de um duto central ascendente e o líquido ou sólido separado escoam através das paredes do equipamento em um escoamento descendente. Ao menos um prato é provido abaixo do tubo de descarga do gás e ao menos um direcionador no sentido do diâmetro é instalado na base deste prato a fim de interromper a rotação do líquido ou sólido separado, evitando assim que um efeito de sucção ocorra na saída inferior do separador, carregando consigo parte do gás.

A figura 2.5 mostra uma seção vertical do equipamento de separação. O gás para ser purificado é alimentado para um compartimento superior (1) do separador através de uma tubulação de entrada (3) onde entra em alta velocidade. É então direcionado para um conjunto de pás helicoidais fixas, disposto no centro do com-

partimento (4) do separador, conferindo um movimento rotativo ao gás que gera a força centrífuga necessária para produzir a separação. O líquido separado acumula-se na parede interna (6) do equipamento e então escoar para baixo pela superfície do prato (7). O material separado é então descarregado através do cone inferior (8) e do duto (9).

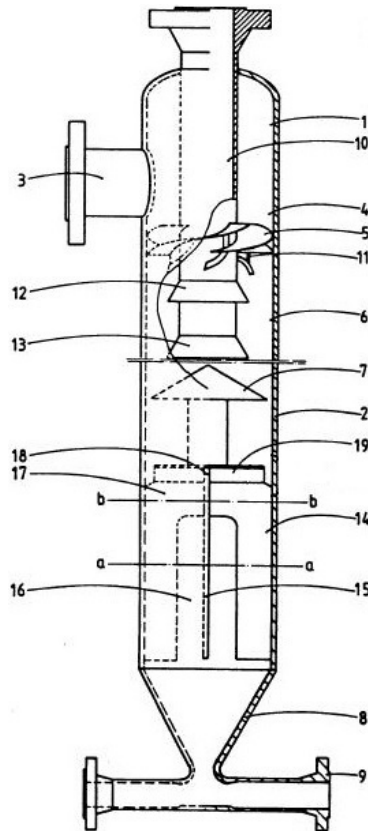


Figura 2.5: Corte vertical do separador segundo o documento de patente [3]

O gás purificado é descarregado através de um duto de descarga (10) que é montado coaxialmente ao corpo do separador e projetada para cima através do compartimento (4). As lâminas helicoidais (5) são fixadas ao duto de saída de gás a uma distância adequada entre si e parcialmente sobrepostas para criar um canal curvo. Cada lâmina helicoidal (5) possui uma seção inferior de passo constante e uma seção onde o passo aumenta gradualmente na direção ascendente. Essa disposição acelera a alimentação do gás, e diminui a queda de pressão no interior do equipamento.

Direcionadores verticais são instalados entre as laminas do helicoide a fim de aumentar a capacidade de separação. Quando vistas na direção do escoamento, os direcionadores (11) se estendem desde o duto de descarga do gás até a parede interna (6) do separador. Os direcionadores (11) são modelados como planos retos. A afiação das pontas dos direcionadores melhora ainda mais a capacidade de separação de liquido. Para aumentar ainda mais a separação de liquido do gás, luvas cônicas (12)

e (13) são fixadas na parede externa do cano de descarga do gás; são as chamadas saias anti-filme. O líquido que adere à parede externa do duto de saída de gás é guiado ao longo das luvas cônicas na direção da parede do separador.

O prato de contenção (7), que tem modelagem preferencialmente cônica, causa a fixação do líquido separado. Sem o prato, o líquido separado seria rotacionado violentamente até a parte inferior do equipamento causando erosão do cone e da parede interna nas proximidades. Direcionadores (14) e (15) são dispostos perpendicularmente entre si, abaixo do prato de contenção. Assim o gás e, conseqüentemente, o líquido separado nas proximidades do cone são mantidos em repouso. A altura total de cada direcionador deve ser ao menos igual ao diâmetro interno do separador. Um corte horizontal do equipamento na altura dos direcionadores é mostrado na figura 2.6.

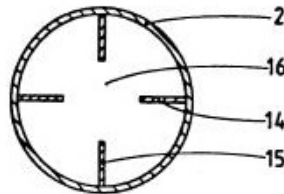


Figura 2.6: Corte horizontal do separador segundo o documento de patente [3]

Cada direcionador tem uma abertura (16) que se estende até a borda inferior do mesmo. As aberturas facilitam a descarga da substância formada pelo líquido ou sólidos separados e evitam a solidificação que poderia ocorrer. Além do que, os direcionadores facilitam a subida do escoamento de gás até o duto de descarga. Um corte horizontal do separador é mostrado na figura 2.7.

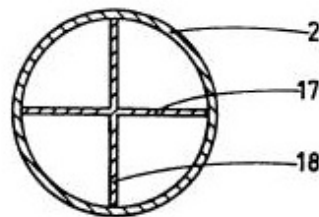


Figura 2.7: Corte horizontal do separador segundo o documento de patente [3]

2.2 Parâmetros de Influência na Eficiência de Separação

2.2.1 Arraste de Gotículas

O arraste de gotículas de um filme de líquido por uma corrente de gás é de considerável importância prática para a eficiência de separação de um hidrociclone. O aparecimento de arraste de gotas altera significativamente os mecanismos transferência de massa, quantidade de movimento e energia entre o filme de líquido e a corrente de gás do núcleo. A fim de prever com precisão uma série de importantes fenômenos físicos, uma compreensão dos mecanismos do arraste e da correlação para a fração de líquido arrastado são essenciais [13].

O arraste de líquido em um escoamento concorrente de gás e líquido ocorre, segundo Austrheim [9], quando a velocidade relativa entre a fase gasosa e a fase líquida excede limites críticos. Esses limites são altamente dependentes das propriedades físicas do líquido. Austrheim ainda afirma que diferentes mecanismos de arraste relacionados aos diferentes regimes de escoamento do filme de líquido já foram identificados, mas para que ocorra o arraste de partículas, uma instabilidade interfacial precisa ocorrer. No caso de um escoamento concorrente de gás e líquido isto é chamado de instabilidade de Kelvin-Helmholtz (K-H).

Um filme de líquido turbulento pode penetrar em um escoamento de gás de diferentes maneiras. Ishii e Grolmes [14] em seu artigo clássico resumem os quatro principais mecanismos para que o arraste ocorra em um escoamento concorrente gas-líquido, trabalho realizado utilizando uma placa inclinada contendo um filme de líquido e exposta a um escoamento de gás sobre o mesmo. Esses mecanismos são mostrados na figura 2.8 abaixo.

Quando a fase gasosa é que flui sobre uma película de líquido, ocorrem diferentes regimes de escoamento dependendo da magnitude da velocidade do gás de acordo com Hewitt [15]. Para uma velocidade muito pequena de gás a interface é relativamente estável, no entanto, a medida que a velocidade do gás aumenta, pequenas ondas começam a aparecer. A amplitude e a irregularidade das ondas aumentam quando a velocidade do gás cresce. Quando a vazão de gás aumenta, as pequenas ondas se transformam em rolos de maior amplitude [14] ou a uma velocidade ainda mais elevada do gás, o início do arraste ocorre.

Para um número de Reynolds relativamente elevado no filme $Re > 160$, o mecanismo de arraste é basicamente devido ao cisalhamento de gotas de cristas de onda por uma corrente de gás altamente turbulenta ilustrado na primeira imagem da figura 2.8. No entanto, a um menor Número de Reynolds, os mecanismos de arraste tais como o corte da onda mostrado na segunda imagem da figura 2.8, tornam-se

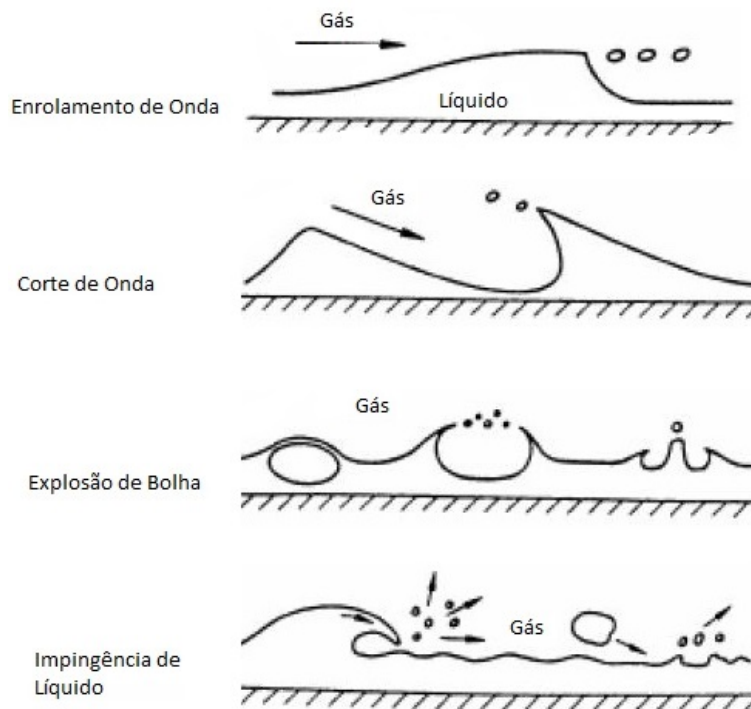


Figura 2.8: Mecanismo de arraste por enrolamento de onda ilustrado pelo clássico artigo de Ishii e Grolmes(1975)

possíveis. Os dois últimos mecanismos são associados respectivamente com bolhas que estouram e ao próprio líquido que impinge na superfície do filme e produz pequenas gotas. Para um fluido relativamente invíscido, o mecanismo baseado no chamado enrolamento de onda é o modo predominante de arraste de líquido em um escoamento central de gás em condições normais [13].

Ishii e Grolmes argumentaram ainda que a criação de arraste é dependente do número de Reynolds do filme de líquido apontando ainda que existe um limite inferior para o início do fenômeno. Os diferentes regimes de arraste relacionados com o número de Weber do filme líquido estão representados na figura 2.9, onde o número de Weber pode ser interpretado como uma medida da inércia fluídica comparada com a tensão superficial do líquido. Segundo Ishii, o arraste por enrolamento de onda pode ser bem previsto pela instabilidade de Kelvin-Helmholtz que surge na interface de duas camadas de fluido de diferentes densidades [16].

Poucos trabalhos foram publicados com foco no arraste de gotas em hidrociclones, embora alguns já comecem a surgir na literatura. Nanninga et al.(2006) [12] estudaram os fenômenos de arraste e inundação em um hidrociclone de escoamento ascendente similar ao deste trabalho, eles instalaram e testaram modificações radicais nas palhetas do helicóide que induz um escoamento periférico em vez de axial, atrasando significativamente os fenômenos de arraste e inundação.

Muitos trabalhos têm sido feitos no grupo de pesquisa do autor Hoffmann [2]

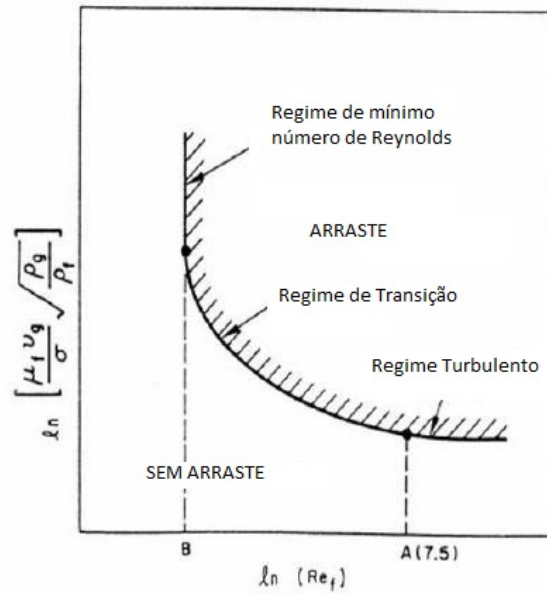


Figura 2.9: Regimes de arraste ocorrendo em diferentes regiões do gráfico em função do número de Reynolds do filme líquido

dentro do projeto HiPGaS(Separação de gás a alta pressão) que lança alguma luz sobre a natureza do fenômeno de arraste e aponta o caminho para a formulação de modelos preditivos.

Hoffmann afirma que o regime de escoamento depende do número de Reynolds do filme.

$$Re_l \equiv \frac{\rho_l u_l \delta}{\mu_l} = \frac{\rho_l \Gamma}{\mu_l} \quad (2.19)$$

onde δ é a espessura do filme, u_l a velocidade média e ρ_l e μ_l são a densidade e viscosidade do líquido, respectivamente. Γ é a vazão de líquido no filme por unidade de perímetro molhado. O regime de escoamento no filme de líquido mais relevante na obra de Austrheim(2005) [9] é o regime correspondente a Re_l alto, chamado de arraste por enrolamento de onda como mostra a figura 2.9.

A figura ilustra a estratégia de modelagem deste processo. Foi considerado um equilíbrio de forças entre a força de arrasto F_d , a partir do gás sob uma crista de onda no filme, e a força de retenção da tensão superficial F_σ .

O arraste ocorre quando a força de arraste supera a tensão superficial do líquido.

$$F_d \geq F_\sigma \quad (2.20)$$

Seu critério para o aparecimento do arraste é:

$$\frac{\mu_l u_g}{\sigma} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \geq 11.78 N_\mu^{0.8} Re_l^{-\frac{1}{3}} \quad \text{para} \quad N_\mu \leq \frac{1}{15} \quad (2.21)$$

$$\frac{\mu_l u_g}{\sigma} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \geq 1.35 Re_l^{-\frac{1}{3}} \quad \text{para} \quad N_\mu \geq \frac{1}{15} \quad (2.22)$$

N_μ é um "índice de viscosidade", a qual mede a relação entre a força viscosa devido ao escoamento interno na onda e a força devido à tensão superficial.

$$N_\mu \equiv \frac{\mu_l}{\sqrt{\rho_l \sigma} \sqrt{\frac{\sigma}{g \Delta \rho}}} \quad (2.23)$$

Onde $\Delta \rho$ é a diferença entre a densidade do gás e do líquido. Austrheim (2005) [9] aplicando esta teoria para ciclones, assumiu que a eficiência do ciclone, quando limitada pelo arraste é uma função da razão entre F_d e F_σ . Sendo assim, a eficiência de um ciclone pode ser escrita como:

$$\eta_{entr(a)} = f\left(\frac{\frac{\mu_l u_g}{\sigma} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}}}{N_\mu^a Re_l^{-\frac{1}{3}}}\right) \quad (2.24)$$

Austrheim (2005) [9] ajustou o valor do expoente a de forma a otimizar a performance de seu modelo, da mesma forma que Ishii e Grolmes (1975) [14], encontrando o valor de 0.4. O número de Reynolds do filme que está rotacionando em torno da parede é calculado, segundo Hoffmann [2] como:

$$Re_l = \frac{\rho_l u_l \delta}{\mu_l} = \frac{\dot{Q} \eta \rho_l}{P_\omega \mu_l} \quad (2.25)$$

onde P_ω é tomado como $\frac{\pi D}{\cos \alpha}$. \dot{Q} é a vazão total de líquido no ciclone, η é a fração separada na parede e α é o ângulo em relação á horizontal do escoamento. α é usado por Austrheim como igual ao ângulo de saída β do helicóide.

Como o filme de líquido está rotacionando o ciclone, o campo gravitacional g precisa ser substituído pela aceleração centrípeta do filme, que é dada pelo quadrado da velocidade tangencial do filme dividida pelo raio do ciclone, $\frac{u_{\theta,l}}{R}$. A velocidade tangencial do filme de líquido é dada por $u_{\theta,l} = u_l \cos \alpha$ onde u_l é a velocidade absoluta do filme de líquido. Austrheim (2005) encontra a seguinte expressão para $u_{\theta,l}$:

$$u_{\theta,l} = \sqrt{\frac{f_{g,i} \rho_g u_{g,\theta}}{f_{l,\omega} \rho_l}} \quad (2.26)$$

onde $f_{g,i}$ e $f_{l,\omega}$ são os fatores de atrito entre o gás e o filme de líquido e entre o filme de líquido e a parede, respectivamente.

$$f_{g,i} = 0.005(1 + 300 \frac{\delta}{R}) \quad (2.27)$$

$$\sqrt{f_{l,\omega}} = K Re_l^m \quad (2.28)$$

Onde:

$$K = 3.73; m = -0.47 \quad \text{para} \quad 2 < Re_l < 100 \quad (2.29)$$

$$K = 1.96; m = -\frac{1}{3} \quad \text{para} \quad 100 < Re_l < 1000 \quad (2.30)$$

Para calcular $f_{g,i}$ é preciso obter δ , espessura do filme líquido, que é calculado por:

$$\delta = \frac{\dot{Q}}{P_\omega u_l} = \frac{\dot{Q} \cos \alpha}{P_\omega u_{l,\theta}} = \frac{\dot{Q} \cos^2 \alpha}{\pi D u_{l,\theta}} \quad (2.31)$$

2.2.2 Perfis de Velocidade

Alguns modelos preditivos para a eficiência de separação de ciclones têm sido propostas na literatura, sem diferenciar os separadores para líquidos e para sólidos. Peng (2002) [17] os divide em duas classes principais. A primeira, originada do trabalho de Barth (1956) baseado no balanço de forças de uma partícula rotacionando na interface entre o vórtice interno e externo. O arraste é proporcional ao diâmetro da partícula enquanto que a força centrífuga é proporcional ao cubo do diâmetro. Dessa forma, as partículas maiores são separadas enquanto que as menores são arrastadas pelo vórtice interno. Os modelos de Barth (1956) fazem as seguintes suposições a respeito do escoamento no ciclone: as velocidades tangencial e radial são constantes na superfície de separação e esta superfície é assumida como sendo coincidente com uma superfície cilíndrica obtida no prolongamento da tubulação de saída do gás até a base do ciclone.

A segunda classe de modelos preditivos considera o tempo de suspensão da partícula que atinge a parede do ciclone como um espiral descendente. Nesta aproximação é assumido que existe uma pequena velocidade em direção ao centro do ciclone que se torna alta na parte inferior do ciclone, varrendo as partículas que não conseguiram chegar até a parede. Peng afirma que as informações encontradas a respeito de ciclones providos de helicóides é insuficiente e faz um esforço de pesquisa nesta direção. Por falta de base de comparação, Peng compara o ciclone com helicóide ao ciclone cônico, ressaltando suas semelhanças e diferenças.

Peng (2002) investigou e mapeou o campo de velocidades em ciclones através da Anemometria Laser Doppler (LDA) e usou os resultados para identificar a melhor modelagem aproximada para ciclones com helicóides. Os testes foram feitos utilizando apenas ar seco com partículas traçadoras de forma a medir as velocidades

médias do gás, admitindo que estas partículas assumam a mesma velocidade. Em seu experimento foi utilizado um equipamento de anemometria Laser Doppler DAN-TEC com quatro raios e dois componentes de alta performance 5-W ar-íon. Este laser produz luz em dois comprimentos de onda: 514.5 e 488nm sendo que apenas o primeiro comprimento de onda foi usado. A frequência de um dos raios do laser foi deslocada em uma célula de Bragg de 40MHz. Peng realizou medidas em um ciclone cônico e em um ciclone cilíndrico com helicóide, sendo este último de maior interesse para este trabalho e está ilustrado à direita da figura 2.10

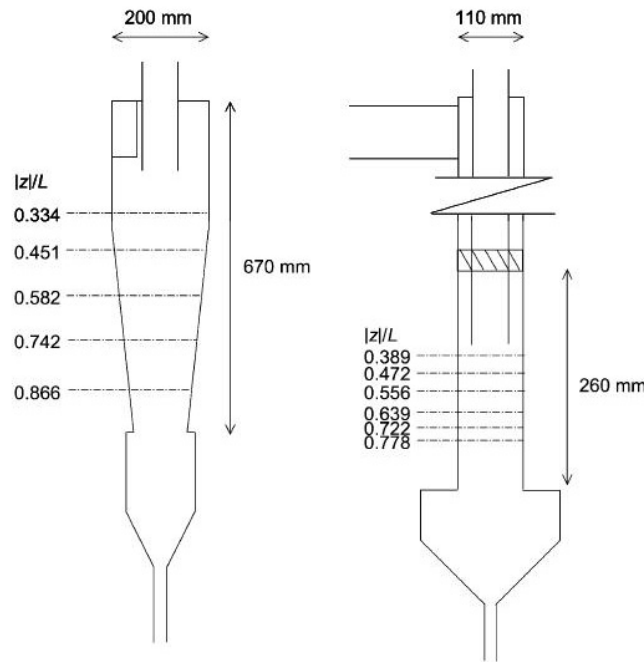


Figura 2.10: Ciclone de corpo cônico e ciclone cilíndrico com helicóides, analisados por Peng (2002)

Os dados obtidos por Peng(2002) para o ciclone cilíndrico com helicóide são ilustrados nas figuras 2.11 e 2.12

No ciclone cilíndrico com helicóide não foi possível fazer medições próximas ao eixo, pois não havia partículas traçadoras presentes. Os resultados mostraram que o padrão global de escoamento de um ciclone cilíndrico com helicóide e de um ciclone de corpo cônico é similar sendo que no primeiro a distribuição de velocidade é do tipo vórtice de Rankine com um vórtice quase livre na parte mais externa. Embora a seção mais próxima do eixo não tenha sido medida, sabe-se que a velocidade tangencial deve ser zero no eixo de rotação. O escoamento axial também é similar ao ciclone convencional, descendente na parte externa e ascendente na parte interna e o gás flui de fora para dentro do vórtice.

Enquanto a velocidade tangencial permanece praticamente a mesma na direção axial do ciclone de corpo cilíndrico, esta tende a diminuir com a profundidade.

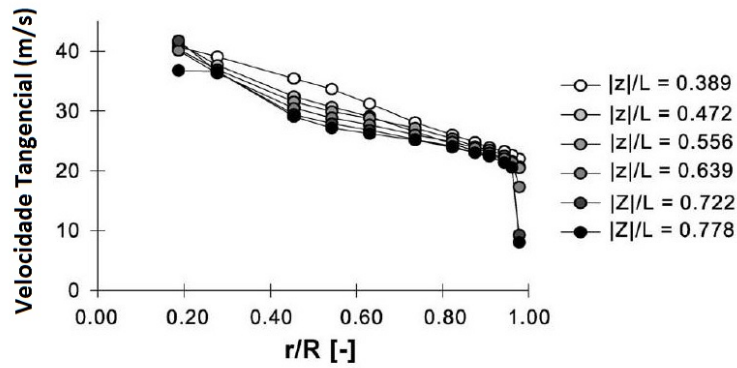


Figura 2.11: Velocidade tangencial em um ciclone de corpo cilíndrico com helicóide, obtidos por Peng (2002)

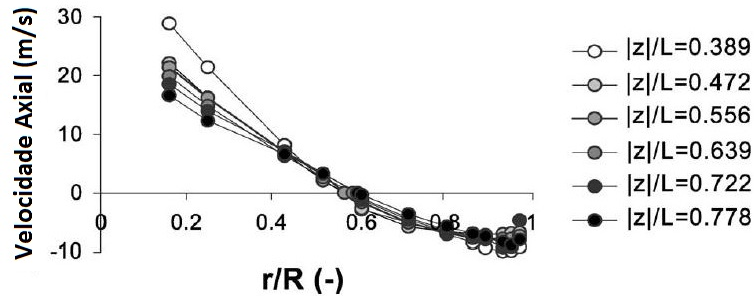


Figura 2.12: Velocidade axial em um ciclone de corpo cilíndrico com helicóide, obtidos por Peng (2002)

Como o escoamento não é restringido na parte inferior do corpo cilíndrico, a rotação precisa ser atenuada, diminuindo assim a velocidade tangencial do gás. Uma diferença importante entre ciclones cônicos e cilíndricos com elemento direcionador é a distribuição axial da velocidade radial no sentido do centro do equipamento.

A velocidade radial não é medida, porém calculada localmente a partir da integração da parte negativa do gráfico de velocidade axial, que fornece a vazão axial do escoamento descendente em cada ponto, computando as diferenças. No ciclone de corpo cônico a velocidade radial é praticamente constante enquanto que no ciclone com elemento direcionador existem regiões de alta velocidade no sentido do eixo do ciclone logo abaixo do bocal de saída do gás bem como na base do equipamento. Nos demais pontos mais afastados do centro, a velocidade no sentido do eixo é bastante baixa, apresentando pontos negativos.

Outra importante diferença entre os ciclones é a distribuição de velocidade radial. No ciclone cônico, esta é quase uniforme ao longo do raio. Já no ciclone com elemento direcionador, existem regiões de forte velocidade radial no sentido do centro do ciclone, logo abaixo do duto de saída do gás, como é mostrado na figura 2.13.

O aparecimento de velocidades negativas pode indicar a existência de regiões de recirculação.

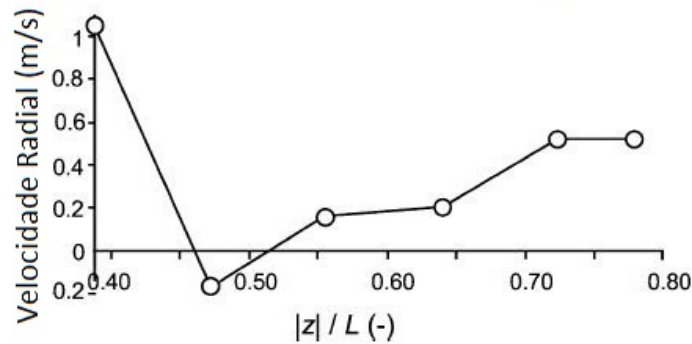


Figura 2.13: Velocidade radial em um ciclone de corpo cilíndrico com helicóide, obtidos por Peng (2002)

Fisher [18] estudou o campo tridimensional de velocidades de um hidrociclone de corpo cônico, utilizando anemometria a laser. Sete planos axiais diferentes foram investigados para três diferentes condições de operação e, embora o ciclone utilizado não seja similar ao deste trabalho, algumas informações podem ser relevante. Fisher afirma que para cada plano de medição, os perfis de velocidades tangenciais medidos exibiram características de vórtice forçado na região próxima ao core do gás e de vórtice livre nas regiões mais afastadas do centro. A velocidade tangencial é a componente dominante no estudo de um hidrociclone. A magnitude da velocidade tangencial aumentou conforme se aumentou a velocidade de saída do líquido. Existem regiões de recirculação próximas à entrada do ciclone que desaparecem na saída. A velocidade axial é a componente de menor domínio sobre o escoamento porém é a de maior importância para o processo de separação.

Em um próximo trabalho, Peng et. al (2005) [4] reproduzem os testes com a utilização de um traçador neutro a fim de evitar o problema recorrente com traçadores comuns: estes são separados pelo equipamento de forma que não permanecem na região central do escoamento, impedindo assim que se faça a visualização do núcleo gasoso. Este traçador é feito de bolhas de sabão preenchidas com hélio e são utilizadas para estudar o escoamento em um separador ciclônico cilíndrico com elemento direcionador que faz a separação gas-sólido. A visualização do equipamento é feita a olho nu e comparada com anemometria Laser-Doppler.

O trabalho de Peng et. al (2005) se dedica a estudar o padrão de escoamento especialmente no trecho onde ocorre o fenômeno de fim de vórtice, melhor detalhado na próxima seção. Os testes são feitos com um gerador de bolhas com hélio Sage Action modelo 5 que produz os traçadores e as informações são obtidas, tirando uma série de fotografias em alta velocidade com uma fonte de luz intermitente que

produz o contraste durante a exposição da camera fazendo com que o movimento do traçador apareça como uma sucessão de linhas curtas.

Peng confirma que o fenômeno do fim de vórtice ocorre a baixas vazões de gás enquanto que não existe a vazões altas. As observações laterais do core de gas a uma vazão de $50m^3/h$ correspondente a uma velocidade do gas de $1,46m/s$ demonstram que o núcleo gasoso possui um formato cônico tendo seu ápice no eixo do separador exatamente abaixo do duto de saída de gas e termina logo abaixo no corpo do ciclone. Esta observação confirma que o núcleo gasoso se curva para a parede do separador e gira a uma alta frequência. Visualmente, os videos mostraram uma lenta oscilação do brilho do núcleo cônico de um lado a outro que não foram compreendidas.

A observação por baixo do ciclone a uma vazão de $37m^3/h$ de gas correspondentes a uma velocidade superficial de $1.08m/s$ esclarecem que o núcleo gasoso se curva para a parede a medida que se desce no corpo do ciclone e faz um movimento de giro em torno do eixo do equipamento, fato que não pode ser observado com as medições com LDA. O comprimento dos traços luminosos mostra que a velocidade é mais baixa abaixo do fim do vórtice do que acima, indicando que pode existir um vórtice secundário induzido logo abaixo do primeiro.

A altas vazões , o vórtice de gás centraliza. Esse processo de centralização foi observado e notou-se que o fim do vortice desce ao longo da parede a medida que a vazão aumenta. Quando o anel encontra a base do separador a suficientes vazões, o núcleo gasoso é centralizado. O vórtice que adere a parede pode prejudicar a performance do separador causando arraste das partículas que já foram coletadas. Se o arraste puder ser eliminado, quanto mais longo o vórtice maior a eficiência e menor a queda de pressão no separador. A visualização do escoamento pode portanto ser uma importante ferramenta no melhoramento da eficiência do equipamento.

Com o vórtice centralizado, outra importante característica pode ser observada: a fronteira entre a parte interna e externa do vórtice aparente na figura 2.14 mostrando ter praticamente o mesmo diâmetro do duto de saída do gas, concordando com os dados obtidos com a anemometria Laser-Doppler

Hidrociclones são caracterizados pela performance e pela queda de pressão global, e é importante estender os conhecimentos sobre os fenômenos básicos que têm impacto na eficiência como os campos de velocidade e o escoamento das fases dispersas [5].

A anemometria Fase-Doppler pode fornecer a distribuição de velocidades e tamanho de partículas em um hidrociclone. Outra abordagem viabilizada por modernas técnicas de emissão de pósitrons, pode fornecer a trajetória de uma partícula individual de uma fase dispersa no espaço e no tempo. Esta técnica foi utilizada por Chang et. al (2011), obtendo a chamada trajetória Lagrangiana. Seguindo uma partícula é possível observar a reação e a interação de uma partícula ao escoamento

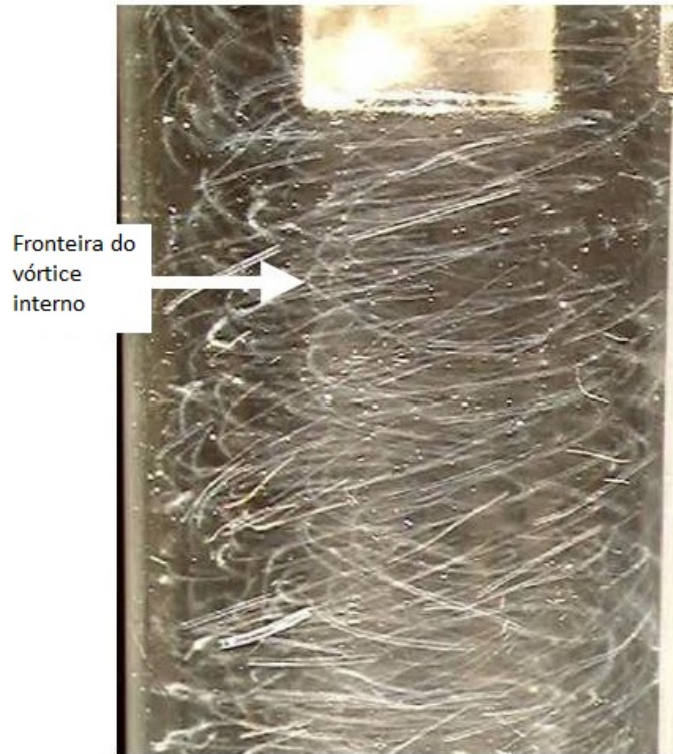


Figura 2.14: Fronteira entre a parte interna e externa do vórtice [4]

sob determinadas condições.

A técnica chamada de Rastreamento de Partícula por Emissão de Pósitrons (PEPT na sigla em inglês) é baseada no processo de decaimento radioativo, onde um próton do núcleo de radioisótopos é convertido em um nêutron, um pósitron e um neutrino. O pósitron, após perder energia, se move através do meio e elimina um elétron. Por conservação de energia, emite dois fótons gamma de 511KeV cada. Essa emissão é detectada por dois sensores que determinam a posição do traçador por triangulação cruzada [5].

Os testes de Chang foram feitos em um hidrociclone de corpo cônico, operando apenas com líquido e traçadores. A trajetória da partícula pôde ser obtida e observada na imagem 2.15 onde cada ponto representa uma posição da partícula.

Chang afirma que a animação do movimento da partícula mostra que, em vez da rotação direta através do corpo do ciclone a partir da entrada até a parte inferior do ciclone, a partícula algumas vezes faz um movimento radial em direção ao centro, revertendo a direção do escoamento radial e movendo-se para cima. A partícula parece ser capturada pelo vórtice interno se movendo para cima por um certo tempo e depois é centrifugada novamente para o vórtice descendente. O movimento de uma partícula no interior de um hidrociclone mostrou-se mais irregular que o esperado, Chang atribui o fenômeno à presença do fenômeno do fim de vórtice, melhor

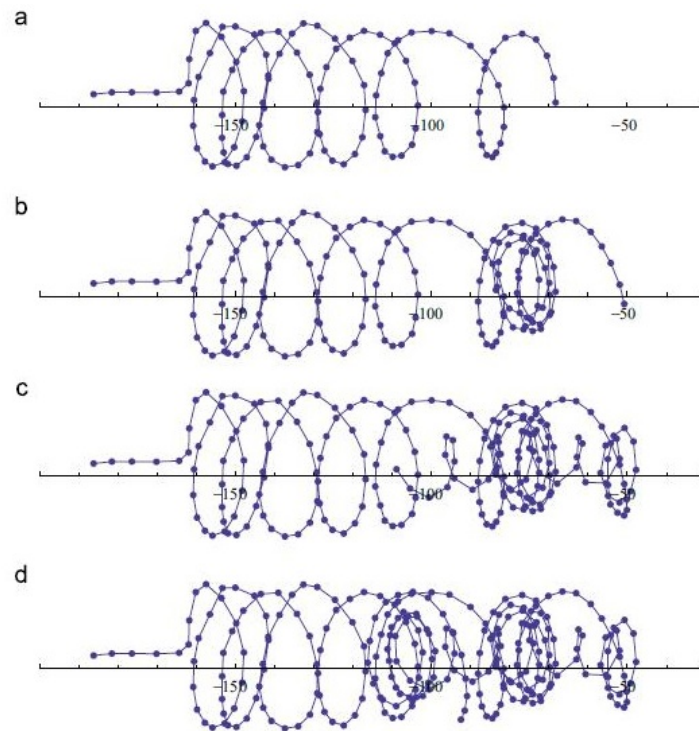


Figura 2.15: Trajetória de uma partícula em um hidrociclone [5])

detalhado na próxima seção.

2.2.3 Fenômeno do fim de Vórtice

Várias evidências de uma mudança súbita do padrão de escoamento correspondente ao fenômeno do fim do vortice foram observadas pela primeira vez pelo grupo de pesquisa de Hoffmann em 1995 [19]. O fenômeno do final do vórtice consiste na curvatura do core de gás em direção à parede do ciclone e seu movimento de precessão. Embora separadores ciclônicos tenham inúmeras vantagens e um grande número de aplicações, existem alguns fenômenos de escoamento que são cruciais à sua performance porém de difícil entendimento e controle. Um dos fenômenos mais importantes é o chamado fenômeno do fim de vórtice.

O fenômeno de fim de vórtice ocorre quando, sob algumas condições, o centro do vórtice desvia do eixo central do separador e adere à parede do ciclone, onde gira em um determinado nível acima da base do separador. A distância entre a base do separador e a saída do gás é frequentemente chamada de comprimento natural do vórtice e a presença do fenômeno do fim de vórtice influencia em muitos aspectos da operação do ciclone, de acordo com Peng et al. (2011) [6]:

- O espaço de separação do ciclone é assumido como sendo efetivo apenas acima do fim do vórtice. Este parâmetro normalmente é levado em consideração na modelagem da performance do ciclone utilizando de maneira direta o comprimento do

ciclone como o comprimento natural do vórtice.

- O transporte de partículas ao longo da parede do ciclone é inefetiva abaixo do fim do vórtice podendo levar ao entupimento do ciclone no caso de separadores para partículas sólidas.

- As paredes do ciclone podem ser expostas a severo desgaste na posição do fim do vórtice.

A figura 2.16 ilustra um ciclone com vórtice centralizado e de um escoamento com a presença do fim do vórtice.

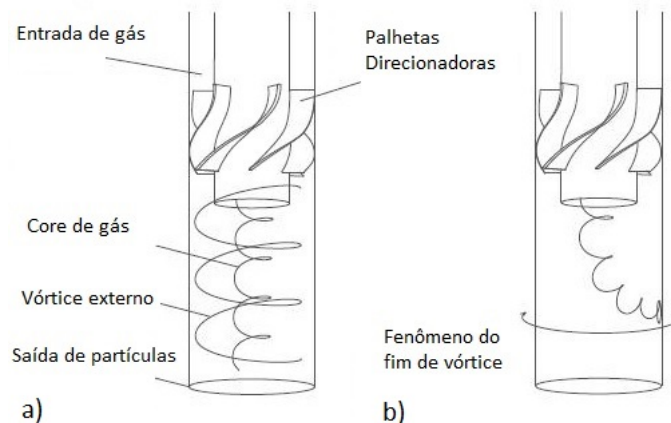


Figura 2.16: a) Ilustração de um ciclone com vórtice centralizado e b) de um escoamento com a presença do fenômeno do fim de vórtice [6])

Foram realizados testes em separadores de diferentes comprimentos e apenas no de maior comprimento foi detectada a presença do fenômeno por uma das tomadas de pressão na parede do separador. Durante o aumento gradual da vazão de ar, o vórtice permaneceu na mesma posição e não foi descendo em direção à base do separador conforme o esperado mostrando dessa forma que é independente das vazões adotadas. O trabalho de Peng mostra que é possível simular numericamente a formação do fenômeno do fim de vórtice usando o modelo de turbulência LES e que o comportamento do fenômeno é consistente com as observações experimentais.

Peng afirma que embora o modelo utilizado para testes seja menor do que os utilizados em escalas industriais, o fenômeno não é menos importante nestes casos. Aponta ainda como prioridades de próximos estudos a análise da estabilidade do escoamento centralizado e a determinação dos fatores de influência no fenômeno do fim de vórtice.

Pisarev (2012) [20] utilizou um aparato experimental onde testes foram realizados com ar e algumas partículas traçadoras. Os experimentos foram conduzidos em condições ambiente, uma bomba centrífuga foi colocada na saída inferior do separador e o ar foi então sugado através do separador devido à baixa pressão na saída.

As vazões de ar foram variadas regulando duas válvulas de controle, uma para a regulação principal e a segunda para o ajuste fino. O separador foi construído em plexiglass para permitir a observação visual do escoamento e era de formato completamente cilíndrico, o que facilita o estudo do fenômeno de fim de vórtice e que a simulação se mostrou coerente com as observações experimentais.

A figura 2.17 mostra a visualização do EoV usando luz estroboscópica.

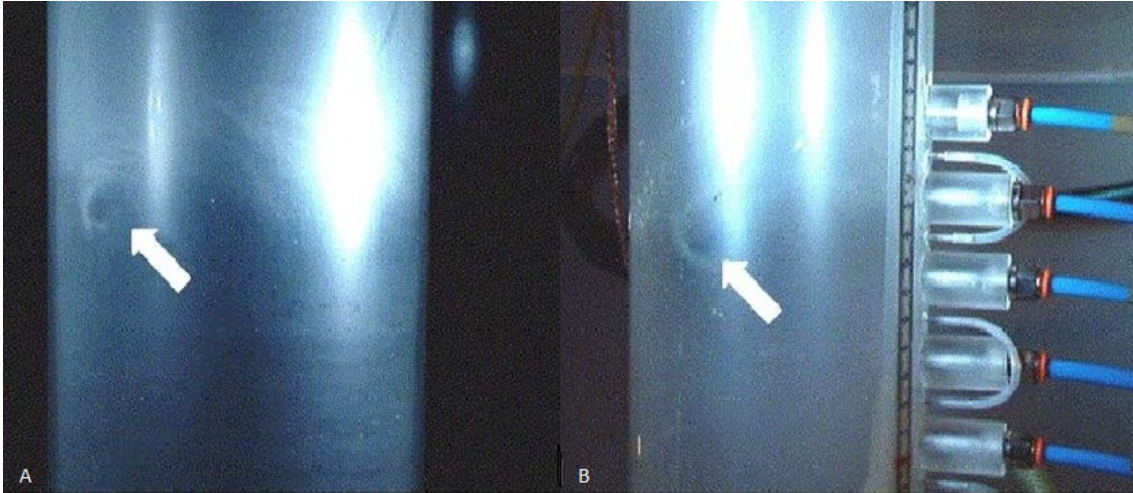


Figura 2.17: Visualização do vórtice utilizando luz estroboscópica [6])

O resultados experimentais foram comparados com simulações numéricas onde a presença do fenômeno do fim do vórtice foi computada assumindo um comprimento natural do vórtice diminuído em relação ao comprimento total do equipamento. Pisarev conclui que para alguns comprimentos de separadores, existem duas possíveis posições estáveis para o vórtice: a primeira este permanece centralizado seguindo o eixo do equipamento e a segunda com uma curvatura para a parede constituindo o fenômeno de fim de vórtice em uma posição axial estável.

A simulação lagrangiana de uma partícula revelou detalhadamente o movimento da partícula na região do final do vórtice e as diferenças no comportamento da partícula quando o fenômeno não está presente. Esta partícula pode ser vista rotacionar com a precessão do vórtice no plano axial e superpondo-se a esta rotação, gira em torno do core do vórtice na parede no plano radial. Ao fazê-lo, a localização do fim do vórtice foi captada por um período relativamente longo.

A performance de separação do ciclone também foi computada juntamente com as curvas de eficiência com e sem a presença do fenômeno de fim de vórtice. A comparação dos resultados de simulação com os resultados dos modelos teóricos bem como resultados da escala Stokesiana baseada em experimentos anteriores obtidos em um equipamento geometricamente similar mostraram uma boa concordância com o modelo de referência. Os efeitos da presença do fenômeno de fim de vórtice na

eficiência de separação foram fracos, porém os problemas causados pela presença do fenômeno como entupimento e desgaste das paredes do separador ficaram claramente ilustradas nas simulações.

2.2.4 Pressão de trabalho

Grandes custos são associados ao mal funcionamento de separadores especialmente à redução de lucratividade devido à problemas operacionais. Além disso a eficiência de um separador é normalmente um gargalo na capacidade de produção. Austrheim (2008) [21] projetou um rig para medir a eficiência de separação de um ciclone equipado com janelas de observação onde foi submetido a testes em escala laboratorial com ar, água e óleo Exxsol D60. O ar foi fornecido por dois compressores a 0.88kg/s a aproximadamente 7bar .

Os experimentos mostraram que a eficiência caiu conforme a vazão de ar foi aumentada. Se as gotas forem tão pequenas que a eficiência de separação seja determinada pelo tamanho das mesmas, poderia-se esperar que a eficiência aumentasse com o aumento da vazão de gás, o que é verdadeiro no caso de ciclones gás-sólido. Porém, se o arraste de gotículas nos ciclones gás-líquido é o fator determinante, fica intuitivamente explicado que um aumento na vazão de ar e de líquido faça com que a eficiência caia.

A baixas pressões e altas razões líquido-gás é provável que as gotas de líquido sejam grandes, maiores que o diâmetro mínimo de separação esperado para o ciclone e, neste caso seu diâmetro não desempenha um papel importante na determinação da eficiência de separação. A curva atípica obtida em baixas razões gás-líquido onde a eficiência aumenta com o aumento da vazão é condizente com a noção de que neste caso, um volume suficiente de líquido estava disperso em pequenas gotículas de água, menor que o diâmetro máximo de separação previsto e, portanto, o diâmetro das gotas foi determinante na eficiência de separação.

O primeiro artigo que apresenta dados experimentais de um separador ciclônico atuando a altas pressões em uma instalação real de processamento de gás natural é o do mesmo autor Austrheim (2008) [22]. Segundo Austrheim a maioria dos separadores de gás natural em operação atualmente processam menos de 40% em volume de líquido. As pressões de operação variam de condições atmosféricas até várias centenas de *bars* enquanto que a temperatura pode variar de -170° em plantas de gás natural liquefeito até mais de 100° a jusante de colunas de extração.

O movimento para campos de exploração mais remotos e para o processamento e separação em ambiente submarino demanda um desenvolvimento de tecnologias mais robustas, compactas e confiáveis que possam ser utilizadas a altas pressões. Este design de alta qualidade demanda dados experimentais gerados a condições realistas

de processamento. As propriedades físicas dos fluidos como densidade, viscosidade e tensão superficial diferem significativamente com a pressão e temperatura e influenciam profundamente as características de separação que não são completamente previsíveis. Existe uma distância entre o conhecimento proveniente de pesquisa fundamental e sua aplicação no projeto de separadores reais. Austrheim afirma que o tamanho de gotas é um parâmetro chave para descrever a performance do separador quando este está sujeito a condições como quando o arraste de gotículas é ou não é dominante. Porém, não existem métodos adequados para estimar ou medir o tamanho de gotas em equipamentos de larga escala operando a alta pressão, portanto o tamanho de gotas não é um parâmetro de design disponível para larga escala. Com frequência, separadores operam em condições onde o arraste é dominante por não ser possível obter essa informação.

Austrheim avalia o dimensionamento clássico através das expressões originalmente desenvolvidas por Sowders-Brown [8] baseadas no valor K, fator quantificado empiricamente. O projeto baseado na teoria do valor K não leva em consideração variações no tamanho de gotas por exemplo, devido às variações na tensão superficial ou propriedades do fluido como pressão, temperatura ou composição do fluido. O valor K não descreve o arraste de líquido, por exemplo das paredes dos componentes internos, embora descreva o transporte para cima de gotas no campo gravitacional. O valor K não inclui a vazão de líquido, da qual a eficiência é muito dependente. Austrheim investiga se as práticas de projeto são adequadas na geração de dados de performance para sistemas reais e aponta o caminho para melhoramentos neste sentido.

A configuração do separador utilizado consiste três tipos de componentes internos em série: aletas direcionadoras na entrada, uma malha eliminadora de névoa e vários ciclones em paralelo. As variações das propriedades do gás natural com a pressão são calculadas e a performance geral do separador, bem como dos seus componentes internos individualmente. A eficiência de separação é calculada após um período de estabilização de 15 a 30 *min* de duração. A vazão de líquido foi variada usando dois valores da constante K, de 0.15 e 0.26 para três pressões de operação: 28, 55 e 113 *bar*. O *rig* foi pressurizado com gás natural seco e recombinação com gás natural condensado. O líquido foi injetado na forma de spray com distância suficiente para desenvolver o escoamento.

Os resultados mostram que a eficiência de separação para o valor K de 0.26 *m/s* parece aumentar com o aumento da vazão de líquido até 150 *l/h* enquanto que a vazões ainda maiores o oposto ocorre e para este valor K a pressão de operação de 55 *bar* é melhor que 113 *bar*, embora seja uma afirmação fraca visto que foi testada apenas uma condição a 55 *bar*.

A eficiência de separação é mais alta para valores mais baixos de K e portanto

para menores velocidades do gás. Espera-se que ciclones separem melhor as pequenas gotas à velocidades maiores do gás, isso indica que nestas condições o arraste de gotículas limita a eficiência de separação. Para ambos os casos a eficiência melhorou ao se aumentar a concentração de líquido no ar.

Austrheim conclui que os procedimentos utilizados para projeto de separadores ciclônicos apresentaram resultados razoáveis, confirmando de forma generalizada as recomendações da norma NORSOK [23] de se manter o valor $K \leq 0.15m/s$. A eficiência de separação para $K = 0.26m/s$ foi muito menor, embora tenha melhorado com o aumento da porcentagem de líquido. A eficiência dos ciclones a altos valores de K foi apenas moderada e diminuiu com o aumento da pressão.

Capítulo 3

Método Experimental

Este capítulo descreve a instalação experimental empregada para simular qualitativamente as condições de operação em campo do separador construída no Laboratório de Separadores Compactos da Universidade Federal do Rio de Janeiro. A seguir as instalações experimentais e técnicas de medição serão descritas a partir de seus princípios de funcionamento e modos de utilização, fazendo uma análise crítica de suas vantagens e desvantagens.

3.1 Características do Modelo do Separador

O modelo a ser construído precisava permitir a visualização de suas partes internas pelos equipamentos de medição que utilizam técnicas óticas não-intrusivas. Para isto o separador foi construído em acrílico que, sendo um material transparente e relativamente resistente mostrou-se adequado. A configuração do equipamento de testes seguiu rigorosamente as descrições do documento de patente, detalhado anteriormente. O diâmetro da válvula foi obtido através dos critérios de Souders-Brown [8] e da queda de pressão [12], sendo que o segundo mostrou-se determinante. As principais características do protótipo são:

- Diâmetro da válvula: $150mm$
- Altura da válvula: $920mm$
- Diâmetro do duto de alimentação: $50.8mm$
- Diâmetro do duto de descarga do gás: $50.8mm$
- Altura do "chapéu chinês": $300mm$
- Altura do corte dos direcionadores: $100mm$
- Largura do corte dos direcionadores: $100mm$
- Máxima vazão de ar fornecida pela instalação $100 \frac{m^3}{h}$
- Máxima vazão de água fornecida pela instalação: $50 \frac{m^3}{h}$

A figura 3.1 mostra o modelo 3D do separador que foi construído com diversas flanges de forma a facilitar a troca dos elementos principais com o objetivo de pos-

sibilita a avaliação de cada um isoladamente e permitir a substituição dos mesmos, a fim de estudar diferentes configurações.

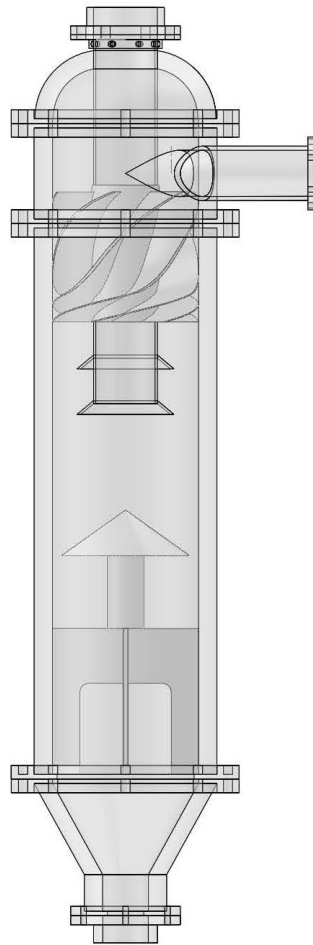


Figura 3.1: Modelo 3D do Separador

A figura 3.2 mostra o modelo 3D da instalação experimental. O separador foi provido de tomadas de pressão na entrada de mistura e em suas saídas de gás e líquido. Válvulas de regulação de vazão foram instaladas também na entrada de mistura e nas duas saídas (saída de ar e saída de água) para permitir o controle de nível de líquido dentro do equipamento e da pressão interna. Um trecho de tubulação de acrílico logo após o atomizador promove o desenvolvimento do escoamento e permite a visualização do mesmo possibilitando caracterizar as condições de entrada de mistura. As partículas de líquido remanescentes na saída de gás poderão ser observadas e quantificadas por meio da técnica de anemometria Laser-Doppler que fornece um perfil de velocidades na saída da tubulação de ar. Da mesma forma, o equipamento de anemometria fornece os diâmetros médios das partículas de água carregadas pelo ar, dado importante para a avaliação da eficiência do equipamento. Na saída inferior, o gás carregado com o líquido poderá ser observado através de um

medidor de vazão mássica, sensível à diferenças de densidade.

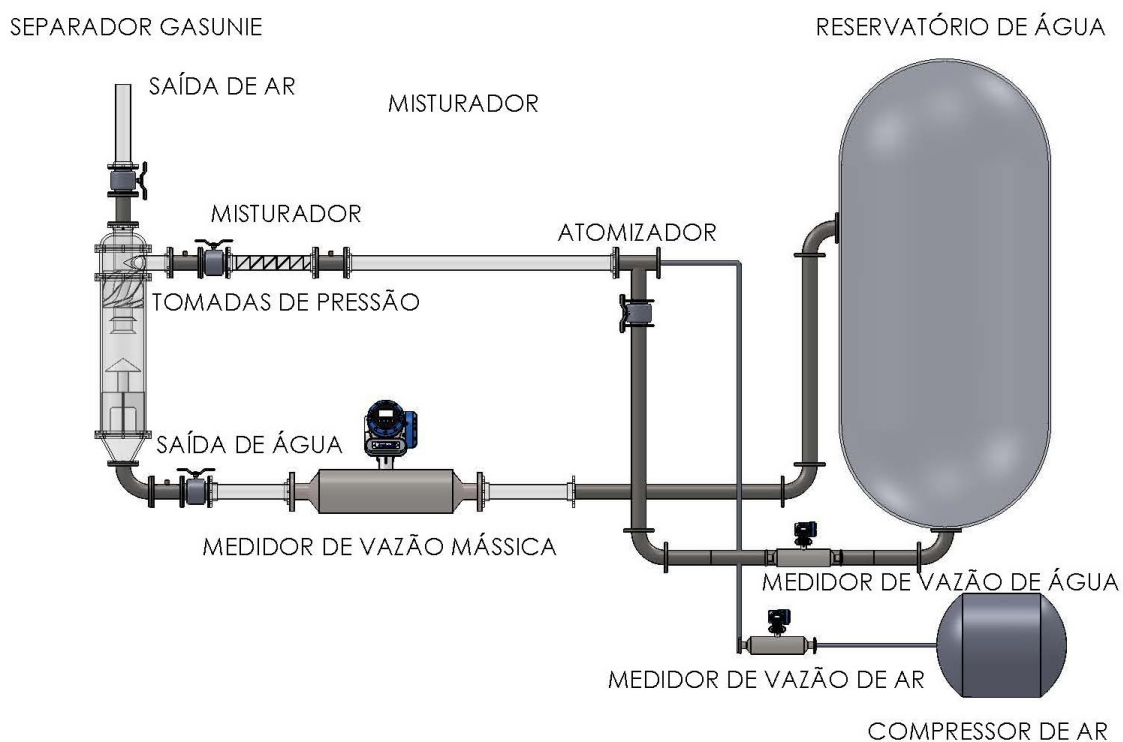


Figura 3.2: Modelo 3D da instalação experimental

A fim de simular a condição de entrada de um separador em campo, um atomizador foi projetado de modo a fornecer um escoamento com gotículas de água dispersas no ar. O atomizador funciona da seguinte forma: a água entra pelo duto inferior e preenche todo o espaço entre a parede externa do atomizador e a parede perfurada do duto interno; O ar é injetado axialmente na tubulação de forma que quando passa arrasta consigo as gotículas de água. O atomizador é mostrado na figura 3.14

3.2 A técnica de anemometria Laser-Doppler

O efeito Doppler foi utilizado pela primeira vez para medir o campo de velocidades de um escoamento em um instrumento desenvolvido por Yeh e Cummins em 1964. O desenvolvimento de lasers de gás de onda contínua, tornou possível utilizar o efeito de Doppler em um método não-invasivo óptico para a medição da velocidade de gases, líquidos e sólidos denominado anemometria laser-Doppler (ALD) ou LDA na sigla em inglês. Anemômetros a laser são instrumentos ópticos para a investigação das estruturas de escoamento de fluido em gases e líquidos. Os instrumentos devem sua existência à invenção do laser de gás no início dos anos sessenta. Algumas

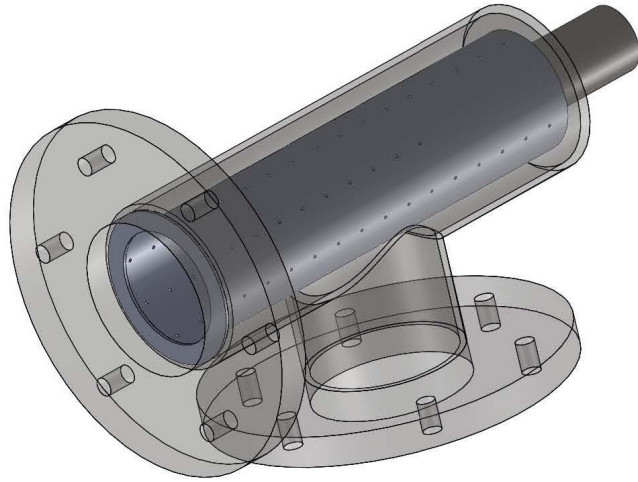


Figura 3.3: Atomizador

tentativas de medir velocidades do fluido por métodos ópticos tinham sido feitas, mas não era possível antes do advento da luz laser com suas propriedades únicas de coerência espacial e temporal que tornou-se possível projetar um anemômetro óptico eficiente. Desde então, a anemometria Laser-Doppler tornou-se uma técnica robusta devido ao aperfeiçoamento das técnicas ópticas e de processamento eletrônico, bem como ao aumento da capacidade computacional. As principais vantagens da técnica de anemometria Laser-Doppler, segundo [24] são:

- Não-intrusão no escoamento, o fluido é investigado no ponto de cruzamento dos raios, sem a introdução de nenhuma perturbação externa. As únicas condições requeridas são um meio transparente com acesso óptico e um número apropriado de partículas traçadoras.

- Ausência de calibração e resposta absolutamente linear à velocidade do fluido. O princípio de funcionamento é baseado na estabilidade das ondas eletromagnéticas, que não é afetada pela variação de outros parâmetros físicos como pressão e temperatura.

- Sensibilidade direcional. A grandeza medida é a projeção do vetor velocidade na direção perpendicular às franjas de interferência. A introdução de um desvio de frequência em um dos raios permite ainda resolver o sentido da componente de velocidade medida.

- Alta resolução espacial e temporal. A combinação entre baixo tempo de resposta e pequena dimensão do volume de controle fornece uma boa resolução tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência. As limitações de resolução temporal associadas ao sistema laser-Doppler estão normalmente associadas à baixa concentração de partículas.

As propriedades especiais do laser de gás como a coerência espacial e temporal o tornam adequado para a medição de muitas propriedades mecânicas. Em um determinado ponto a seção transversal atinge seu menor tamanho, e o feixe de laser pode ser unicamente descrito pelo tamanho e posição da chamada cintura do raio 3.4

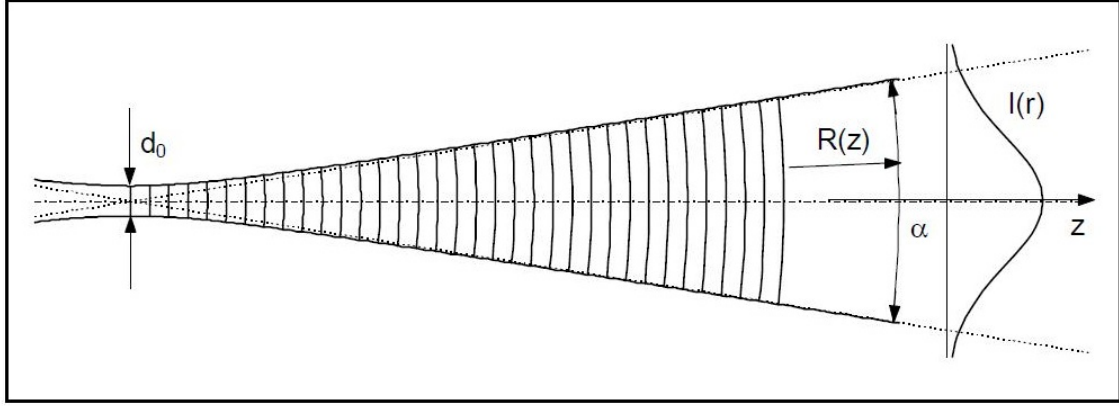


Figura 3.4: Distribuição Gaussiana da intensidade do feixe laser

O raio da frente de onda se aproxima do infinito quando z tende a zero, ou seja, as frentes de onda são aproximadamente retas nas proximidades da cintura do raio. Isto significa que a teoria das ondas planas pode ser adotada simplificando bastante os cálculos.

A anemometria Laser-Doppler é baseada no deslocamento por efeito Doppler da luz refletida ou refratada por uma partícula em movimento. A luz incidente tem uma velocidade c e uma frequência f_i , porém devido ao movimento, as partículas de fluido tem uma frequência aparente f_p diferente que é percebida pelo receptor. Segundo a teoria de Doppler a frequência aparente da luz que chega ao receptor pode ser calculada por:

$$f_s = f_i \frac{1 - e_i \cdot \left(\frac{U}{c}\right)}{1 - e_s \cdot \left(\frac{U}{c}\right)} \quad (3.1)$$

Sabendo que $\frac{U}{c} \ll 1$, pode-se linearizar a equação para:

$$f_s = f_i \left[1 + \frac{U}{c} \cdot (e_s - e_i)\right] = f_i + \frac{f_i U}{c} \cdot (e_s - e_i) = f_i + \Delta f \quad (3.2)$$

Sendo a velocidade da partícula U o único parâmetro desconhecido, pode ser determinada a partir das medições do deslocamento Doppler Δf . Quando dois feixes de ondas de frequência ligeiramente diferente são superpostos, ocorre o fenômeno bem conhecido do aparecimento de uma frequência de batimento, devido à interferência construtiva e destrutiva das duas ondas de maneira periódica.

A frequência de batimento corresponde à diferença entre as frequências das duas ondas e uma vez que as ondas de entrada são provenientes do mesmo laser, ela também tem a mesma frequência $f_1 = f_2 = f_I$, onde I corresponde à luz incidente. A frequência de batimento, também chamada de frequência Doppler f_D é muito menor do que a frequência do laser e pode ser medida como flutuações na intensidade da luz refletida nas partículas do escoamento. A frequência Doppler é diretamente proporcional à componente x da velocidade da partícula que, portanto, pode ser calculada diretamente a partir de f_D :

$$u_x = \frac{\lambda}{2 \sin(\frac{\theta}{2})} f_D \quad (3.3)$$

Embora a descrição da anemometria Laser- Doppler acima seja exata, pode ser intuitivamente difícil de quantificar. Para lidar com isso, o modelo de franjas é comumente usado como uma visualização razoavelmente simples, produzindo os resultados corretos.

Quando dois feixes de laser coerentes se cruzam, eles irão interferir em um volume de intersecção. Se os feixes se cruzam em suas cinturas de feixe respectivos, as frentes de onda são aproximadamente planas e, conseqüentemente, a interferência produz planos paralelos de luz e sombra, como mostrado na Figura 3.5.

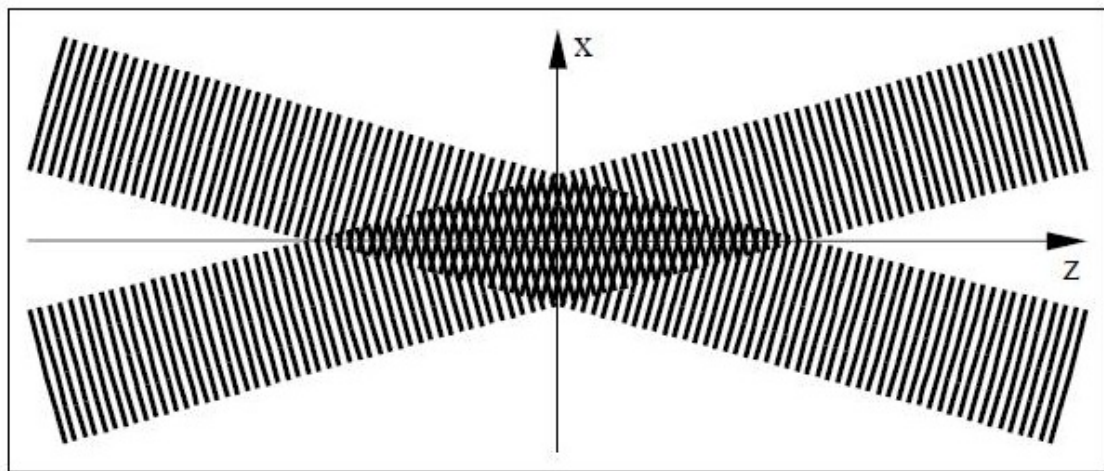


Figura 3.5: Franjas de Interferência

Os planos de interferência são conhecidos como franjas e a distância δ_f entre eles depende do comprimento de onda e do ângulo entre os feixes incidentes:

$$\delta_f = \frac{\lambda}{2 \sin(\frac{\theta}{2})} \quad (3.4)$$

As franjas são normais ao eixo x , portanto a intensidade da luz refletida a partir de uma partícula que passa através do volume de medição irá variar com uma

frequência proporcional à componente da velocidade da partícula na direção x , u_x

$$f_D = \frac{u_x}{\delta_f} = \frac{2 \sin(\frac{\theta}{2})}{\lambda} u_x \quad (3.5)$$

identicamente à relação obtida analisando-se o efeito doppler.

O principal resultado de uma medição em um anemômetro de laser é um pulso de corrente a partir do fotodetector. Esta corrente contém a informação da frequência relativa à velocidade a medir.

A corrente fotoelétrica também contém ruídos. A principal fonte de ruído é o ruído de disparo na fotodetecção, que é uma propriedade fundamental do processo de detecção. A interação entre o campo óptico e o material foto-sensível é um processo quântico, a qual inevitavelmente imprime uma certa quantidade de flutuação sobre a média da intensidade da corrente fotoelétrica. Além disso, existe a média da intensidade da corrente e o ruído de disparo indesejado atingindo o fotodetector. Grande parte do esforço de projetos de sistemas ópticos é destinado a reduzir a quantidade de luz reflectida ou luz ambiente que chega ao detector.

O desempenho adequado pode ser obtido pela correta seleção da potência do laser e dos parâmetros do sistema óptico. Além disso, o ruído deve ser minimizado, selecionando apenas a mínima largura de banda necessária para a medição da gama de velocidades desejada, configurando o filtro passa-baixa e filtros passa-alta na entrada de processador de sinal. O envelope da corrente modulada Doppler reflete a distribuição Gaussiana de intensidade do volume de medição. A figura 3.6 mostra um sinal bruto característico da técnica de anemometria laser-Doppler quando uma partícula passa pelo centro do volume de controle antes de ser filtrado, enquanto que a figura 3.7 mostra o mesmo sinal após passar por um filtro passa-alta.

Se mais partículas estão presentes no volume de medição simultaneamente, chama-se sinal multi-partículas. A corrente no detector é a soma das correntes provenientes de cada partícula individual dentro da região iluminada. Uma vez que as partículas estão localizados aleatoriamente no espaço, as correntes provenientes das contribuições individuais são adicionados, com fases aleatórias e, o envelope de sinal de Doppler resultante irá flutuar.

A maioria dos processadores de Laser-Doppler são projetados para adquirir o sinal de uma única partícula e com um sinal de multi-partículas a velocidade será normalmente estimada como uma média ponderada da velocidade das partículas no interior do volume de medição.

Com tamanhos de partícula comparáveis ao comprimento de onda da luz, a teoria de dispersão da luz de Lorenz-Mie pode ser aplicada. Esta teoria considera partículas esféricas e assim descrevem a dependência apenas do tamanho da partícula. Na prática, a forma e orientação das partículas também desempenham

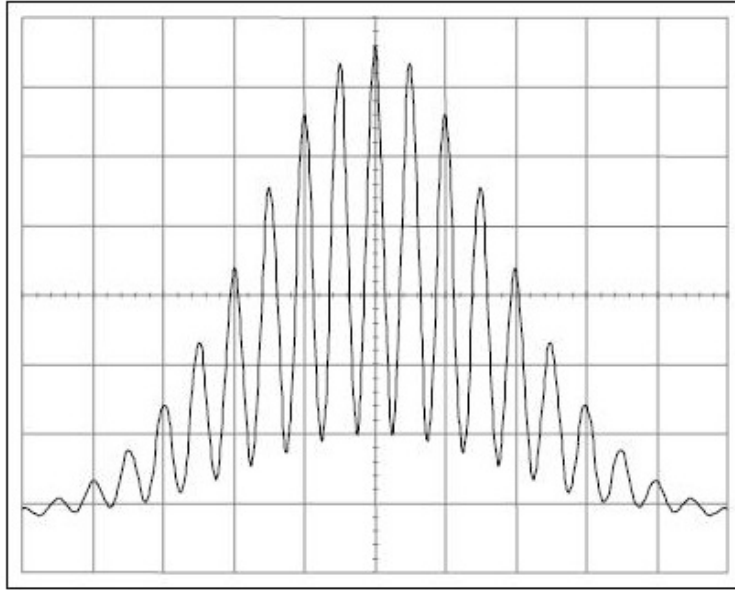


Figura 3.6: Sinal bruto para uma partícula atravessando o volume de controle

um papel importante na dispersão de luz.

No geral, partículas grandes dispersam mais luz do que as menores, mas o tamanho da partícula também interfere na distribuição espacial da luz dispersa, como mostrado na Figura 3.8.

Para partículas grandes a reflexão superficial direta geralmente domina a luz dispersa, e a intensidade é proporcional ao quadrado do diâmetro da partícula. Por difração as partículas menores têm um papel importante na a dispersão de luz, e a polarização da luz incidente tem significativa influência. Isto é particularmente importante quando se utiliza partículas menores que um micron.

3.3 A técnica de anemometria Phase-Doppler

Anemometria Phase-Doppler (PDA), é uma extensão da Anemometria Laser-Doppler(LDA). No sistema LDA havia apenas um fotodetector. A figura 3.9 mostra a situação com dois fotodetectores recebendo a luz dispersa a partir da superfície de uma partícula esférica reflectindo, semelhante ao que observamos no LDA. O ponto a observar aqui é que a diferença de comprimento do percurso óptico para as reflexões dos dois feixes incidentes com a posição do foto-detector. Isto significa que, quando a partícula passa através do volume de medição, os dois detectores recebem um sinal Doppler de mesma frequência, mas as fases dos dois sinais variam de acordo com a posição angular dos detectores. Este fenômeno foi inicialmente utilizado como uma indicação do tamanho de uma partícula [25].

A figura 3.10 ilustra a flutuação de intensidade de luz em cada fotodetector e o

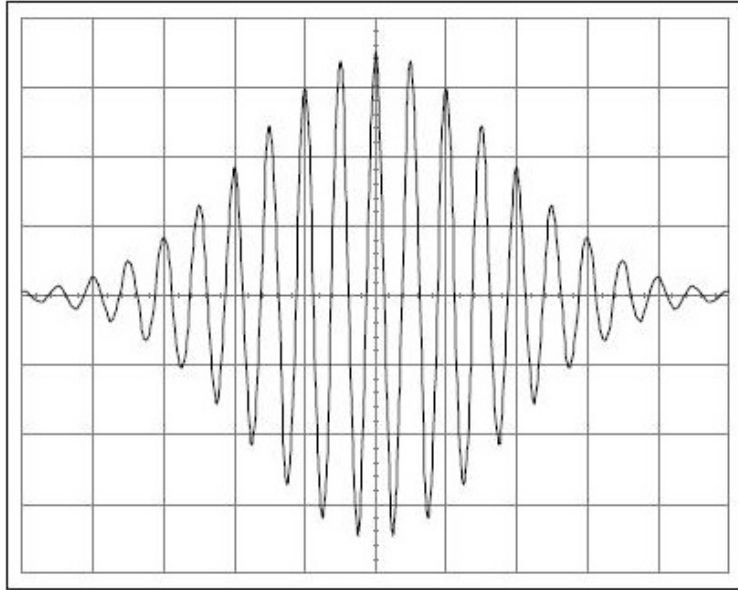


Figura 3.7: Sinal filtrado

retardo de tempo Δt que separa cada frente de onda que chega a cada fotodetector.

A diferença de fase correspondente pode ser descrita como:

$$\Phi_{12} = 2\pi f \cdot \Delta t \quad (3.6)$$

A propriedade de maior relevância é a que a diferença de fase entre dois pulsos Doppler depende do tamanho da partícula, desde que todos os outros parâmetros ópticos permaneçam constantes. A figura ?? mostra que a diferença de fase entre os pulsos Doppler é maior nas partículas grandes que nas pequenas.

Matematicamente nós podemos expressar a fase de um pulso Doppler recebido em um detector i como

$$\Phi_i = \alpha\beta_i \quad (3.7)$$

onde o parâmetro de tamanho é

$$\alpha = \frac{\pi}{\lambda} D \quad (3.8)$$

e onde D é o diâmetro da partícula, β_i é o fator geométrico e, usando dois detectores espacialmente separados, a diferença de fase Φ_{ij} pode ser calculada como

$$\Phi_{ij} = \Phi_j - \Phi_i = \frac{\pi}{\lambda} D \times (\beta_j - \beta_i) \quad (3.9)$$

onde $\beta_j - \beta_i$ é o fator de fase para os dois detectores. A relação ideal entre a diferença de fase e o tamanho da partícula é mostrada na figura 3.12.

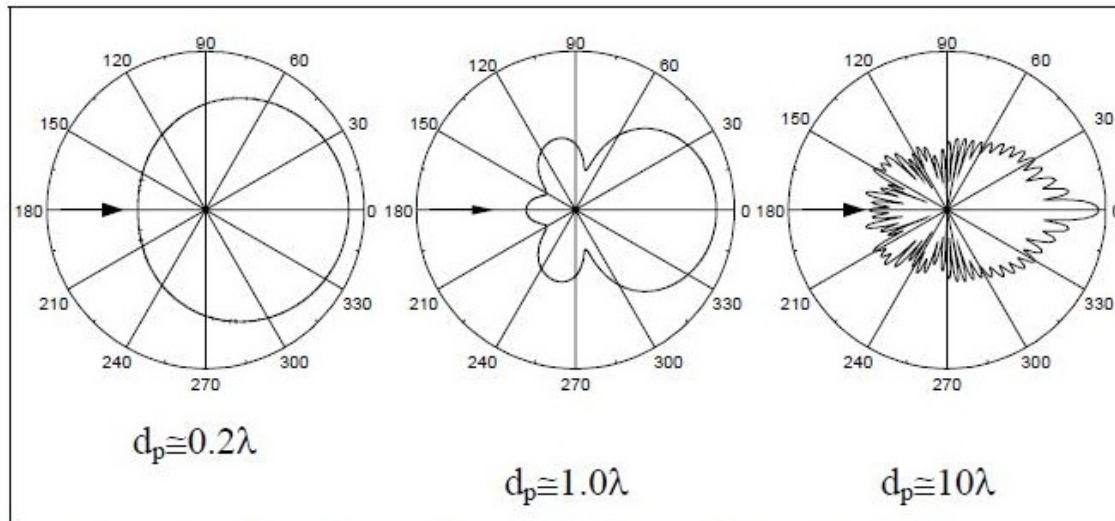


Figura 3.8: Espalhamento de luz em função do diâmetro da partícula relacionado com o comprimento de onda da luz, teoria de Lorentz-Mie

O ideal é que exista uma relação linear entre o diâmetro da partícula e a diferença de fase entre os detectores.

3.4 Velocimetria por imagem de partículas

A velocimetria por imagem de partículas (VIP) é viabilizada por um aparato experimental com um grande número de subsistemas. Na maioria das aplicações, partículas traçadoras são adicionadas ao fluido, essas partículas são iluminadas em um plano do escoamento ao menos duas vezes em um curto intervalo de tempo. A luz espalhada pelas partículas é gravada em um quadro ou em uma sequência de quadros. O deslocamento das partículas entre os pulsos de luz é determinado pela avaliação das imagens gravadas. A fim de ser capaz de guardar o grande volume de informações coletadas pelo método VIP, um sofisticado pós-processamento faz-se necessário [7]. A imagem abaixo mostra o aparato experimental para a velocimetria por imagem de partículas utilizada em um túnel de vento.

Pequenas partículas traçadoras são adicionadas ao escoamento. Um plano de luz dentro do escoamento é iluminado ao menos duas vezes por meio de um laser onde a diferença de tempo utilizada entre os pulsos depende da velocidade média do escoamento e da ampliação da imagem. Assume-se que as partículas traçadoras se movem com a mesma velocidade local do escoamento entre dois pulsos de luz. A luz espalhada pelas partículas é registrada por lente de alta qualidade em um negativo fotográfico ou em dois quadros separados em uma correlação cruzada especial do sensor CCD. Após o registro fotográfico as imagens são digitalizadas por um scanner. A saída do sensor CCD é armazenada em tempo real diretamente na memória do

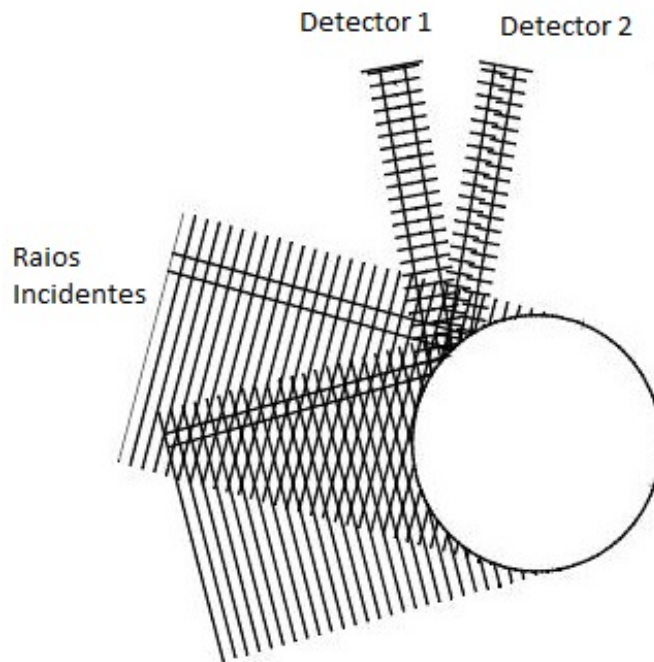


Figura 3.9: Diferença de fase entre dois detectores em diferentes ângulos

computador.

Para a avaliação, os registros digitais do PIV são divididos em pequenas sub-áreas chamadas áreas de investigação. O vetor de deslocamento local para as imagens das partículas traçadoras na primeira e segunda iluminações é determinado para cada área de investigação por meio de métodos estatísticos (autocorrelação e correlação cruzada). Assume-se que todas as partículas dentro de uma área de investigação se movem de maneira homogênea entre duas iluminações. A projeção do vetor velocidade local do escoamento no plano de luz é calculada tomando a diferença de tempo entre dois pulsos e a aplicação da imagem. Este processo é repetido para todas as áreas de investigação.

A velocimetria por imagem de partículas, em contraste com técnicas de medição de escoamentos que incluem sondas como os tubos de pressão ou anemômetros a fio quente, sendo uma técnica óptica, funciona de maneira não-intrusiva. Do mesmo modo que a anemometria laser-Doppler, a técnica PIV mede a velocidade do elemento de fluido indiretamente por meio da medida da velocidade das partículas traçadoras dispersas no escoamento. Em escoamento bifásicos as partículas já estão presentes no escoamento, podendo realizar a medição da velocidade pelas próprias partículas de fluido.

A técnica PIV permite que se obtenha imagens de uma grande parte do campo de escoamento em uma grande variedade de aplicações em meios gasosos e líquidos

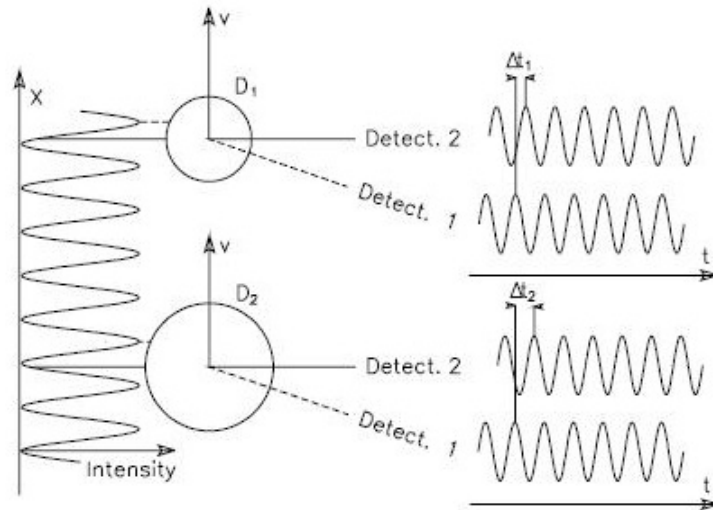


Figura 3.10: Diferença de fase entre dois detectores em diferentes ângulos

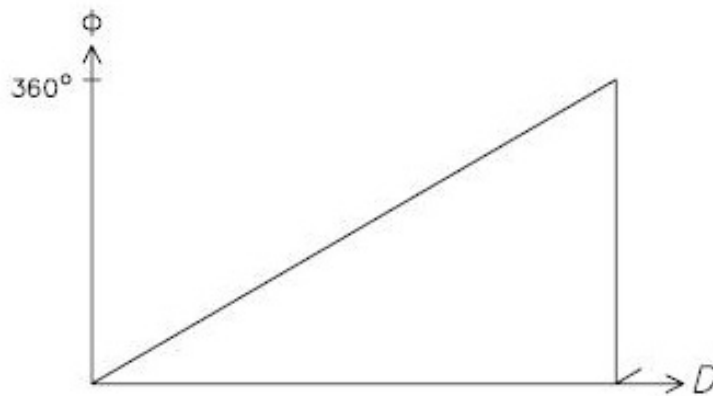


Figura 3.11: Relação ideal entre diâmetro da partícula e diferença de fase

de forma a extrair informações de velocidade dessas imagens. A captura instantânea de imagens pelo PIV bem como sua alta resolução espacial permite a detecção de estruturas espaciais mesmo em campos de velocidade muito instáveis.

3.5 Condições Experimentais

O protótipo do separador foi usinado em acrílico como mostra a figura 3.13 constituindo juntamente com o helicóide central, o equipamento principal da instalação.

A foto 3.16 mostra a instalação em torno do equipamento, instrumentado com o anemômetro Laser-Dopler. A água é armazenada em um reservatório de grande porte de onde é succionada por uma bomba que permite a regulação da vazão

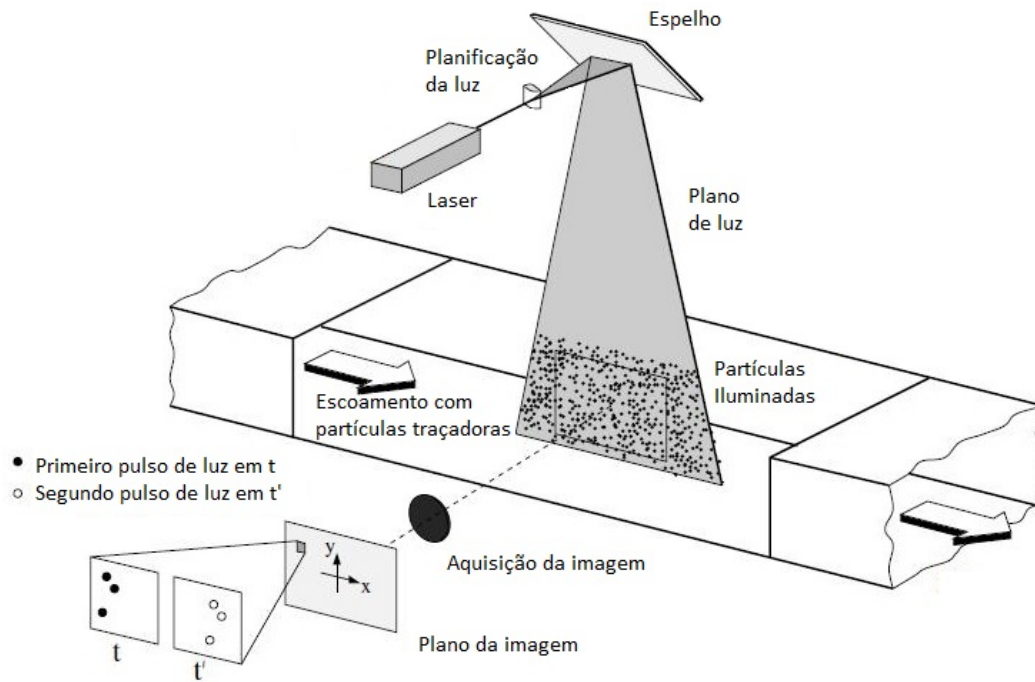


Figura 3.12: Aparato experimental para velocimetria por imagem de partícula utilizada em um túnel de vento [7]

através de um inversor de frequência. A vazão de água é obtida por um medidor de vazão por efeito de vórtice KROHNE Optiswirl 4070C. Um compressor de ar SCHULZ SRP 3020 Compact fornece a vazão de ar que é mensurada também por um medidor do tipo KROHNE Optiswirl 4070C. O ar e a água se encontram no atomizador descrito anteriormente, apresentado na imagem 3.14 onde a água é dispersa no ar e adquire velocidade. Imediatamente depois do atomizador existe um trecho de acrílico que permite o desenvolvimento completo do escoamento e a observação das condições de entrada no separador. Em seguida um misturador mostrado na figura 3.15 similar ao utilizado em campo foi colocado para simular fielmente as condições de operação e garantir que a mistura entre no separador completamente turbulenta como no caso real, impedindo a estratificação das fases. Tomadas de pressão foram posicionadas em lugares críticos, onde foram denominadas:

- $P1$ é a tomada de pressão imediatamente depois da saída do compressor.
- $P2$ é a tomada de pressão antes do misturador.
- $P3$ é a tomada de pressão imediatamente antes da entrada do separador.
- $P4$ é a tomada de pressão na saída de gás do separador.
- $P5$ é a tomada de pressão na saída de água do separador.

O misturador antes da entrada também foi produzido em material transparente que facilita observar o comportamento do escoamento interno. Entrando no separador a mistura pode ser observada durante toda a sua rotação induzida pelo helicóide



Figura 3.13: Imagem do protótipo construído em acrílico

para avaliar a efetividade do componente visualmente e com as técnicas de anemometria, bem como ao longo do corpo do separador. As condições internas podem ser razoavelmente controladas por meio das válvulas providas nas saídas. Na saída de água o nível deve ser controlado pois é um importante parâmetro no funcionamento do separador. A regulagem da saída de ar possibilita um certo controle da pressão interna, respeitando-se os limites do material (acrílico).

A água separada passa imediatamente por um medidor de vazão mássica coriolis KROHNE OPTIMASS 1300C onde as diferenças de densidade causadas pelo ar carregado poderão ser mensuradas. Depois do medidor coriolis a água é depositada em um pequeno reservatório e bombeada novamente para o reservatório de água maior. O ar é liberado na atmosfera imediatamente depois da saída do duto de gás.

O equipamento de anemometria Laser-Doppler é instalado da seguinte forma: a sonda emissora envia seu dois raios lasers que se cruzam no ponto do escoamento a ser medido. O ponto inicial é escolhido por conveniência no centro da tubulação de saída de ar. A trinta graus da reta formada pelos raios emitidos, posiciona-se a sonda de detecção de forma que seu foco coincida precisamente com o ponto de medição. O anemômetro retira então um certo número de amostras medidas, número



Figura 3.14: Atomizador

este previamente estabelecido e resulta em uma média dos diâmetros e velocidades encontrados. Estes dados correspondentes à posição inicial são computados e então as sondas são transladadas de maneira uniforme para o próximo ponto a ser medido.

Dessa forma é possível obter um perfil de velocidades e diâmetros na saída da sonda, transladando os pontos de medição ao longo de uma linha de máximo diâmetro posicionada perpendicularmente aos raios de emissão da sonda. O posicionamento dos raios emitidos se cruzando no centro da tubulação pode ser visualizado na imagem 3.17

Este ponto de medição foi escolhido para dar início às investigações sobre o funcionamento do equipamento pois é onde o acesso ao escoamento fica mais fácil e a visualização com as técnicas ópticas não passa através do acrílico, o que diminui as dificuldades na obtenção de dados.

A instrumentação para a utilização da técnica PIV foi instalada para poder operar ambos os equipamentos simultaneamente. A sonda emissora foi elevada por

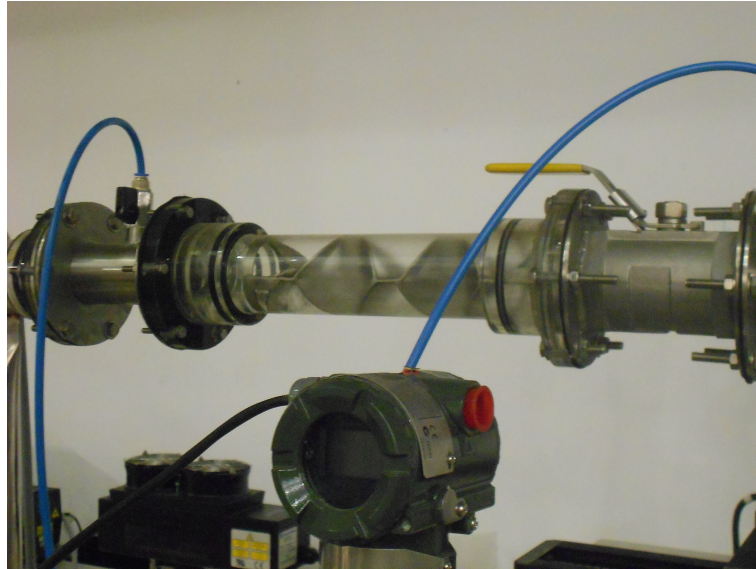


Figura 3.15: Misturador

meio de uma base até o nível de medição, coincidindo o plano formado pelo laser com um plano imediatamente superior à saída da tubulação de gás. A câmera de alta velocidade precisa capturar imagens perpendicularmente a este plano, caso que não pôde ser reproduzido devido à umidade que adere à superfície da câmera dificultando a obtenção de dados e podendo danificar o equipamento. Como forma de adaptação, um espelho foi posicionado logo acima do plano do laser e à *45 graus* do espelho e da câmera de alta velocidade conforme mostra o esquema 3.18.

A câmera foi nivelada com o centro do espelho e a identificação da velocidade das gotas foi conseguida após uma rigorosa calibração do equipamento.

A análise da saída do equipamento pode fornecer dados de velocidade axial e tamanho de gotículas através da anemometria Laser-Doppler e pela técnica PIV pode-se obter um plano completo do escoamento que permite alguma elucidação sobre o comportamento do separador.

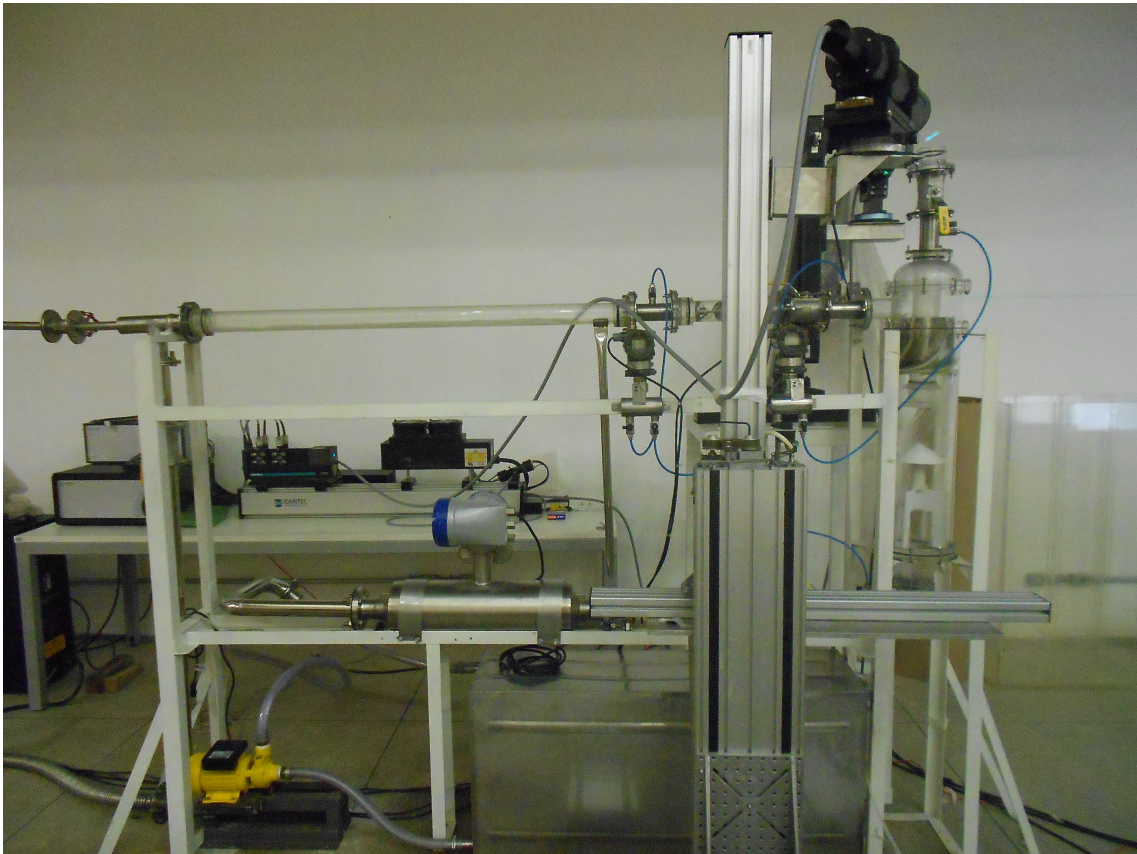


Figura 3.16: Foto ilustrativa do separador instrumentado com LDA

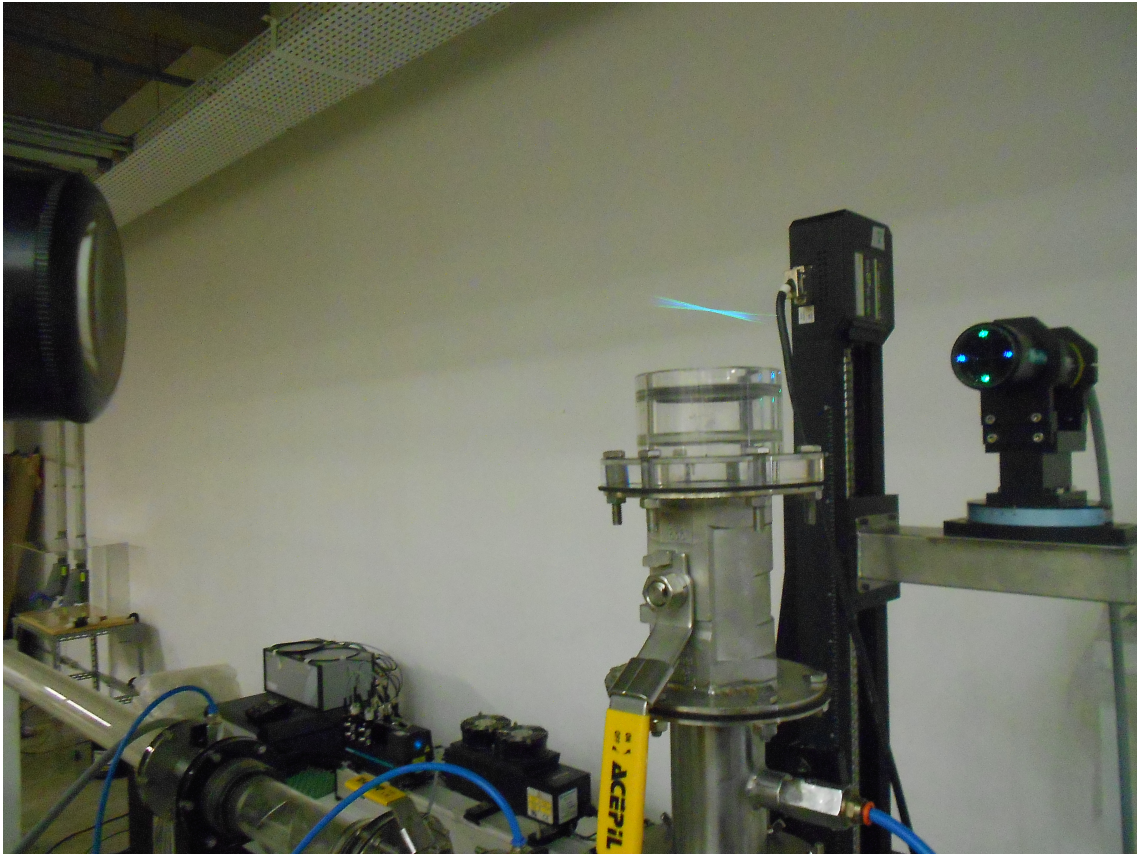


Figura 3.17: Raios emitidos pela sonda se cruzando no ponto central da tubulação

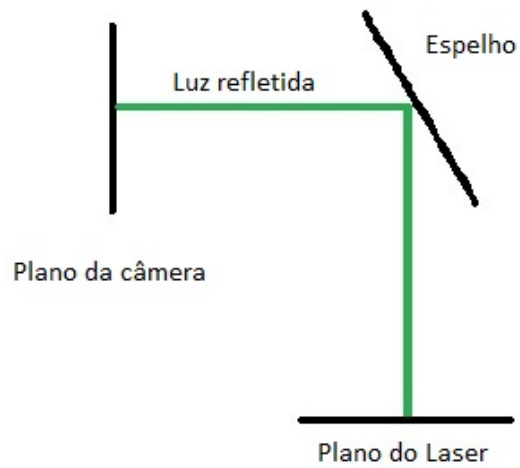


Figura 3.18: Esquema mostrando o posicionamento do espelho em relação ao plano do laser e a câmera

Capítulo 4

Resultados

4.1 Construção e Instrumentação do Protótipo

A primeira grande fase deste trabalho foi o projeto e construção do protótipo do separador ciclônico de corpo cilíndrico e com componentes internos. O projeto do protótipo foi inspirado no documento de patente [3] e dimensionado para as condições reproduzíveis em laboratório.

O material acrílico utilizado foi um requisito de projeto e um critério limitante da pressão de operação. O projeto foi otimizado em conjunto com a empresa fabricante para permitir o intercâmbio de componentes. O flangeamento das peças que formam o corpo do ciclone foi uma solução eficaz para a troca de peças e se adaptou às possibilidades de usinagem e construção.

Com o projeto otimizado iniciou-se o processo de fabricação das peças de acrílico do separador e paralelamente o projeto do helicóide central. Não foi possível fabricar este componente em acrílico com o maquinário disponível de forma que foram confeccionadas aletas de aço soldadas em um corpo principal que encaixa externamente no duto de saída do gás. O projeto do helicóide segue também as descrições da patente e detalhamento de Hoffmann [2].

Após a fabricação de todos os componentes, o processo de montagem foi feito em ambiente laboratorial onde o separador foi fixado em um suporte que não limita o acesso de equipamentos de medição. O próximo esforço do trabalho foi o de possibilitar a reprodução de variadas condições de operação de forma qualitativa. Isto foi conseguido com o projeto de um sistema de válvulas reguladoras de vazão e do misturador de gás e líquido.

A próxima etapa foi a instrumentação do separador, que consistiu no projeto e construção de suportes para os equipamentos e posicionadores para as sondas do anemômetro Laser-Doppler. Estes acessórios permitiram subir os equipamentos até a altura de medição e deram mobilidade às sondas de forma que estas pudessem ser

transladadas ao longo do diâmetro do duto de saída de gás e do corpo do separador.

O objetivo central do trabalho de executar uma seqüência de experimentos capazes de fornecer dados para uma correta interpretação e formulação teórica do escoamento no interior do separador foram completamente viabilizados com o projeto do protótipo e construção da bancada experimental, esforços que demandaram a maior parte do trabalho até o momento e são vistos como a primeira fase dos resultados.

4.2 Avaliação Qualitativa do Separador

O comportamento do separador foi observado de maneira global e este procedimento forneceu sensibilidade a respeito das variações de eficiência de separação. Pôde-se perceber que o separador é muito sensível às variações das condições de operação e instável no que diz respeito à sua eficiência de separação.

Nota-se que o separador apresenta uma fase de estabilização inicial mesmo quando configurado no regime ótimo de operação. Em um primeiro momento o gás separado é seco a olho nu. Certo tempo depois, muita água é carregada pela saída de gás e esta fase dura cerca de vinte a trinta minutos. Esta informação é importante para a realização de testes em escala real onde a fase de estabilização pode ser confundida com ineficiência do equipamento na configuração em teste.

A influência do nível de líquido mantido no interior do equipamento é grande. Este nível é controlado de acordo com a abertura de uma válvula reguladora da vazão de saída de água. É preciso que se encontre um ponto ótimo de abertura desta válvula reguladora de forma que não ocorra o acúmulo de líquido em seu interior mas mantenha sempre um nível mínimo.

Com o aumento do nível de líquido dentro do equipamento a água que já foi separada retorna ao escoamento. O líquido é rotacionado novamente e, devido à zona de baixa pressão formada no centro do vórtice, é succionado para cima em grandes volumes. Com a situação oposta onde o nível de líquido não é mantido, ou seja, quando a vazão de saída da água é igual a vazão de líquido que entra no equipamento é possível perceber que uma grande quantidade de ar é carregada com o líquido.

O ponto ótimo é facilmente mantido em escala laboratorial quando o separador é transparente e pode-se fazer um controle visual. No entanto, em escala real tem-se apenas a quantificação das saídas de gás e líquido de forma que é mais difícil entender as causas de uma mudança na eficiência de separação. Neste caso é preciso que se faça um balanço entre as vazões de entrada e saída de líquido de forma que se possa manter sempre um nível mínimo durante a operação.

Ao testar o separador sem a presença de óleo e portanto sem a formação de

espuma, o componente interno chamado de chapéu chinês não exerceu nenhuma função relevante, levando a concluir que sua função é apenas de contenção da espuma pois evita que esta retorne ao escoamento. O comprimento efetivo do vórtice se dá apenas antes do chapéu chinês de forma que este não tem função direcionadora no escoamento. O chapéu chinês não evita o retorno de água para o interior do separador quando este está sobrecarregado pois possui espaço antes da parede interna do corpo do ciclone, necessário ao escoamento da água para baixo.

As saias anti-filme instaladas externamente no duto de saída de gás são de fundamental importância na eficiência de separação pois sem a presença das mesma o líquido adere à parede da tubulação sendo direcionado diretamente para a saída de gás. A quantidade, comprimento e ângulo das saias anti-filme não tem embasamento teórico e estas são utilizadas de acordo com experiências anteriores.

Quanto ao helicóide, elemento direcionador do escoamento, é possível observar que este não aproveita de forma efetiva a velocidade do escoamento de entrada pois seu ângulo de abertura inicial é quase vertical sendo perpendicular ao escoamento de entrada. É possível que para altas pressões e vazões a parte superior do equipamento fique completamente preenchida de fluido de forma que o escoamento é empurrado para baixo preenchendo completamente o helicóide e adquirindo velocidade tangencial devido ao direcionamento das aletas. Porém, fica claro que é possível melhorar sua configuração tornando-o tangencial à entrada e impedindo o acúmulo de fluido na parte superior do equipamento.

4.3 Avaliação com Caixa Coalescedora

A fim de explorar o comportamento do equipamento, foi utilizada uma caixa coalescedora mostrada na imagem 4.1 acoplada à saída de ar que permitiu quantificar a água carregada pelo gás em três condições de operação. A primeira é a condição ótima de trabalho segundo Nanninga [12], onde a razão líquido-gás é de 2%. A segunda condição está abaixo da condição ideal (0.5%), o que favorece a eficiência do separador e a terceira acima (4%) da condição ideal sendo a situação mais crítica para a eficiência. A caixa coalescedora em cada caso foi pesada vazia e depois de uma hora de operação. O resultado obtido ao se operar abaixo da razão líquido-gás ideal é mostrado na tabela 4.1:

A avaliação de equipamento nas condições um pouco abaixo da ideal, apresentou uma eficiência de separação de 99,99% que é o máximo previsto para o equipamento. O critério para a avaliação da eficiência foi a contabilização do total de líquido acumulado na caixa em comparação com o volume total de líquido no escoamento durante o tempo de operação. O acúmulo de água deu-se durante a fase de transição citada anteriormente. Durante a fase de estabilização, a água que sai do equipamento

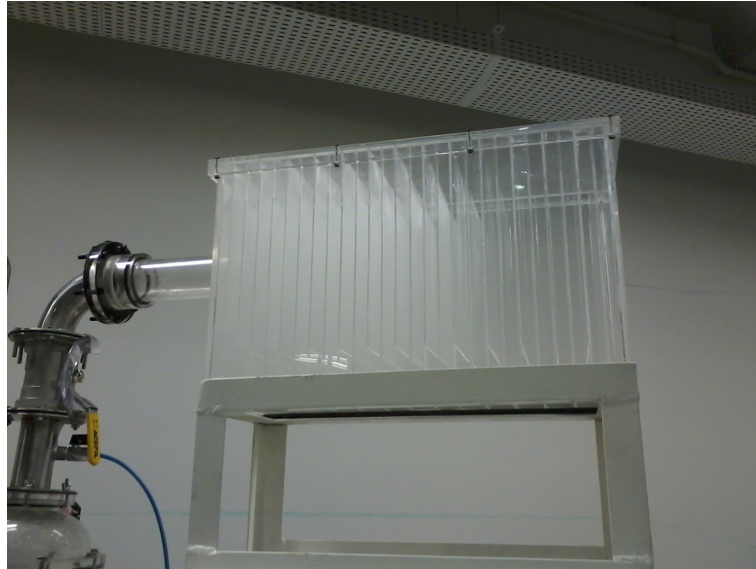


Figura 4.1: Caixa Coalescedora

vem normalmente em grandes gotas e de forma intermitente, diferentemente do caso observado com o equipamento estável. Neste momento o separador, quando em uma condição de eficiência baixa, joga gotículas de água em diâmetros muito pequenos e de maneira constante e uniforme.

Com o equipamento nas condições ideais de operação conforme a tabela 4.2, a eficiência obtida foi de 94,33%. Da mesma forma que nas condições anteriores, o acúmulo de água se deu nos primeiros minutos de operação, sendo que depois da estabilização do separador melhorou significativamente. A eficiência prevista para o separador nas condições ideais de operação é de até 99,99% o que destoou da observação. Porém, entende-se que esta eficiência é esperada depois da estabilização do separador. O método da caixa coalescedora não se mostrou efetivo na medição de eficiência, porém agregou conhecimento a respeito da fase inicial de estabilização que tem uma duração relativamente longa, em torno de vinte minutos a meia hora e foi de grande importância para a correta avaliação nos testes subsequentes.

No caso mais crítico observado com a razão líquido-gás em 4% conforme mostra a tabela 4.3 a eficiência foi de 95,06%. Da mesma forma que os casos anteriores, o acúmulo se deu antes da estabilização, o que guiou os próximos experimentos que foram realizados sempre depois de meia hora de trabalho do separador nas condições operacionais.

Tabela 4.1: Observações do comportamento do separador com RGL = 0.005

RGL	0.5%
Nível de líquido	<i>zero</i>
Vazão de água	$0.2 \frac{m^3}{h}$
Vazão de ar	$40 \frac{m^3}{h}$
P1	<i>2 bar</i>
P2	<i>0.228 bar</i>
P3	<i>0.175 bar</i>
P4	<i>0.153 bar</i>
P5	<i>0.169 bar</i>
Peso da caixa vazia	<i>7091, 1g</i>
Peso da caixa após 1h de trabalho	<i>7091, 3</i>

Tabela 4.2: Observações do comportamento do separador com RLG=0.02

RGL	2%
Nível de líquido	<i>zero</i>
Vazão de água	$0.8 \frac{m^3}{h}$
Vazão de ar	$40 \frac{m^3}{h}$
P1	<i>2 bar</i>
P2	<i>0.380 bar</i>
P3	<i>0.290 bar</i>
P4	<i>0.263 bar</i>
P5	<i>0.265 bar</i>
Peso da caixa vazia	<i>7091, 1g</i>
Peso da caixa após 1h de trabalho	<i>7136, 4</i>

4.4 Avaliação do equipamento completo em condições ideais de operação

O escoamento no interior do separador foi caracterizado por meio de perfis de velocidade média e intensidade turbulenta e a eficiência de separação foi avaliada pelo diâmetro e concentração de gotas de água na saída de ar do separador, que associadas podem fornecer a vazão total de líquido na saída do separador.

Para entender de forma detalhada o processo de separação em um equipamento específico, é preciso que se compreenda completamente qual é a função de cada um de seus componentes isoladamente. Para isso, os experimentos foram organizados da seguinte forma: primeiramente o equipamento foi testado com todos os seus componentes internos em três razões gás-líquido sendo a primeira a condição ideal e

Tabela 4.3: Observações do comportamento do separador com RLG=0.04

RGL	4%
Nível de líquido	<i>zero</i>
Vazão de água	1.6 $\frac{m^3}{h}$
Vazão de ar	40 $\frac{m^3}{h}$
P1	2 <i>bar</i>
P2	0.360 <i>bar</i>
P3	0.193 <i>bar</i>
P4	0.140 <i>bar</i>
P5	0.202 <i>bar</i>
Peso da caixa vazia	7091, 1g
Peso da caixa após 1h de trabalho	7170, 1

duas condições acima da ideal. Durante a avaliação constatou-se que medições em condições abaixo da ideal, sendo mais favoráveis à eficiência do equipamento, não forneceriam dados relevantes. Portanto as condições de operação a serem avaliadas foram estabelecidas com as seguintes razões líquido-gás (RLG):

- $RLG = 0.02$, condição ideal
- $RLG = 0.04$
- $RLG = 0.06$

Para cada razão líquido-gás, o equipamento deverá ser avaliado na saída de gás e ao longo do corpo em pontos críticos para o seu funcionamento como logo a baixo do helicóide, próximo ao chapéu chinês e na base próxima ao final do vórtice. Após o mapeamento do escoamento em todo o ciclone operando com todos os componentes internos, testes serão feitos isolando cada um dos componentes, da seguinte forma:

- Separador sem o chapéu chinês e com helicóide
- Separador sem helicóide e com chapéu chinês
- Separador sem helicóide e sem chapéu chinês

Os testes mantiveram uma vazão de ar de $40 \frac{m^3}{h}$ e variou-se as vazões de água a fim de manter a proporção desejada. Porém, ao longo dos testes, o equipamento sofreu uma fragilização devido às vibrações geradas pela alta vazão de ar, o que causou a quebra de parte do corpo principal. Por esta razão os testes subseqüentes foram realizados a uma vazão mais baixa, de $10 \frac{m^3}{h}$ visando garantir a integridade da instrumentação de medição e a segurança de operação. Nesta vazão o efeito ciclônico foi verificado de forma que as informações obtidas não foram prejudicadas.

Com o separador completo, com helicóide e com chapéu chinês foi dado início aos testes na saída de gás do separador. Os equipamentos de Anemometria Laser-Doppler e de Velocimetria por imagem de Partícula foram instalados simultanea-

mente. O equipamento foi posto em operação com uma razão líquido-gás ótima de 2% sendo a vazão de ar de $10 \frac{m^3}{h}$ e a vazão de água igual a $0.2 \frac{m^3}{h}$. Aguardado o momento da estabilização, após cerca de trinta minutos de operação, um plano de velocidades foi obtido na saída do separador com a técnica VIP aquisitando quatro mil imagens em seqüência. As condições de operação estão organizadas na tabela 4.4.

Tabela 4.4: Condições de operação na RLG=0.02

RGL	2%
Nível de líquido	<i>zero</i>
Vazão de agua	$0.2 \frac{m^3}{h}$
Vazão de ar	$10 \frac{m^3}{h}$
P1	<i>7,2 bar</i>
P2	<i>7 bar</i>
P3	<i>0.022 bar</i>
P4	<i>0 bar</i>
P5	<i>0.016 bar</i>

Com a técnica VIP foi possível visualizar os campos de velocidade instantânea em um plano logo acima da saída do separador. Esta observação mostrou que o vórtice interno realiza um movimento de precessão em torno do eixo do equipamento. A imagem 4.2 mostra o centro de giro um pouco deslocado do eixo principal que em imagens subsequentes captura claramente o movimento de precessão.

A média das velocidades na imagem 4.3 mostra o centro de giro coincidente com o centro do equipamento, com velocidade quase nula próxima do eixo chegando a velocidades de $11m/s$ próximo à parede do duto de saída. A velocidade cai nos diâmetros maiores que o duto, perdendo velocidade no sentido tangencial, visto que se encontra já fora da tubulação.

A partir dos dados de velocidade tangencial é possível observar a aceleração centrípeta a qual o fluido está submetido. Para isto basta utilizar a equação $A_{cp} = \frac{U_{tan}^2}{r}$ para cada dado de velocidade tangencial. As regiões de maior aceleração centrípeta encontram-se no mesmo ponto onde as velocidades tangenciais são mais altas, visto que as mesmas aumentam gradualmente com o raio do duto. As velocidade decaem apenas nos pontos externos, maiores do que o diâmetro da tubulação onde perdem energia para o ambiente. O único ponto no qual não é possível calcular a aceleração é no centro da seção onde o raio é zero e o valor da aceleração centrípeta não pode ser obtido. Na região central a velocidade nula pode indicar a inexistência de partículas nessa região.

O campo de velocidades médias ainda permite observar uma certa assimetria

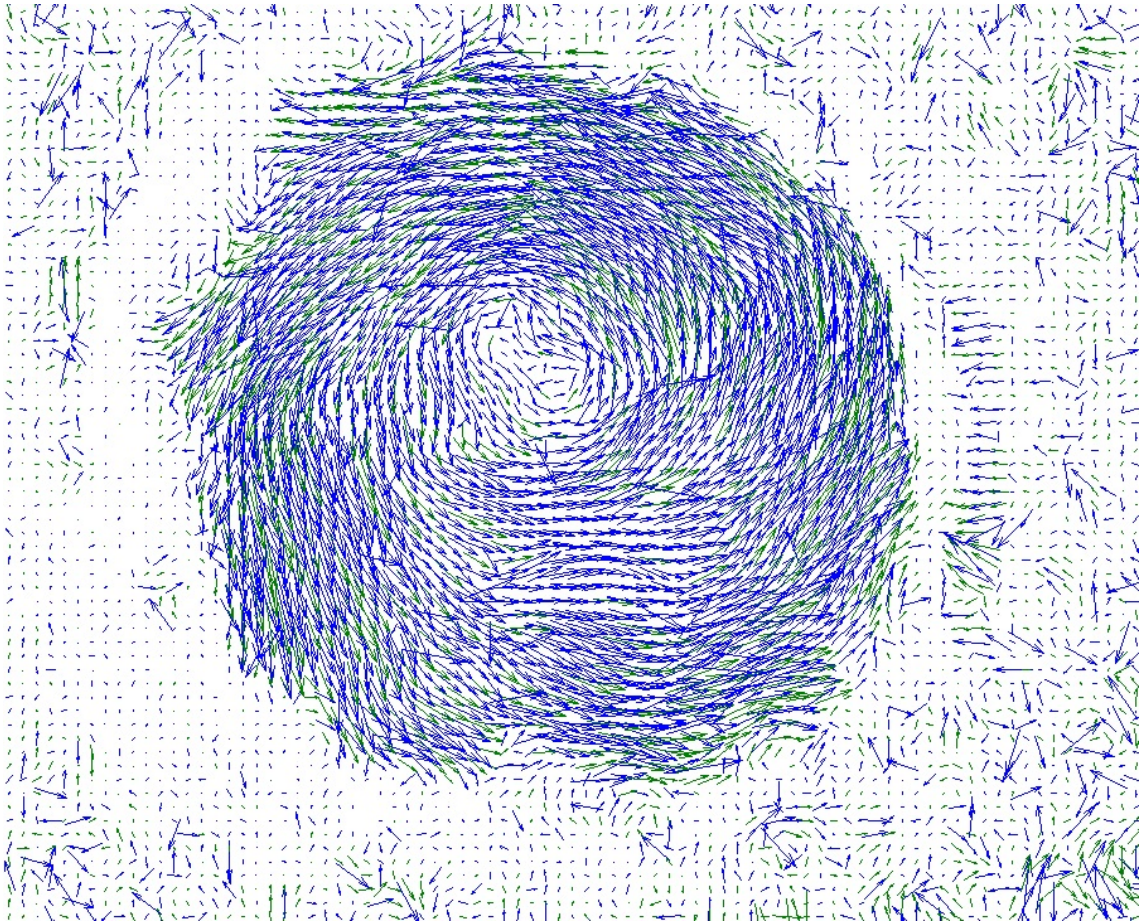


Figura 4.2: Campo de Velocidades Tangenciais Instantâneas

no escoamento onde do lado esquerdo da imagem as velocidades são mais altas do que no direito. Isso ocorrer devido à assimetria na configuração do ciclone, onde a entrada tangencial da mistura se dá do lado esquerdo, coincidindo com a região de maior velocidade.

A anemometria laser-Doppler foi utilizada em sequência, repetindo as condições de operação a fim de obter dados de velocidade no sentido axial e radial e intensidade turbulenta axial e radial, informações importantes para a avaliação e entendimento do separador como o diâmetro das partículas não separadas, ou seja, carregadas pelo gás e a concentração das mesmas no escoamento de saída. Os parâmetros durante este processo estão organizados na tabela 4.5

Dessa forma, com o Δp mantido e a mesma vazão de gás e líquido, o anemômetro laser-Doppler foi deslocado na direção perpendicular à sonda emissora a passos de $1,5\text{mm}$ e em cada ponto cinquenta mil amostras foram retiradas. As informações obtidas geraram dados de velocidade radial que podem ser observados no gráfico 4.4.

O gráfico permite perceber velocidades radiais que iniciam em $2,5\text{m/s}$ e decaem

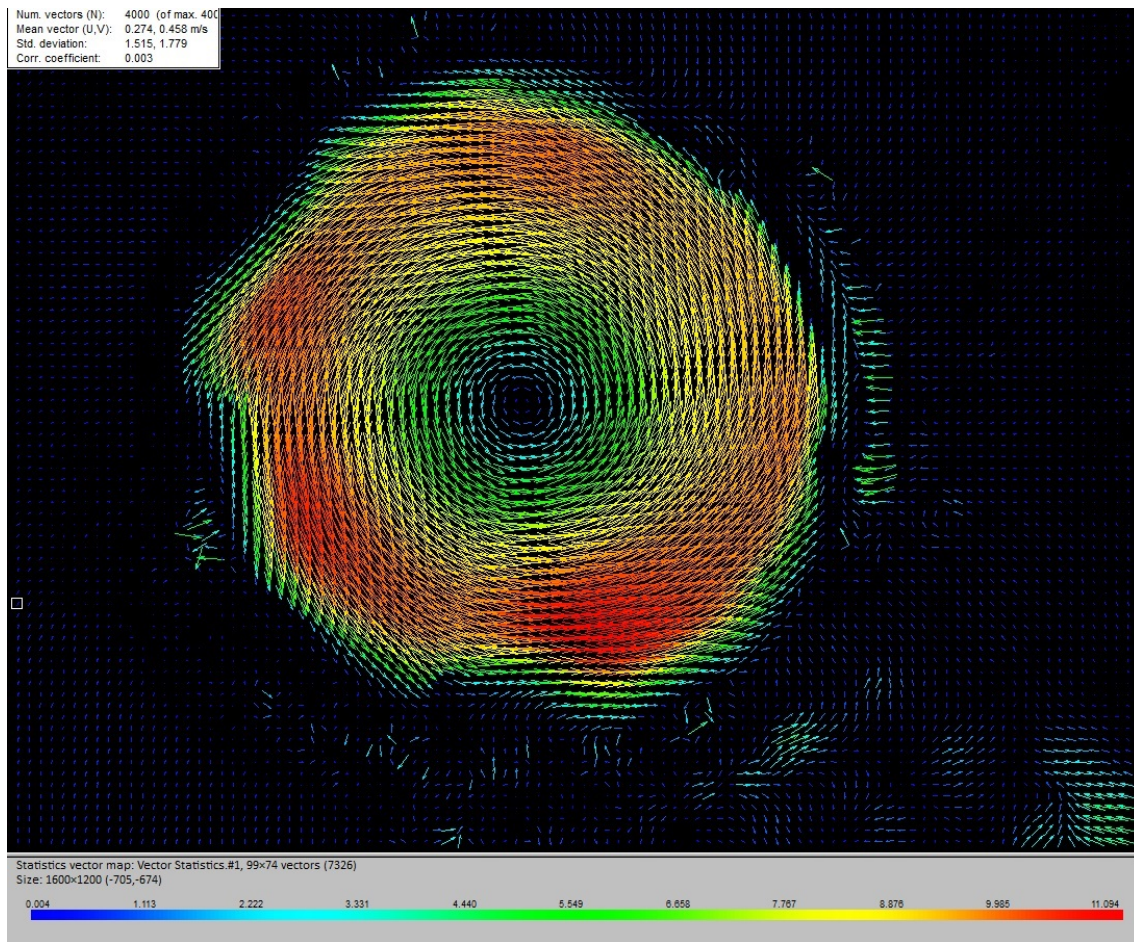


Figura 4.3: Campo de Velocidades Tangencial Média

ao longo do diâmetro até a extremidade oposta da tubulação de saída. A observação do escoamento leva a constatar que isso ocorre devido ao sentido da velocidade radial, onde na extremidade inicial da tubulação a velocidade coincide com o sentido positivo ao passar pelo volume de controle, apontando do centro para a parede do duto. Ao passar pelo centro a velocidade se aproxima de zero, mudando de sentido logo após de forma a continuar apontando para fora.

Observando criticamente as instalações experimentais é possível entender que a direção escolhida para a tomada de medições, sendo perpendicular à sonda emissora pode causar uma interferência entre os valores de velocidade radial e tangencial, onde estes podem estar sendo somados na primeira metade do duto e diminuídos na segunda metade de forma que os dados obtidos seriam a soma das componentes de velocidade radial e tangencial no ponto medido. Ainda sim os dados foram considerados relevantes pois as partículas não devem seguir uma trajetória rígida de forma que as componentes sempre terão influência mútua. Os próximos testes, porém serão feitos na direção paralela à sonda emissora.

O próximo gráfico 4.5 obtido com a anemometria Laser-Doppler é o de velocidade

Tabela 4.5: Condições de operação na RLG=0.02 utilizando ALD

RGL	2%
Nível de líquido	<i>zero</i>
Vazão de água	$0.2 \frac{m^3}{h}$
Vazão de ar	$10 \frac{m^3}{h}$
P1	7,8 <i>bar</i>
P2	7,6 <i>bar</i>
P3	0.021 <i>bar</i>
P4	0 <i>bar</i>
P5	0.015 <i>bar</i>

na direção do corpo do equipamento, eixo z . Nesta direção, as maiores velocidades identificadas são próximas à parede do duto de saída de gás com um leve decaimento nas extremidades causado pela aderência à parede. Aproximando-se do centro da tubulação, a velocidade decai significativamente ficando próxima de zero. Ao se analisar os dois últimos gráficos juntamente com os dados da velocimetria por imagem de partícula pode-se interpretar que o escoamento na saída de gás se dá como um ciclone, podendo apresentar regiões de recirculação à maiores vazões. Velocidades negativas no centro do duto chegaram a ser identificadas ao se operar o separador com vazões altas.

Nas figuras 4.6 e 4.7 estão os gráficos do valor quadrático médio das flutuações da velocidade axial e radial $u'_{axial,rms}$ e $u'_{radial,rms}$ que podem ser interpretados como a intensidade turbulenta de uma determinada região. Quanto maior u'_{rms} de um ponto, maior a intensidade turbulenta nesse ponto.

A intensidade turbulenta axial, figura 4.6 apresenta picos nos pontos de raio médio tendo no centro um valor menor. Nas proximidades da parede, ainda em diâmetros menores do que o da tubulação os valores caem e voltam a subir no limiar da tubulação. Isso pode ser interpretado tendo em vista que as medidas foram tomadas imediatamente após o fim da tubulação como um efeito da mudança brusca de um escoamento interno para o ambiente. É visível ainda uma assimetria entre o lado direito e esquerdo do gráfico, onde o lado de maior intensidade turbulenta coincide com o lado da entrada do ciclone.

A intensidade turbulenta radial, figura 4.7 apresenta uma distribuição bastante uniforme tendo seu ponto mais alto no centro da tubulação, caindo gradalmente até a iminência da parede da tubulação.

Os diâmetros identificados na saída de gás, apresentados no gráfico 4.8, foram mais finos do que o previsto de $3\mu m$, significando que para este critério o equipamento se mostrou mais eficiente que o previsto. Entende-se que isso se deve ao fato

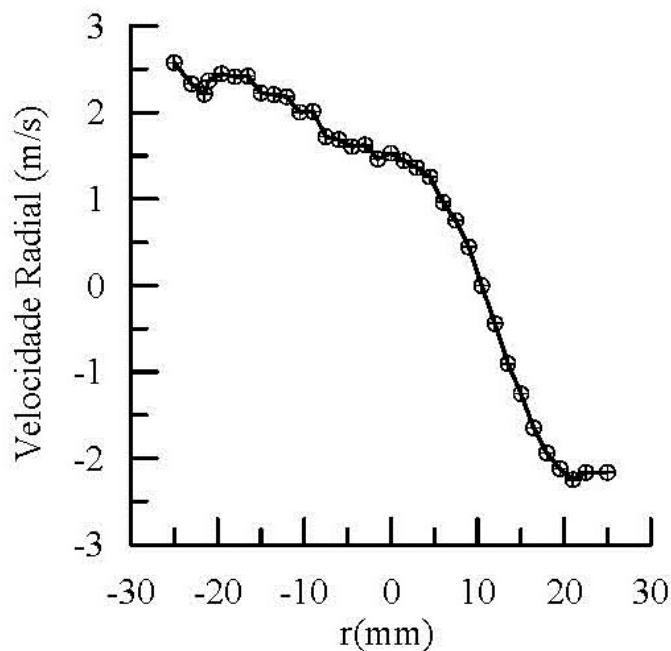


Figura 4.4: Velocidade Radial

de o separador não estar sendo testado em seu limite de capacidade. O diâmetro das partículas identificadas decaiu levemente de uma extremidade à outra da tubulação, onde a primeira extremidade é a mais afastada da entrada do equipamento e a segunda a mais próxima. O decaimento dos diâmetro pode ter ocorrido por uma diferença de eficiência de separação entre os lados do corpo do ciclone.

A concentração de partículas por centímetro cúbico apresentada no gráfico 4.9 pode lançar alguma luz sobre a eficiência global de separação pois permite o cálculo do volume total de líquido carregado na saída de gás quando se possui o diâmetro de gotas nos respectivos pontos de observação.

Considerando as gotas esféricas, o volume de cada gota é calculado pelo seu diâmetro através da fórmula

$$V = \frac{4}{3}\pi \frac{d^3}{2} \quad (4.1)$$

A concentração de gotículas de água oscilou bastante ao longo do diâmetro, não esclarecendo se isso pode ter se dado por algum fator geométrico do separador. O volume pode ser multiplicado pela concentração de gotas em cada ponto e pela velocidade de saída no sentido axial. Ponderando pela área obtém-se o volume de líquido de $1,11348 \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{h}$. A eficiência de separação neste caso fica igual a 99,9999994% sendo esta a eficiência máxima prevista para o equipamento.

Para melhor entendimento do escoamento, alguns pontos foram observados isoladamente. Estes pontos foram escolhidos conforme a intensidade turbulenta, onde

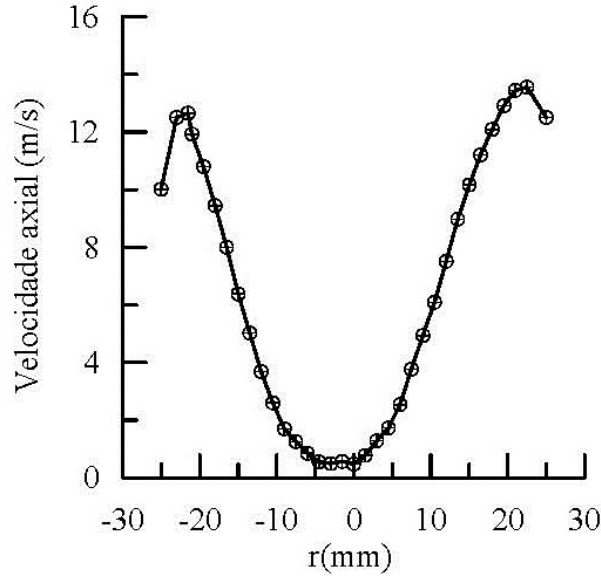


Figura 4.5: Velocidade Axial

o ponto 8 é o de maior intensidade turbulenta, o ponto 17 o de menor intensidade turbulenta e o ponto 4 intermediário entre os dois. De cada um dos pontos foi tirado um histograma que ilustra a diferença entre o comportamento das velocidades e as variações entre a distribuição de cada uma delas.

A figura 4.10 mostra o histogramas do ponto 4 da distribuição de velocidades na direção axial, que mostra uma distribuição normal bastante bem comportada, com a média em torno de $6,384m/s$, da mesma forma que o segundo histograma da velocidade radial 4.11 com média de $2,368m/s$. O histograma dos diâmetros 4.12 nesse ponto já se diferencia por ter uma distribuição log-normal de média $1,498\mu m$.

A figura mostra os histogramas no ponto de maior intensidade turbulenta. A distribuição de velocidades axial na figura 4.13 mostra uma distribuição normal com a média em torno de $11,923m/s$ e a de velocidade radial na figura 4.14 tem a média de $2,226m/s$. A distribuição de diâmetros conforme a figura 4.15 é da forma log-normal com média de $1,512\mu m$.

O ponto 17 apresenta distribuições com maiores diferenças em relação à distribuição padrão, apesar de ser o ponto de menor intensidade turbulenta onde no primeiro histograma há uma pequena discrepância em relação à distribuição normal das velocidades axiais, figura 4.16, onde a média é de $0,550m/s$. Já na velocidade radial figura 4.16, observa-se claramente dois picos de velocidade formando dois perfis normais sobrepostos. A distribuição de diâmetros também destoa um pouco da distribuição log-normal, mostrada na figura 4.18.

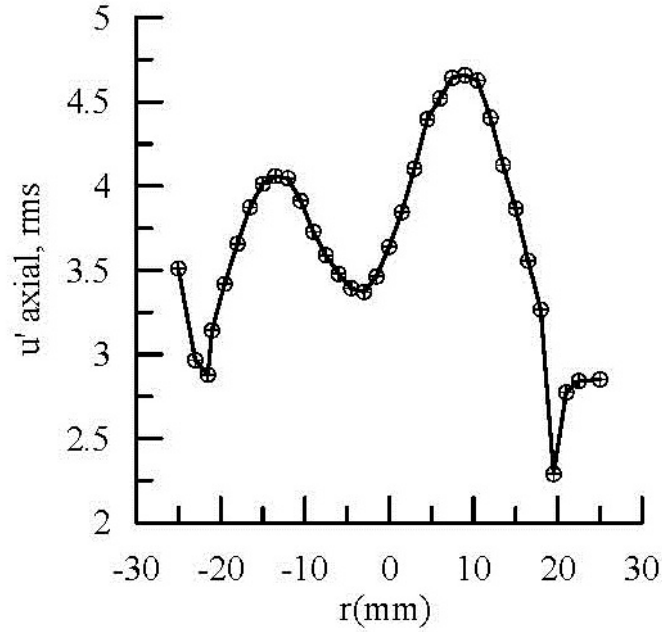


Figura 4.6: Intensidade turbulenta axial

4.5 Avaliação do equipamento completo $RLG = 0.04$

A segunda razão gás-líquido avaliada é a $RLG = 0.04$, já um pouco acima da condição ideal de operação. Neste caso foi mantida a mesma vazão de ar anterior, subindo a vazão de água até obter a razão desejada. Esta condição foi avaliada com a técnica PIV na saída de ar do separador e as condições de operação estão na tabela 4.6 abaixo.

Tabela 4.6: Condições de operação na $RLG=0.04$

RGL	4%
Nível de líquido	<i>zero</i>
Vazão de água	$0.4 \frac{m^3}{h}$
Vazão de ar	$10 \frac{m^3}{h}$
P1	7,2 bar
P2	7 bar
P3	0.022 bar
P4	0 bar
P5	0.016 bar

O campo de velocidades instantânea está exemplificado na figura 4.19 abaixo,

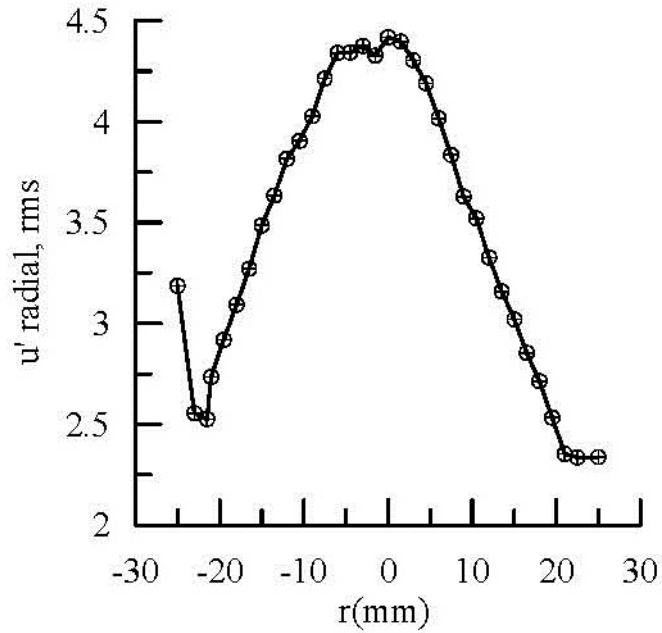


Figura 4.7: Intensidade turbulenta radial

onde mostra um centro de giro bastante instável, onde a análise de várias imagens sequenciais permite identificar a precessão em torno do centro de maneira bastante irregular.

A observação da média das velocidades na figura 4.20 mostra uma leve queda na velocidade tangencial das gotículas de água, essa queda pode ser devido ao tamanho das gotículas nesta configuração, o que precisa ser comprovado com a técnica de anemometria laser-Doppler na continuação da análise experimental. A distribuição de velocidades foi semelhante à menor razão líquido-gás analisada anteriormente onde as maiores velocidades se encontram nos pontos mais afastados do centro, diminuindo no limiar da parede da tubulação. Ao se aproximar do centro de giro a velocidade tende a zero, sendo que exatamente no centro torna-se nula.

O campo de velocidades em todos os casos apresentou algumas ondulações próximas à parede do duto que precisam ser esclarecidas, podendo ter sido causadas por algum componente interno ou assimetria da instalação experimental.

4.6 Avaliação do equipamento completo com RLG=0.06

O terceiro caso de análise foi com uma razão líquido-gás de 0.06 sendo já bastante superior à condição de trabalho ideal. Esta situação foi obtida mantendo a vazão de ar das condições de operação anteriores e variando a vazão de água. Os parâmetros

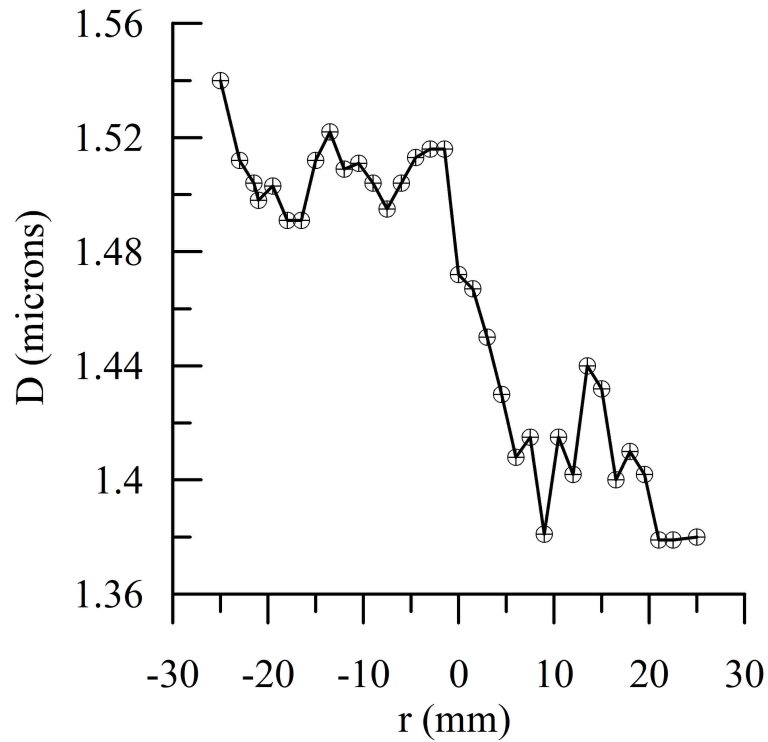


Figura 4.8: Diâmetro das gotículas na saída de gás

operacionais podem ser vistos na tabela 4.7.

Tabela 4.7: Condições de operação RLG=0.06

RGL	6%
Nível de líquido	<i>zero</i>
Vazão de água	$0.2 \frac{m^3}{h}$
Vazão de ar	$10 \frac{m^3}{h}$
P1	<i>7,2 bar</i>
P2	<i>7 bar</i>
P3	<i>0.022 bar</i>
P4	<i>0 bar</i>
P5	<i>0.016 bar</i>

Nestas condições foram obtidas *4mil* imagens sequenciais onde pode se observar o comportamento da velocidade tangencial de um plano superior. A velocidade instantânea em um determinado momento está representada na figura 4.21 e mostra a precessão do núcleo do escoamento em torno do eixo, porém de forma mais organizada que as condições anteriores e com uma amplitude de afastamento menor. Essa situação leva a interpretação de que a maiores vazões o núcleo torna-se mais estável e centralizado, o que precisa ser confirmado retirando imagens do escoamento ao

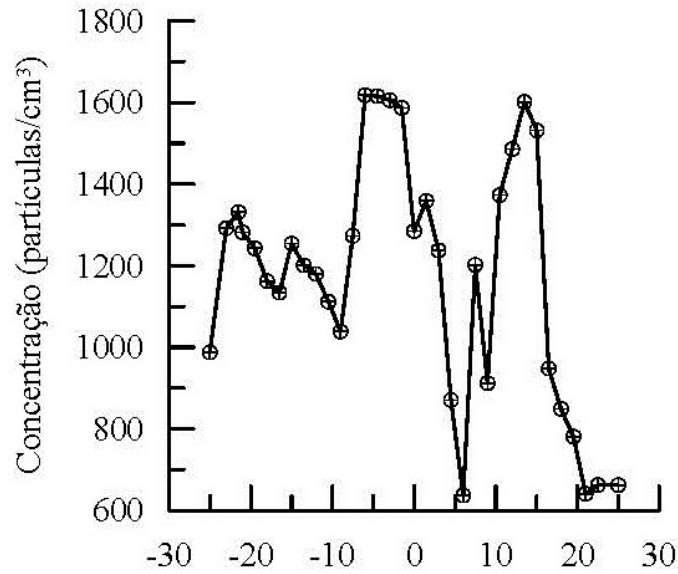


Figura 4.9: Concentração de gotículas por centímetro cúbico na saída de gás

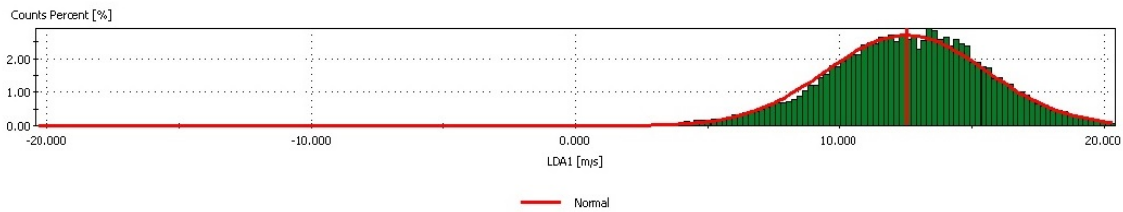


Figura 4.10: Histogramas de velocidade axial no ponto de intensidade turbulenta média

longo do corpo do separador.

A média das velocidades na figura 4.22 mostra que as velocidade sofre um decaimento em relação às duas situações anteriores onde a máxima nas proximidades da parede chega à $9,898m/s$ o que novamente pode ser uma consequência da variação do tamanho de gotas na saída, o que será confirmado pela análise com anemometria Laser-Doppler nos experimentos subsequentes.

Os dados obtidos até o momento lançam alguma luz sobre o comportamento do escoamento no interior do separador porém ainda não são conclusivos e não completam a sequência de experimentos proposta inicialmente. Os demais experimentos ainda se encontram em andamento e serão publicados posteriormente na forma de artigos científicos.

A análise experimental subsequente deve obter dados de anemometria laser-Doppler para as condições de $RLG = 0.04$ e $RLG = 0.06$ que são cruciais para a análise completa de cada ponto de medição e podem esclarecer juntamente com

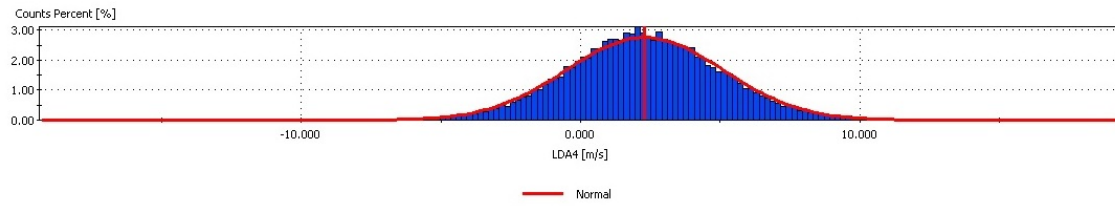


Figura 4.11: Histogramas de velocidade radial no ponto de intensidade turbulenta média

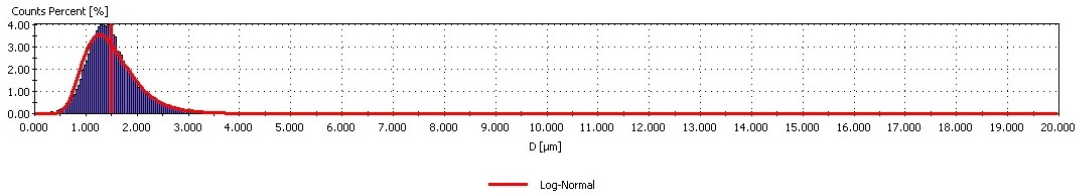


Figura 4.12: Histogramas dos diâmetros no ponto de intensidade turbulenta média

os dados de VIP quais são as principais diferenças entre as condições de operação.

É preciso ainda que se realize os testes variando os componentes internos a fim de isolar as funções de cada um, o que permitirá entender de forma completa o funcionamento do separador e seu escoamento interno.

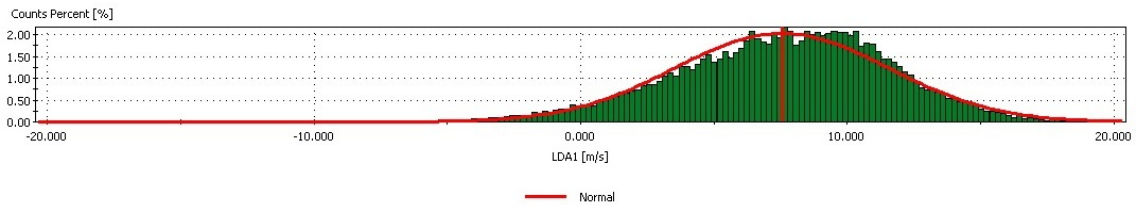


Figura 4.13: Histogramas de velocidade axial no ponto de maior intensidade turbulenta

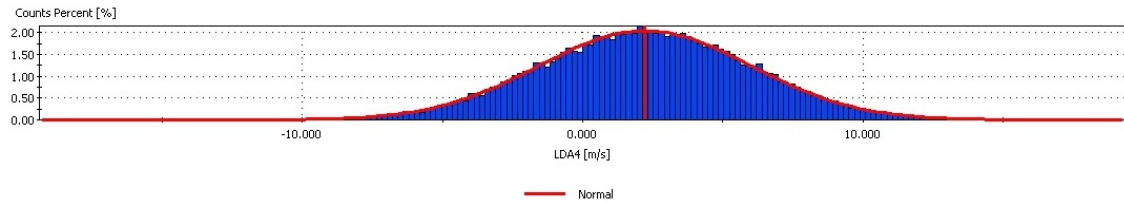


Figura 4.14: Histogramas de velocidade radial no ponto maior de intensidade turbulenta

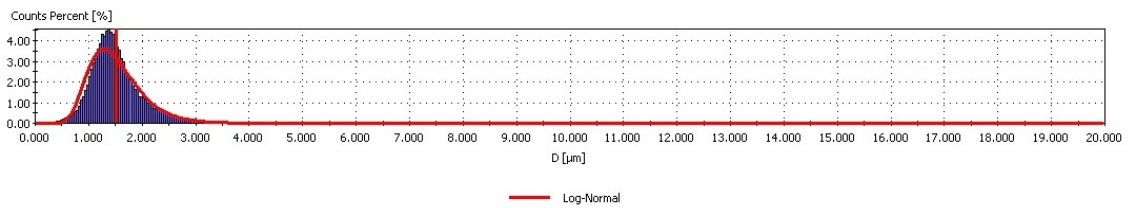


Figura 4.15: Histogramas de diâmetros no ponto de maior intensidade turbulenta

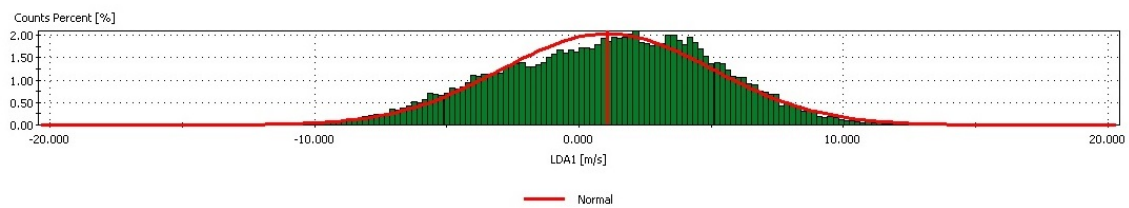


Figura 4.16: Histogramas de velocidade axial no ponto de menor intensidade turbulenta

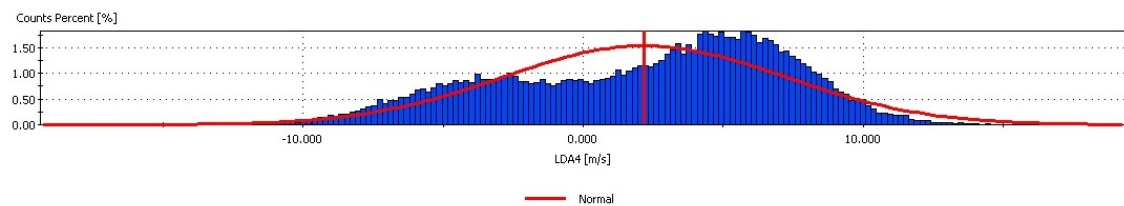


Figura 4.17: Histogramas de velocidade radial no ponto de menor intensidade turbulenta

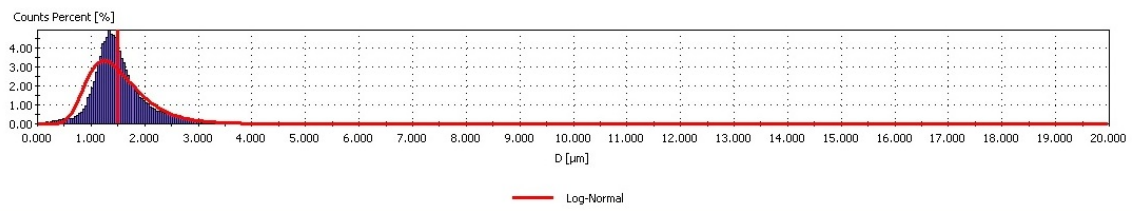


Figura 4.18: Histogramas de diâmetros no ponto de menor intensidade turbulenta

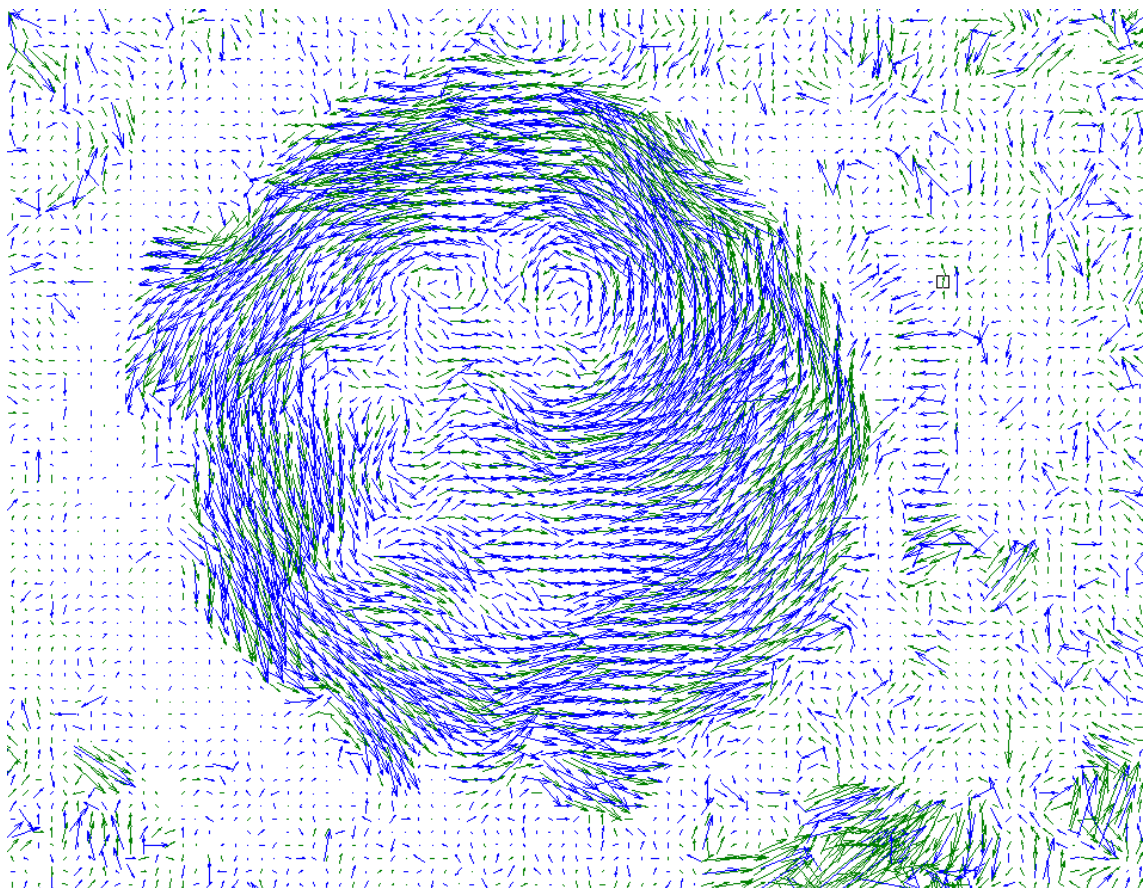


Figura 4.19: Campo de Velocidades Instantânea

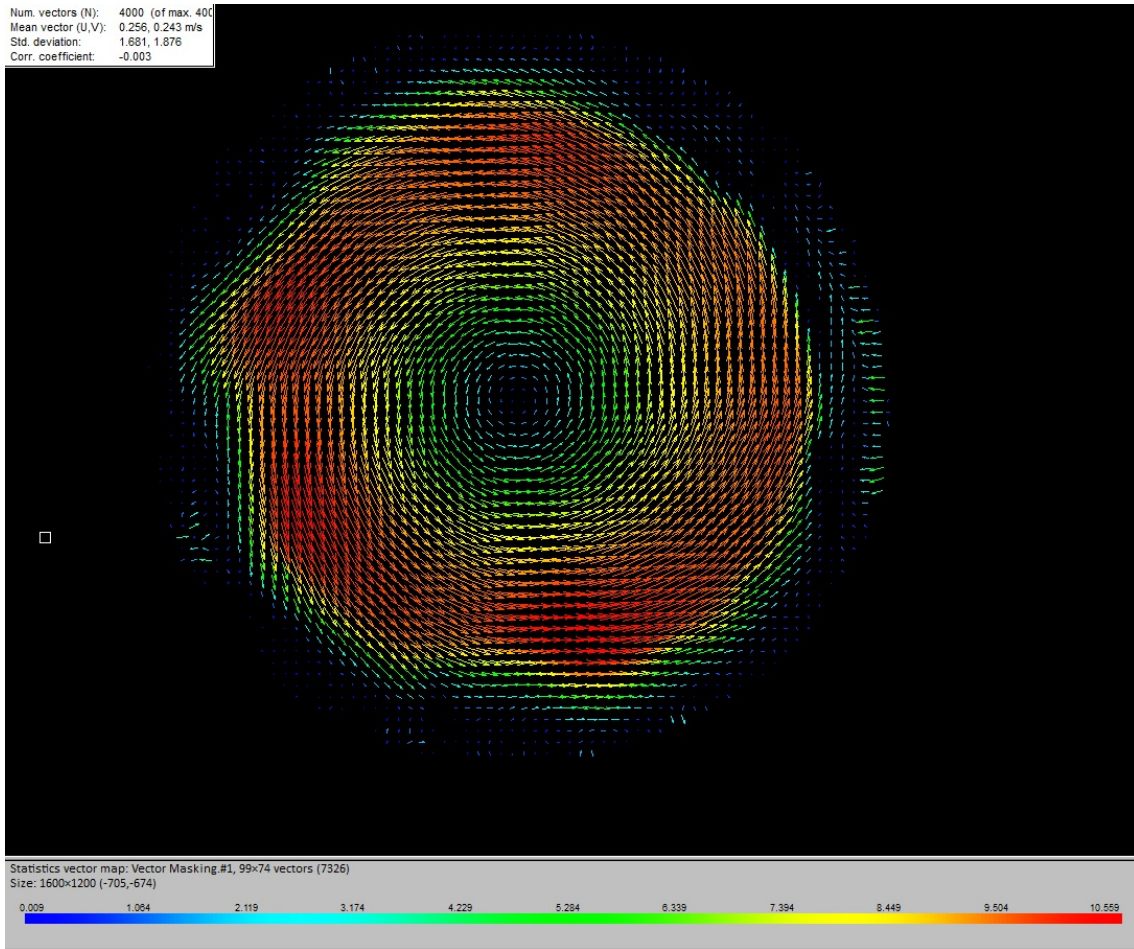


Figura 4.20: Campo de Velocidades Média

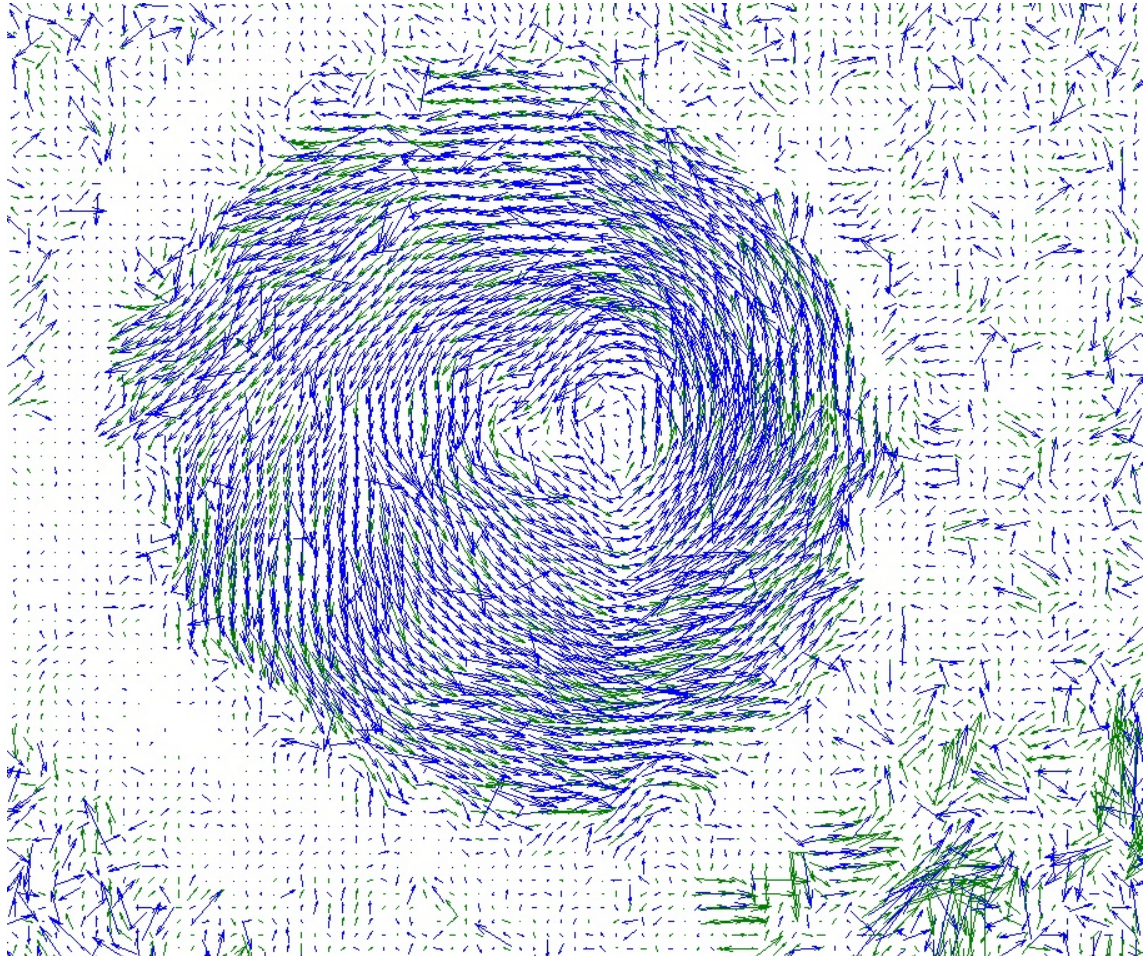


Figura 4.21: Campo de Velocidades Instantânea

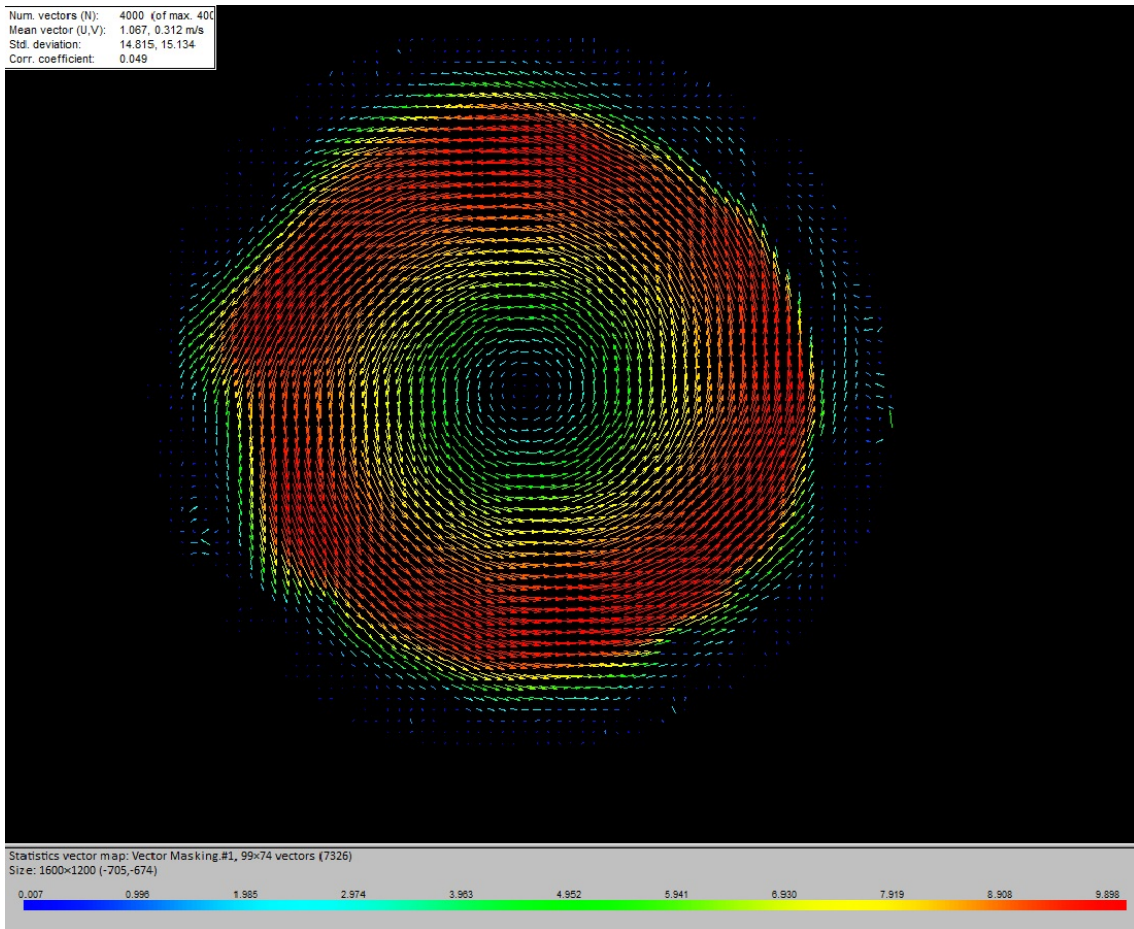


Figura 4.22: Campo de Velocidades Médias

Capítulo 5

Conclusão

O objetivo central do trabalho foi de projetar e construir um protótipo do separador ciclônico de corpo cilíndrico e executar uma seqüência de experimentos capazes de fornecer de forma rigorosa, dados críticos para uma correta interpretação e formulação teórica do escoamento no interior do separador. Este separador apresenta dificuldades na sua utilização efetiva em campo visto que sua eficiência de separação não condiz com o previsto para o equipamento que é de aproximadamente 99,99%. O separador é previsto para trabalhar com uma vazão de gás e líquido constantes, porém não é o que ocorre na prática de forma que não é possível prever o comportamento em situações específicas como um regime de golfadas.

Com o intuito de estudar o comportamento do separador em diversas situações de forma a conhecer completamente seus mecanismos de separação e as respostas a diferentes regimes de escoamento, foi dado início a um processo de dimensionamento e projeto de um protótipo em acrílico a fim de permitir a completa visualização do escoamento interno, o que não é possível em um equipamento real que, para suportar altas vazões e pressões é contruído em aço e portanto as informações tiradas em campo são apenas as condições de entrada e saída.

O processo de construção do protótipo bem como sua instalação e completa instrumentação demandaram a maior parte dos esforços e do tempo disponível até o momento e são vistos como uma contribuição deste trabalho. Atualmente os testes de avaliação do separador estão viabilizados com a bancada experimental completamente operacional provida de instrumentação como a anemometria Laser-Doppler e a velocimetria por imagem de partículas.

A viabilização da utilização destes instrumentos em um equipamento de difícil acesso também foram uma contribuição deste trabalho. Os trabalhos até então conhecidos fazem uso de anemometria Laser-Doppler e de técnica PIV em ciclones, porém em todos os casos as informações são obtidas sem a utilização de um líquido mas sim de ar com partículas traçadoras sólidas ou mesmo gasosas, o que facilita a visualização do escoamento porém deixa de avaliar as particularidades dos ciclones

de líquido, comumente chamados de hidrociclones. Esta contribuição é inédita e de grande relevância pois os hidrociclones apresentam mecanismos específicos de arraste de gotículas que podem ser cuidadosamente estudados nas instalações atuais.

Foram realizados testes de velocimetria por imagem de partículas em tres razões gás-líquido que forneceram um melhor entendimento do equipamento mostrando claramente a precessão do núcleo gasoso em torno do centro do separador e o movimento rotativo na saída do equipamento, com velocidades decaindo no sentido do eixo de giro. Estas informações levam a concluir que o processo de separação é mais instável do que o esperado e possivelmente apresenta zonas de recirculação que precisam ser confirmadas com análises posteriores do escoamento interno. Este tipo de comportamento afeta a eficiência do separador e precisa ser mensurado e entendido de forma mais completa.

A análise visual do separador forneceu sensibilidade a respeito das variações de eficiência de separação e comportamento global do separador. Foi possível perceber que o separador tem um comportamento bastante instável no que diz respeito à sua eficiência de separação pois quando configurado em uma determinada razão gás-líquido este demorava cerca de trinta minutos para estabilizar. Esta informação é importante para a realização de testes em escala real onde a fase de estabilização pode ser confundida com ineficiência do equipamento na configuração em teste.

O nível de líquido no interior do separador tem grande influência sobre a sua eficiência. É preciso que se encontre um ponto ótimo de abertura da válvula reguladora de forma que não permita o acúmulo de líquido em seu interior embora mantenha sempre um nível mínimo. Este ponto ótimo é facilmente mantido em escala laboratorial quando o separador é transparente e pode-se fazer um controle visual. No entanto, em escala real é preciso que se faça um balanço entre as vazões de entrada e saída de líquido de forma que se possa manter sempre um nível mínimo durante a operação.

Visualmente foi possível observar que ao se testar o separador sem a presença de óleo e portanto sem a formação de espuma, o componente interno chamado de chapéu chinês não exerceu nenhuma função relevante no separador levando a concluir que sua função é apenas de contenção da espuma pois evita que esta retorne ao escoamento.

As saias anti-filme instaladas externamente no duto de saída de gás são de fundamental importância na eficiência de separação pois sem a presença das mesma o líquido adere à parede da tubulação sendo direcionado diretamente para a saída de gás.

O elemento direcionador do escoamento não aproveita de forma efetiva a velocidade do escoamento de entrada. É possível melhorar sua configuração tornando-o tangencial à entrada e impedindo o acúmulo de fluido na parte superior do equipa-

mento.

O método da caixa coalescedora não se mostrou efetivo na medição de eficiência, porém agregou conhecimento a respeito da fase inicial de estabilização que tem uma duração relativamente longa, em torno de vinte minutos a meia hora e foi de grande importância para a correta avaliação nos testes subsequentes.

A anemometria Laser-Doppler foi aplicada até o momento apenas na razão líquido-gás igual a 0.02 fornecendo dados fundamentais para a análise de eficiência do equipamento como o diâmetro das gotículas e a concentração das mesmas, que podem usadas em conjunto para obter a vazão de água carregada na saída de gás. Um melhor esclarecimento dos parâmetros de influência na eficiência de separação será obtido quando os dados de anemometria Laser-Doppler forem suficientes para se fazer comparações entre as condições de operação. O processo de obtenção de dados ainda está em andamento e ainda deve demandar alguns meses de experimentação.

Os dados obtidos até o momento são de grande importância para o entendimento do escoamento como um todo, porém poucas conclusões podem ser obtidas ao se analisar isoladamente estes dados. É preciso que se obtenha informações de anemometria Laser-Doppler nas condições de $RLG = 0.04$ e $RLG = 0.06$ para que se possa comparar a eficiência global do equipamento com os casos anteriores. O escoamento será melhor entendido quando forem obtidos campos de velocidade de planos do corpo do separador que juntamente com os dados de *LDA* podem elucidar sobre os mecanismos de arraste de gotículas e fenômenos como o fim de vórtice observados em trabalhos anteriores.

Ainda com o separador completo, é preciso que se analise planos do escoamento em seu interior a fim de ter uma visualização completa do separador. Em todos os trabalhos encontrados, os separadores são estudados em tres ou quatro situações diferentes, da mesma forma que foi feito neste trabalho onde algumas razões líquido-gás foram escolhidas. Estes dados fornecem dados qualitativos e muito pertinentes como quando afirmam que em determinadas condições de velocidade do gás o fator limitante da eficiência é o diâmetro das partícula e a velocidades mais altas o arraste predomina. Porém, estes dados são obtidos de forma pontual e qualitativa sendo que o ponto onde essa mudança ocorre nunca é esclarecido.

Fica claro que os estudos em torno de hidrociclones precisam de informações quantitativas que permitam a parametrização das condições de operação. Para tanto é preciso que se analise o funcionamento do separador em um número maior de situações refinando aqueles em que ocorrem variações mais bruscas na eficiência de separação.

Assim, as informações obtidas até o momento não são conclusivas, porém apenas iniciais quando o objetivo final é o de obter um modelo preditivo da eficiência do separador onde as condições de operação possam ser utilizadas como parâmetros de

entrada.

Referências Bibliográficas

- [1] AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, G. N. E. B. *Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural*. ANP, 2012.
- [2] HOFFMANN, A., STEIN, L. *Gas cyclones and swirl tubes - principles, design and operation*. 2 ed. Bergen, Springer-Verlag, 2002.
- [3] ORANGE, L. “Device for separating liquids and/or solids from a gas steam”, *United States Patent*, v. 5 129 931, 1992.
- [4] PENG, W., HOFFMANN, A., DRIES, H., et al. “Neutrally buoyant tracer in a gas cleaning equipment: a case study”, *Measurement Science and Technology*, v. 16, pp. 2405–2414, 2005.
- [5] CHANG, Y., ILEA, C., AASEN, Ø., et al. “Particle flow in hydrocyclone investigated by positron emission particle tracking”, *Chemical Engineering Science*, v. 66, pp. 4203–4211, 2011.
- [6] PISAREV, G. I., GJERDE, V., BALAKIN, B. V., et al. “Experimental and Computational Study of the ”End of the Vortex” Phenomenon in Reverse-Flow Centrifugal Separator”, *AIChE Journal*, v. 58, pp. 101–107, 2012.
- [7] RAFFEL, M., WILLERT, C., KOMPENHANS, J. *Particle Image Velocimetry. A Pratical Guide*. 1 ed. Göttingen, Germany, Springer, 1998.
- [8] SOUDERS, M., BROWN, G. “Design of fractionating columns”, *Industrial and Engineering Chemistry*, v. 26(1), pp. 98, 1934.
- [9] AUSTRHEIM, T. *Experimental characterization of high pressure natural gas scrubbers*. Tese de PhD, University of Bergen, Bergen, Norway, 2006.
- [10] ORANGE, L. “Cyclone-type separators score high in comparative tests”, *Oil and Gas Journal*, v. 88, pp. 54–88, 1990.
- [11] AUSTRHEIM, T., GJERTSEN, L. H., HOFFMANN, A. C. “Is the Souders-Brown equation sufficient for scrubber design? An experimental investi-

- gation at elevated pressure with hydrocarbon fluids”, *Chemical Engineering Journal*, v. 62, pp. 5715–5727, 2007.
- [12] NANNINGA, N., JANSSEN, J. “Gasunie/CDS improvement of the Gasunie cyclone gas-liquid separator”. In: *Proceedings of the 2001 International Gas Research Conference IGRC*, Amsterdam, 2001.
- [13] ISHII, M. “Droplet entrainment correlation in annular two-phase flow”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 32, pp. 1835–1846, 1989.
- [14] ISHII, M., GROLMES, M. A. “Inception criteria for droplet entrainment in two-phase concurrent film flow”, *A.I.Ch.E.*, v. 21(2), pp. 308–318, 1975.
- [15] HEWITT, G. F., HALL-TAYLOR, N. S. “Annular Two-phase Flow”, *Pergamon Press*, pp. 136–162, 1970.
- [16] SWANBORN, R. A. *A new approach to the design of gas-liquid separators for the oil industry*. 1 ed. Delft, Denmark, University of Delft, 1988.
- [17] PENG, W., HOFFMANN, A., BOOT, P., et al. “Flow pattern in reverse-flow centrifugal separators”, *Powder Technology*, v. 127, pp. 212–222, 2002.
- [18] FISHER, M., FLACK, M. D. “Velocity distributions in a hydrocyclone separator”, *Experiments in fluids*, v. 32, 2002.
- [19] HOFFMANN, A. C., DE JONGE, R., ARENDS, H., et al. “Evidence of the natural vortex length and its effects on the separation efficiency of gas cyclones”, *Gas Cyclone Separators*, 1995.
- [20] PISAREV, G. I., HOFFMANN, A. C. “Effect of the ‘end of the vortex’ phenomenon on the particle motion and separation in a swirl tube separator”, *Powder Technology*, v. 222, pp. 101–107, 2012.
- [21] AUSTRHEIM, T., GJERTSEN, L. H., HOFFMANN, A. C. “An experimental investigation of scrubber internals at conditions of low pressure”, *Chemical Engineering Journal*, v. 138, pp. 95–102, 2008.
- [22] AUSTRHEIM, T., ADN ALEX C. HOFFMANN, L. H. G. “Experimental investigation of the performance of a large-scale scrubber operating at elevated pressure on live natural gas”, *Fuel*, v. 87, pp. 1281–1288, 2008.
- [23] GARRET, D. A. *The Microscopic Detection of Corrosion in Aluminum Aircraft Structures with Thermal Neutron Beams and Film Imaging Methods*. In: Report NBSIR 78-1434, National Bureau of Standards, Washington, D.C., 1977.

- [24] FREIRE, A. P. S., ILHA, A., COLAÇO, M. J. *Turbulência*. 1 ed. Rio de Janeiro, RJ, ABCM, 2006.
- [25] A/S, D. D. *Flow Software Instalation and Users Guide*. 1 ed. Skovlund, Denmark, Dantec Dynamics, 2006.