

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO ISOTÉRMICO COM  
ELEVADA ROTAÇÃO GERADO EM UM COMBUSTOR DO TIPO LPP**

**LEONARDO IVO DE CARVALHO SILVA**

**ORIENTADOR: ARMANDO AZEVEDO CALDEIRA PIRES**

**CO-ORIENTADOR: ALDO JOÃO DE SOUSA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS**

**PUBLICAÇÃO:ENM.DM-166A/2011**

**BRASÍLIA/DF: julho/2011**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO ISOTÉRMICO COM  
ELEVADA ROTAÇÃO GERADO EM UM COMBUSTOR DO TIPO LPP**

**LEONARDO IVO DE CARVALHO SILVA**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS MECÂNICAS**

**APROVADO POR:**

---

**Prof. Armando Azevedo Caldeira Pires, PhD (ENM-UnB)**

**(Orientador)**

---

**Prof. Aldo João de Sousa, PhD (ENM-UnB)**

**(Co-orientador)**

---

**Prof. Carlos Alberto Gurgel Veras, PhD (ENM-UnB)**

**(Examinador Interno), PhD (ENM-UNB)**

---

**Prof. Taygoara Felamingo de Oliveira**

**(Examinador Externo), PhD (Engenharia Automotiva-UnB)**

**BRASÍLIA/DF: 01 de Julho de 2011**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

SILVA, LEONARDO IVO DE CARVALHO

Caracterização do escoamento isotérmico com elevada rotação gerado em um combustor do tipo LPP. [2011]

xi, 111p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2011)

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

- |   |                          |
|---|--------------------------|
| 1. Introdução                             | 2. Revisão Bibliográfica |
| 3. Sistemas e Procedimentos Experimentais | 4. Resultados e Análises |
| 5. Conclusões                             |                          |
| I. ENM/FT/UnB                             | II. Título (série)       |

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

Silva, Leonardo I. C. S. (2011). Caracterização do escoamento isotérmico com elevada rotação gerado em um combustor do tipo LPP. ENM.DM-166A/2011, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 111p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

AUTOR: Leonardo Ivo de Carvalho Silva.

TÍTULO: Caracterização do escoamento isotérmico com elevada rotação gerado em um combustor do tipo LPP.

GRAU: Mestre ANO:2011

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Leonardo Ivo de Carvalho Silva

QE 21 Conjunto E casa 25 – Guará II

71050-054 Brasília – DF Brasil.

*Dedico este trabalho, com todo o carinho, aos meus amados pais; Suêd José da Silva e Maria de Fátima Carvalho Silva, que investiram pesadamente na minha formação pessoal e profissional, sem medir esforços, às minhas irmãs; Ana Letícia e Andrea Fernanda, e à minha namorada, Adriana Misson, as quais sempre me apoiaram.*

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus amigos e orientadores; Dr. Armando Caldeira-Pires e Dr. Aldo João de Souza, por me abrirem as portas à oportunidade de realizar o curso de ciências mecânicas, neste departamento, e agradeço, principalmente, pelas orientações que formaram a base para o desenvolvimento do trabalho.

Aos meus pais, às minhas irmãs e à minha namorada que me apoiaram e incentivaram em toda a minha vida acadêmica.

Aos Doutores; Carlos Alberto Gurgel Veras e Taygoara Felamingo de Oliveira, por comporem a banca examinadora e pelas orientações que contribuíram com o melhoramento do trabalho.

Aos amigos e colegas de curso, os mestres; Rodrigo Garcia, Paulo de Tarso, Tatiana Vigínea, Marcelo Machado e Marcos Noletto, pela amizade e companheirismo e pela excepcional ajuda nas atividades de laboratório e de pesquisa bibliográfica do trabalho.

Aos amigos e colegas de trabalho; Dr. Manoel Fernandes Martinz Nogueira, Dr. Paulo Augusto Leonelli, Dra. Laura Porto, membros executivos do Ministério de Minas e Energia, e Eng. Ricardo Paes Gouveia, líder na Fiat Automóveis, por acreditarem e fomentarem todas as condições necessárias para que este trabalho fosse iniciado.

Aos amigos e colegas de trabalho; MSc. Anderson do Nascimento, Dr. José Guilherme Coelho Baeta e Dr. Rogério Jorge Amorin, engenheiros de desenvolvimento tecnológico da Fiat Powertrain, pela ajuda nas revisões técnicas da dissertação.

Aos colegas da secretaria do departamento de engenharia mecânica da UnB, Neuza Dias e Isabel Rodrigues, e aos técnicos do laboratório de combustão, Eurípedes Oliveira e Filipe Lopes, pela assistência prestada durante o curso.

E aos amigos; Keynes Fortes, Alyne Pisk, Frank Shimabukuro, Deyvid Lemos, Marcelo Lombardi, Ernani Neto e Marcelo Paiva pela amizade e pelo apoio de sempre em todas as minhas atividades fora e dentro da academia.

## Resumo

No presente trabalho experimental foi estudado o escoamento com elevada rotação considerado regular aos processos de queima em um combustor do tipo LPP, também conhecido como combustor de baixo NO<sub>x</sub>, para analisar a funcionalidade do seu sistema responsável pela geração do escoamento reativo. As medições experimentais foram realizadas com o uso das técnicas de anemometria a temperatura constante (ATC) e velocimetria por imagem de partículas (PIV).

O sistema gerador do escoamento reativo (ou sistema gerador de fluxo) é composto por um *swirler* axial e pela câmara de pré-mistura do combustor em questão. O *swirler* foi projetado para fornecer uma mistura reativa em diferentes níveis de rotação e a câmara de pré-mistura foi idealizada para garantir um tempo satisfatório de residência para o processo de mistura, levando-se em conta as possíveis configurações de rotação do escoamento oferecidas pelo *swirler*.

Para a realização do trabalho o sistema gerador de fluxo foi desacoplado do combustor LPP (montado no laboratório de combustão do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília), para a instalação dos equipamentos de medição à saída da câmara de pré-mistura. Foram utilizados dois ATC's do tipo Dantec, modelo Mini CTA 54T30, trabalhando em paralelo por meio de um sensor de dois fios, e um laser do tipo Nd:YAG com comprimento de onda igual a 532nm de coloração verde. O corante utilizado para a fluorescência foi a Rodamina B e para a velocimetria foram utilizadas partículas formadas com glicerina. Nas seções de ATC e de PIV os dados foram capturados no plano longitudinal do escoamento para três intensidades de rotação, caracterizadas pelo adimensional número geométrico de *swirl* ( $S'=0,88; 1,05$  e  $1,26$ ).

As experimentações permitiram observar o característico campo de velocidades e as estruturas existentes à região nuclear do escoamento. Permitiram também confirmar a condição de regularidade do vórtice com base na evolução contínua das frequências dos harmônicos dominantes (400Hz; 500Hz e 560Hz), observadas em seu núcleo. Estas constatações, segundo a literatura, indicam a existência de um vórtice pleno, conhecido como o vórtice colapsado, que é responsável pela diminuição das emissões poluentes e pelo processo de sustentação da chama no combustor LPP.

Demonstrou-se, portanto, que o sistema de fluxo é capaz atender às exigências de funcionamento do combustor de baixo NO<sub>x</sub> instalado no laboratório de combustão, por disponibilizar o escoamento adequado ao funcionamento desta tecnologia.

## Abstract

In this present experimental work, the flow with high rotation, applied on the processes of combustion in a combustor-type LPP, also known as low NO<sub>x</sub> combustor, was studied aiming to validate the functionality of the system, responsible for the generation of reactive flow. Measurements were made using the techniques of constant temperature anemometry (CTA) and particle image velocimetry (PIV).

The system of reactive flow generator (or flux generator system) is composed by a axial swirler and pre-mixing chamber of the mentioned combustor. The swirler is designed to provide a reactive mixture at different levels of rotation and the pre-mix chamber was designed to ensure a satisfactory residence time for the mixing process, taking into account the possible spin configurations offered by the swirl flow.

To perform this work, the flux generator system was decoupled of the LPP combustor, which is mounted at the laboratory of combustion of the Mechanical Engineering Department of Brasilia University, and the measure equipments were installed at the pre-mix chamber out. Two CTA's like Dantec, Mini CTA 54T30 model, were used working in parallel via a double wire sensor, and a laser type Nd: YAG with a wavelength equal to 532nm green color to. The dye used for fluorescence process was the Rhodamine B and for the processes with the velocimetry technique were used particles made by glycerin. In the CTA and PIV sections the relative data were captured in the longitudinal plane of the flow for three rotation levels, characterized by the dimensionless geometric swirl number ( $S' = 0,88; 1,05 \text{ e } 1,26$ ). The working fluid corresponds to the air flow under the isothermal condition.

The experiments allowed observing the characteristic velocity field and the structures at nuclear region of the flow. The condition of regularity of the vortex was confirmed by continuous evolution of the frequencies of the dominants harmonic in function of  $S'$  (400 Hz; 500 Hz e 560 Hz), observed at the flow's core.

As noted in the literature, these facts showed that the flux system is able to provide the correct flow to the operation of the LPP turbine technology, and therefore this system has the requirements to work for the low NO<sub>x</sub> combustor, installed in the laboratory of combustion.

## Sumário

1 - INTRODUÇÃO .....	1
1.1 - PANORAMA ENERGÉTICO NACIONAL .....	1
1.1.1 - Complementaridade térmica .....	3
1.2 - CONTROLE DE EMISSÕES POLUENTES .....	7
1.3 - COMBUSTOR DE BAIXAS EMISSÕES – TECNOLOGIA LPP .....	9
1.4 - OBJETIVOS DO TRABALHO .....	13
1.5 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	15
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 - VISÃO GERAL DOS ESCOAMENTOS ROTACIONAIS COM ELEVADA ROTAÇÃO .....	16
2.2 - ESCOAMENTO ROTATIVO COM ELEVADA ROTAÇÃO APLICADO AO COMBUSTOR DO TIPO LPP .....	26
2.3 – CARACTERIZAÇÃO DO CAMPO DE VELOCIDADES DA BASE DO ESCOAMENTO E IDENTIFICAÇÃO DO PVC E DA CONDIÇÃO DE REGULARIDADE DO VÓRTICE .....	33
2.3.1 – Perfis de Velocidade e Identificação do PVC .....	33
2.3.1.1 – Identificação da condição de regularidade do escoamento via análises dos harmônicos dominantes do PVC .....	39
2.4 - O NÚMERO DE SWIRL .....	42
3 - SISTEMAS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	47
3.1 - SISTEMA GERADOR DE FLUXO .....	48
3.2 - TÉCNICA DE VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULAS – PIV .....	50
3.2.1 – Definição e princípio de funcionamento .....	50
3.2.2 – Processamento de dados.....	52
3.2.3 - Particulados.....	56
3.2.4 – Plano de laser pulsado .....	58
3.2.5 – Medição do escoamento .....	58

3.2.5.1 – Calibração do PIV .....	59
3.2.5.2 – Processo de medição do escoamento.....	60
3.3 - A TÉCNICA DE ANEMOMETRIA A TEMPERATURA CONSTANTE - ATC	64
3.3.1 - Definição.....	64
3.3.2 - Caracterização experimental do escoamento .....	66
3.3.2.1 – Calibração dos anemômetros.....	66
3.3.2.2 – Processo de medição do escoamento.....	71
3.3.2.2.1 – Caracterização do campo de velocidades .....	77
3.3.2.2.2 – Tratamento estatístico do escoamento turbulento .....	81
4 - RESULTADOS E ANÁLISES .....	84
4.1 - ANÁLISES DO CAMPO DE VELOCIDADES À BASE DO ESCOAMENTO COM ELEVADA ROTAÇÃO .....	84
4.1.1 – Caracterização do campo de velocidades.....	84
4.1.2 – Identificação do PVC .....	89
4.1.3 – Caracterização visual do campo de velocidades do escoamento com elevado número de <i>swirl</i> .....	98
4.2 – COMPILAÇÃO DOS RESULTADOS E ANÁLISE DA CONDIÇÃO DE REGULARIDADE DO ESCOAMENTO .....	100
5 – CONCLUSÕES.....	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	106
APÊNDICE A – ARQUIVOS NO CD .....	111

## Lista de tabelas

Tabela 1.1 – Síntese dos Resultados do BEN-2010.....	2
Tabela 1.2 – Oferta Interna de Energia.....	3
Tabela 1.3 – Padrões Nacionais de Qualidade do Ar (Resolução CONAMA Nº 003 de 28 de junho de 1990).....	9
Tabela 3.1 – Configuração do sistema de medição do escoamento.....	60
Tabela 4.1 - Frequências dos Harmônicos Dominantes [Hz] à base do vórtice colapsado em função de S' e da região analisada.....	101

## Lista de figuras

Figura 1.1 – Cenário de Crescimento Econômico – Produto Interno Bruto PIB - % ao ano..	4
Figura 1.2 – Evolução do Fator de Participação das Fontes de Geração.....	4
Figura 1.3 – Dependência da Espacialidade das Chuvas.....	5
Figura 1.4 – Sazonalidade das Vazões na Região Nordeste.....	6
Figura 1.5 – Concepção de um modelo de turbina LPP.....	11
Figura 1.6 – Esquema de um Processo de Ancoramento da Chama pela Dinâmica do Escoamento Rotacional.....	12
Figura 1.7 – Sistema Experimental; <i>Swirler</i> + Câmara de Pré-mistura do Combustor LPP..	14
Figura 1.8 – Seção de Medição do Escoamento – Saída da Câmara de Pré-mistura do Combustor LPP.....	14
Figura 2.1 – Volume de controle de atuação do escoamento rotacional (a) esquema da estrutura do ciclone separador de partículas tipo A e tipo B (prolongamento do duto de saída na câmara do ciclone). (b) domínio computacional para o ciclone do tipo B. Análise via metodologia Large Eddy Simulation – LES.....	17
Figura 2.2 – Simulação (LES) dos campos de velocidade transversais formados nos ciclones do tipo A e B com as respectivas escalas adimensionais de velocidade.....	18
Figura 2.3 – Simulação (LES) tridimensional dos campos de velocidade longitudinais formados nos ciclones do tipo A e B com as respectivas escalas adimensionais de velocidade.....	18
Figura 2.4 – Conceito de combustor de baixo NO <sub>x</sub> com múltiplos estágios de injeção de ar de diluição.....	19
Figura 2.5 – Domínio computacional utilizado nas simulações do combustor de baixo NO <sub>x</sub> .....	20
Figura 2.6 – Resultado das simulações computacionais no combustor de baixo NO <sub>x</sub> . (a) simulação da distribuição radial da velocidade axial média por meio da técnica LES, em função das configurações adotadas e (b) simulação da distribuição radial da velocidade axial média por meio da técnica RANS, em função das configurações adotadas.....	21
Figura 2.7 – Relação entre o ângulo de rotação do ar secundário com a geração de NO <sub>x</sub> por meio do uso dos dois tipos de carvão: betuminoso - Wara e o sub-betuminoso – Newlands.....	22
Figura 2.8 – Dinâmica do escoamento rotacional aplicado aos motores de ciclo Diesel. (a) Sentido da movimentação de <i>swirl</i> no cilindro e (b) visualização transversal do escoamento com swirl no cilindro - Simulação Computacional.....	23
Figura 2.9 – Dinâmica do escoamento rotacional aplicado aos motores de ciclo Diesel. (a) Sentido da movimentação Tumble no cilindro e (b) visualização transversal do escoamento com Tumble no cilindro - Simulação Computacional.....	24
Figura 2.10 – Esquema da estratégia de resfriamento dos gases quentes como solução para a diminuição do NO <sub>x</sub> emitido.....	25

Figura 2.11 – Formação do vórtice colapsado à entrada de um combustor do tipo LPP. (a) intensidade de rotação $S' = 0,32$ ; (b) $S' = 0,62$ ; (c) $S' = 1,05$ e (d) evolução dos picos dos espectros de pressão do escoamento em função de $S'$ .....	26
Figura 2.12 – O campo de velocidades caracterizando o momento do colapso do escoamento rotacional à entrada de um combustor LPP.....	27
Figura 2.13 – Simulação em 3-D do vórtice colapsado. (a) visualização global do vórtice com ênfase ao VSI e ao VSE; (b) visualização da seção longitudinal com ênfase ao VP, ao VSI e ao VSE; (c) visualização da seção transversal com ênfase aos VP e ao VSE e (d) sentido da helicidade dos escoamentos.....	28
Figura 2.14 – Visualização do PVC isotérmico. (a) $S = 0,40$ e (b) $S = 0,45$ .....	29
Figura 2.15 – Visualização do PVC isotérmico com um prolongamento helicoidal da sua estrutura.....	29
Figura 2.16 – Visualização do PVC isotérmico desenvolvendo-se na estrutura helicoidal. (a) $S = 0,47$ ; (b) $S = 0,7$ e (c) $S = 0,94$ .....	30
Figura 2.17 – Visualização computacional da base do escoamento isotérmico axial do vórtice colapsado. (a) Análise vetorial com ênfase ao VSI e (b) análise por meio das linhas de corrente com ênfase ao VSI.....	30
Figura 2.18 – Visualização computacional do escoamento isotérmico axial do vórtice colapsado com ênfase ao VSI e ao escoamento periférico.....	31
Figura 2.19 – Visualização computacional do escoamento isotérmico axial do vórtice colapsado. (a) ênfase ao VSI e a intensidade da velocidade e (b) ênfase ao VSI por meio de vetores.....	31
Figura 2.20 – Desenvolvimento da ZRC em função da rotação do escoamento. (a) $S = 0,47$ ; (b) $S = 0,7$ ; (c) $S = 0,94$ e (d) Dimensão da ZRC – medida longitudinal/diâmetro médio da bolha.....	32
Figura 2.21 – Caracterização do vórtice colapsado por meio da estrutura vorticial.....	33
Figura 2.22 – Simulação do campo vetorial do escoamento não isotérmico, com elevado número de <i>swirl</i> , em um combustor de baixo NOx, com ênfase às componentes radial e axial de velocidades.....	34
Figura 2.23 – Perfis de velocidade axial desenvolvendo-se em um combustor de baixo NOx. Comparação entre técnicas experimental de medição (linhas contínuas - LDA) e computacional (símbolos - LES).....	35
Figura 2.24 - Perfis de velocidade tangencial desenvolvendo-se em um combustor de baixo NOx. Comparação entre técnicas experimental de medição (linhas contínuas - LDA) e computacional (símbolos - LES).....	35
Figura 2.25 – Campo de velocidades axial-u e tangencial-v e de pressão centrífuga do escoamento com elevado número de <i>swirl</i> desenvolvendo-se em um combustor de baixo NOx.....	36
Figura 2.26 – Monitoramento do sinal de velocidade do escoamento com elevado número de <i>swirl</i> em um combustor de baixo NOx. (a) posição dos sensores à entrada do combustor; (b) caracterização dos sinais de velocidade axial no domínio do tempo; (c) e (d) caracterização dos sinais de velocidade axial no domínio da frequência.....	37

Figura 2.27 – Descentralização do PVC ocorrente em um combustor de baixo NOx. Simulação do campo vetorial de velocidades.....	38
Figura 2.28 – Visualização transversal da região nuclear do escoamento com elevado número de <i>swirl</i> , com ênfase aos fluxos axiais.....	38
Figura 2.29 – Visualização do núcleo do vórtice com elevado número de <i>swirl</i> . Simulação computacional do escoamento, no plano azimutal, com ênfase aos fluxos na direção axial.....	39
Figura 2.30 – Sistema experimental de um combustor LPP.....	40
Figura 2.31 – Evolução das frequências dos harmônicos dominantes nos em função de $S'$ ..	41
Figura 2.32 – Caracterização da condição de colapso do escoamento em função do número de <i>swirl</i> geométrico. (a) limites da flamabilidade e de retorno da chama do processo de combustão do sistema LPP e (b) concentração de espécies químicas à saída do combustor do sistema LPP.....	41
Figura 2.33 – Os dois tipos principais de <i>swirlers</i> (adaptado de LEFEBVRE, 1998).....	42
Figura 2.34 – Influência da configuração do <i>swirler</i> na produção da chama. (a) esquema representativo de um <i>swirler</i> axial com capsula alongada e admissão da mistura reativa via canal central aberto; (b) detalhe do <i>swirler</i> de cápsula alongada; (c) visualização da chama produzida nesta configuração de <i>swirler</i> (adaptado de CHANG et al., 2008).....	43
Figura 2.35 - Influência da configuração do <i>swirler</i> na produção da chama. (a) esquema representativo de um <i>swirler</i> axial com cápsula curta e admissão da mistura reativa via canal central fechado; (b) detalhe do <i>swirler</i> de capsula curta; (c) visualização da chama produzida nesta configuração de <i>swirler</i> (adaptado de CHANG et al., 2008).....	43
Figura 2.36 - Estrutura básica de um <i>swirler</i> de geometria axial (adaptado de FERREIRA, 2007).....	45
Figura 3.1 – Análise de paridade entre experimentações com escoamentos com elevado número de <i>swirl</i> ocorrendo em ambientes confinados e não confinados.....	48
Figura 3.2 – Sistema gerador de fluxo de ar.....	49
Figura 3.3 – Detalhe interno do <i>swirler</i> .....	49
Figura 3.4 – Representação do processo de medição via PIV. ....	51
Figura 3.5 – Esquema representativo do processamento de dados da técnica de PIV.....	53
Figura 3.6 – Esquema representativo da formação da função deslocamento $S'(m,n)$ a partir das áreas de interrogação $f(m,n)$ e $g(m,n)$ .....	53
Figura 3.7 – Pico resultante da correlação cruzada dos dados contidos nas AI's das imagens 1 e 2.....	54
Figura 3.8 – Esquema representativo do cálculo da correlação cruzada dos dados das AI's.....	55
Figura 3.9 – Amostras do nível de densidade da nuvem de particulados utilizados no processo de medição.....	57
Figura 3.10 – Esquema da montagem experimental para o processo de medição via PIV.....	59
Figura 3.11 – Sincronismo entre os pulsos de laser e os momentos de captura das imagens pela câmera (adaptado de LULA, 2006).....	61

Figura 3.12 – Posicionamento do plano de luz laser e da câmara CCD.....	62
Figura 3.13 – Segunda perspectiva apresentando o posicionamento do plano de luz laser e da câmara CCD.....	62
Figura 3.14 – Vista transversal do escoamento em teste para localizar o zero hidrodinâmico do escoamento $\theta = -5^\circ$ .....	63
Figura 3.15 – Vista transversal do escoamento em teste para localizar o zero hidrodinâmico do escoamento $\theta = 0^\circ$ .....	63
Figura 3.16 – Vista transversal do escoamento em teste para localizar o zero hidrodinâmico do escoamento $\theta = 5^\circ$ .....	63
Figura 3.17 – Ponte de Wheaststone de um anemômetro a temperatura constante.....	65
Figura 3.18 – Sonda anemométrica.....	65
Figura 3.19 – Esquema experimental para a calibração dos anemômetros.....	67
Figura 3.20 – Detalhe da sonda e do suporte. Características dos fios do sensor; 90% Platina, 10% Tungstênio, $\varnothing 5\mu\text{m}$ . O suporte é do tipo 55H24.....	67
Figura 3.21 – Bocal de calibração dos anemômetros.....	68
Figura 3.22 – Curvas de calibração dos anemômetros.....	70
Figura 3.23 – Esquema experimental para a aquisição do campo de velocidades via ATC e posicionamento da sonda anemométrica na região de medição do escoamento.....	72
Figura 3.24 – Posicionamento da sonda no campo de medições com ênfase aos 17 pontos de aquisição das velocidades do escoamento.....	73
Figura 3.25 – Detalhe do injetor do <i>swirler</i> , da camara de pré-mistura da LPP e da sonda anemométrica para a adoção das direções consideradas neste trabalho.....	74
Figura 3.26 – Possibilidade de multiposicionamento da sonda anemométrica para o processo de aquisição levando em conta a mudança de referencia espacial em função do ângulo de giro $\beta$ .....	75
Figura 3.27 – Sensor anemométrico posicionado à saída da câmara de pré-mistura com o ângulo de giro $\beta = 0$ , com ênfase à disposição dos fios sensores dos anemômetros.....	76
Figura 3.28 – Sensor anemométrico posicionado à saída da câmara de pré-mistura com o ângulo de giro $\beta = 90^\circ$ , com ênfase à disposição dos fios sensores dos anemômetros.....	76
Figura 3.29 – Processo de medição dos valores de velocidade efetivo de resfriamento dos fios sensores em função do ângulo de giro $\beta = 90^\circ$ . Detalhes do desenvolvimento espacial do escoamento rotativo.....	77
Figura 3.30 – Processo de medição dos valores de velocidade efetivo de resfriamento dos fios sensores em função do ângulo de giro $\beta = 0^\circ$ . Detalhes do desenvolvimento espacial do escoamento rotativo.....	78
Figura 3.31 – Campo médio de velocidades efetivas de resfriamento dos fios a saída da câmara de pré-mistura da LPP para a condição de $\beta = 90^\circ$ e S' de referência.....	79
3.32 - Campo médio de velocidades efetivas de resfriamento dos fios a saída da câmara de pré-mistura da LPP para a condição de $\beta = 0^\circ$ e S' de referência.....	79
3.33 - Campo médio de velocidades efetivas de resfriamento dos fios sensores à saída da câmara de pré-mistura da LPP.....	80

Figura 4.1 – Perfis de velocidade à saída da câmara de pré-mistura da LPP na condição de $S^*= 0,88$ .....	85
Figura 4.2 – Perfis de velocidade à saída da câmara de pré-mistura da LPP na condição de $S^*= 1,05$ .....	86
Figura 4.3 - Perfis de velocidade à saída da câmara de pré-mistura da LPP na condição de $S^*=1,26$ .....	86
Figura 4.4 – Campo de medições observado de $r/D = 0.00$ a $r/D = -0.5$ (saída da câmara de pré-mistura da LPP).....	87
Figura 4.5 – Distribuição da energia cinética do escoamento em termos volumétricos ao longo da seção de medição na condição de $S^*=0.88$ .....	88
Figura 4.6 – Distribuição da energia cinética do escoamento em termos volumétricos ao longo da seção de medição na condição de $S^*=1.05$ .....	88
Figura 4.7 – Distribuição da energia cinética do escoamento em termos volumétricos ao longo da seção de medição na condição de $S^*=1.26$ .....	89
Figura 4.8 – Pontos analisados à seção de medição (saída da câmara de pré-mistura da LPP).....	90
Figura 4.9 — Sinais de velocidade do escoamento observados no domínio do tempo a $r/D = -0.5$ para a condição de $S^* = 0,88$ . (a) Sinais de Velocidade obtidos nas curvas Verf-a, Verf-b e Verf-c e (b) Função Autocorrelação do Sinal de Velocidade obtido na curva Verf-a...91	91
Figura 4.10 – Sinais de velocidade do escoamento observados no domínio do tempo a $r/D = -0.5$ para a condição de $S^* = 1,05$ . (a) Sinais de Velocidade obtidos nas curvas Verf-a, Verf-b e Verf-c e (b) Função Autocorrelação do Sinal de Velocidade obtido na curva Verf-a...91	91
Figura 4.11 – Sinais de velocidade do escoamento observados no domínio do tempo a $r/D = -0.5$ para a condição de $S^* = 1,26$ . (a) Sinais de Velocidade obtidos nas curvas Verf-a, Verf-b e Verf-c e (b) Função Autocorrelação do Sinal de Velocidade obtido na curva Verf-a...92	92
Figura 4.12 - Sinais de velocidade do escoamento observados no domínio da frequência a $r/D = -0.5$ obtidos nas curvas Verf-a. (a) para a condição de $S^*= 0,88$ ; (b) $S^*= 1,05$ e (c) $S^*= 1,26$ .....	92
Figura 4.13 – Sinais de velocidade do escoamento observados no domínio do tempo a $r/D = -0.125$ para a condição de $S^* = 0,88$ . (a) Sinais de Velocidade obtidos nas curvas Verf-a; Verf-b e Verf-c e (b) Função Autocorrelação do Sinal de Velocidade obtido na curva Verf-a.....	93
Figura 4.14 – Sinais de velocidade do escoamento observados no domínio do tempo a $r/D = -0.125$ para a condição de $S^* = 1,05$ . (a) Sinais de Velocidade obtidos nas curvas Verf-a; Verf-b e Verf-c e (b) Função Autocorrelação do Sinal de Velocidade obtido na curva Verf-a.....	94
Figura 4.15 – Sinais de velocidade do escoamento observados no domínio do tempo a $r/D = -0.125$ para a condição de $S^* = 1,26$ . (a) Sinais de Velocidade obtidos nas curvas Verf-a; Verf-b e Verf-c e (b) Função Autocorrelação do Sinal de Velocidade obtido na curva Verf-a.....	94

Figura 4.16 – Sinais de velocidade do escoamento observados no domínio da frequência a $r/D = -0.125$ obtidos nas curvas Verf-a. (a) para a condição de $S' = 0,88$ ; (b) $S' = 1,05$ e (c) $S' = 1,26$ .....	95
Figura 4.17 – Sinais de velocidade do escoamento observados no domínio do tempo a $r/D = 0$ para a condição de $S' = 0,88$ . (a) Sinais de Velocidade obtidos nas curvas Verf-a Verf-b e Verf-c e (b) Função Autocorrelação do Sinal de Velocidade obtido na curva Verf-a.....	96
Figura 4.18 – Sinais de velocidade do escoamento observados no domínio do tempo a $r/D = 0$ para a condição de $S' = 1,05$ . (a) Sinais de Velocidade obtidos nas curvas Verf-a, Verf-b e Verf-c e (b) Função Autocorrelação do Sinal de Velocidade obtido na curva Verf-a.....	96
Figura 4.19 – Sinais de velocidade do escoamento observados no domínio do tempo a $r/D = 0$ para a condição de $S' = 1,26$ . (a) Sinais de Velocidade obtidos nas curvas Verf-a, Verf-b e Verf-c e (b) Função Autocorrelação do Sinal de Velocidade obtido na curva Verf-a.....	97
Figura 4.20 – Sinais de velocidade do escoamento observados no domínio da frequência a $r/D = 0$ obtidos nas curvas Verf-a. (a) para a condição de $S' = 0,88$ ; (b) $S' = 1,05$ e (c) $S' = 1,26$ .....	97
Figura 4.21 – Visualização transversal da base do escoamento rotacional à saída da câmara de pré-mistura do combustor LPP para a condição de $S' = 0.88$ . (a) decomposição horizontal do campo de velocidades e (b) decomposição vertical do campo de velocidades. ....	99
Figura 4.22 – Visualização transversal da base do escoamento rotacional à saída da câmara de pré-mistura do combustor LPP para a condição de $S' = 1.05$ . (a) decomposição horizontal do campo de velocidades e (b) decomposição vertical do campo de velocidades.....	99
Figura 4.23 - Visualização transversal da base do escoamento rotacional à saída da câmara de pré-mistura do combustor LPP para a condição de $S' = 1.26$ . (a) decomposição horizontal do campo de velocidades e (b) decomposição vertical do campo de velocidades. ....	100
Figura 4.24 - Evolução das frequências dos harmônicos dominantes aos pontos $r/D = -0.125$ e $r/D = 0.0$ em função de $S'$ , normalizadas pelo número de Strouhal- $Sh$ e obtidas à base do escoamento.....	101

## Lista de símbolos, Nomenclaturas e Abreviações

$u$	Direção de desenvolvimento axial do escoamento
$v$	Direção de desenvolvimento tangencial (ou rotativo) do escoamento
$G_{\varphi}$	Quantidade de movimento angular do escoamento
$G_x$	Quantidade de movimento linear do escoamento
P	Perfil de Pressão longitudinal ao longo do combustor de baixo NOx
ATC	Anemometria a Temperatura Constante
<i>Bbl</i>	Barril
CM	Concentração Média
CMAA	Concentração Média Aritmética Anual
CMGA	Concentração Média Geométrica Anual
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
EGR	Exhaust Gás Ratio
<i>hab</i>	Habitantes
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LÊS	Large Eddy Simulation
LPP	Lean Premixed Prevaporized
M	Mega
NOS	Operador Nacional do Sistema
NOx	Óxidos nitrogenados
PDE 2019	Plano Decenal de Expansão da Energia 2019
PIB	Produto Interno Bruto
PIV	Particle Image Velocity
PRONAR	Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar
PVC	Precessing Vortex Core
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
RCS	Redução Catalítica Seletiva
S	Número de <i>swirl</i>
S'	Número de <i>swirl</i> alternativo (geométrico)
SEMA	Secretaria de Estado do Meio Ambiente
SIN	Sistema Interligado Nacional
$S_w(x)$	Configuração experimental relacionado ao número de <i>swirl</i> de

	metodologia adotada pelo autor
$S_{w2}$	Ângulos de entrada secundário do escoamento
$S_{w3}$	Ângulos de entrada terciário do escoamento
$T$	Tera
Tep	Tonelada equivalente de petróleo
VP	Vórtice primário
VSE	Vórtice secundário externo
VSI	Vórtice secundário interno
$W$	Watt
ZCR	Zona central de recirculação
Ppm	Parte por milhão
$\phi$	Razão de equivalência
$A$	Ângulo de ataque das pás do <i>swirler</i> em relação ao seu eixo longitudinal
p	Pressão estática através do <i>swirler</i>
$r1$	Limite superior do volume de controle considerado para a seção anular do <i>swirler</i>
$r2$	Limite inferior do volume de controle considerado para a seção anular do <i>swirler</i>
$\rho$	Densidade do fluido considerada para o cálculo do número de <i>swirl</i>
$G'_x$	Quantidade de movimento linear do escoamento com a integral da pressão estática omitida
Sh	Número de Strouhal
$t$	Variável representativa para o tempo
CCD	<i>Charge Coupled Device</i>
$g_i$	Relação de tamanho entre o objeto e a imagem
p(t)	Posição inicial da partícula no plano de luz laser
P(t)	Posição final da partícula no plano de luz laser
$d_i$	Tamanho da imagem
$d_0$	Tamanho do objeto (partícula)
$z_i$	Distância entre o objeto e a imagem.
$\bar{u}$	Velocidade da partícula refletora no escoamento
LDA	Anemometria a laser Doppler

AI	Área de interrogação
$\Delta x$	Varição do deslocamento da partícula na direção x
$\Delta y$	Varição do deslocamento da partícula na direção y
$v_y$	Componente de velocidade da partícula no plano iluminado na direção y
$v_x$	Componente de velocidade da partícula no plano iluminado na direção x
$f(n,m)$	Função área de interrogação da primeira imagem
$g(n,m)$	Função área de interrogação da segunda imagem
$s(n,m)$	Função deslocamento espacial
$s'(m,n)$	Função deslocamento espacial estimada por meio da aplicação de uma correlação cruzada
$d(n,m)$	Função ruído
FFT	Transformada rápida de Fourier
$F(u,v)$	Função área de interrogação da primeira imagem no domínio da frequência
$G(u,v)$	Função área de interrogação da segunda imagem no domínio da frequência
$\phi_{fg}(u,v)$	Função no domínio da frequência para o cálculo da correlação cruzada
$\phi_{fg}(m,n)$	função da correlação cruzada e cálculo de deslocamento no domínio do tempo
$V_{sp}$	Velocidade de sedimentação da partícula
$g$	Aceleração da gravidade
$d_p$	Diâmetro da partícula
$\rho_p$	Massa específica da partícula
$d_f$	Massa específica do fluido
$\mu$	Viscosidade dinâmica do fluido
VRP	Velocimetria por Rastreamento de Partículas
Ladj	Indutor ajustável do anemômetro a fio quente
Radj	Resistor ajustável do anemômetro a fio quente
$R_s$	Resistividade do fio sensor à temperatura ambiente;
$R_0$	Resistividade do fio sensor à temperatura de referência

$\alpha_r$	Coefficiente térmico de resistividade
$T_a$	Temperatura ambiente
$T_{ref}$	Temperatura de referência
$e_0$	Fonte de tensão contínua do anemômetro
$u_0$	Velocidade do escoamento à saída do bocal
$\gamma$	Coefficiente isentrópico
$R$	Constante universal dos gases
$T_0$	Temperatura à saída do bocal
$P_0$	Pressão à saída do bocal
$P_1$	Pressão à base do bocal
$\beta$	Ângulo de giro da sonda anemométrica
$r$	Raio do bocal de saída da câmara de pré-mistura
$E(w)$	Função densidade espectral
$\delta$	Intensidade de Turbulência
$R(\tau)$	Função autocorrelação do sinal de velocidade do escoamento
$\tau$	Incremento de tempo
$Verf$	Velocidade efetiva de resfriamento dos fios sensores
$Verf-a$	Velocidade efetiva de resfriamento de maior contribuição ao processo de troca de calor entre os fios e o escoamento rotativo
$Verf-b$	Velocidade efetiva de resfriamento de segunda maior contribuição ao processo de troca de calor entre os fios e o escoamento rotativo
$Verf-c$	Velocidade efetiva de resfriamento de menor contribuição ao processo de troca de calor entre os fios e o escoamento rotativo

# **1 - INTRODUÇÃO**

## **1.1 - PANORAMA ENERGÉTICO NACIONAL**

Em 2009 o total de energia consumida no Brasil atingiu o montante de 243,9 milhões de toneladas equivalentes de petróleo - Mtep, significando a redução de 3,4% em relação ao ano de 2008, por decorrência, principalmente, da crise econômica registrada neste período (ver Tabela 1.1). Entre os setores consumidores, a indústria foi a principal responsável pela retração na demanda de energia no país, somando 76,8 Mtep ao longo de todo o ano de 2009, o que representa uma queda de 6,7%. Os segmentos industriais nos quais se verificou a maior queda no consumo de energia foram o siderúrgico (inclusive ferroligas), a mineração e a pelotização, levando a uma redução no consumo do gás natural, do carvão e dos derivados do petróleo. Este estado resultou em um decréscimo significativo na geração de energia termoeletrica, especialmente por meio do uso do gás natural e do carvão.

Apesar da redução no consumo de energia no País, houve um importante crescimento na oferta e no uso da energia hidráulica (5,2%), refletindo as condições hidrológicas favoráveis ocorrentes no período (ver Tabela 1.2). Consumiram-se, também, mais derivados da cana-de-açúcar (2,8%), cuja expansão está ligada ao uso do bagaço na autopromoção de eletricidade e à intensificação do uso do etanol em uma frota onde a presença de motores flex fuel cresceu muito entre os veículos leves. Outros segmentos, notadamente aqueles relacionados ao mercado doméstico, também se mostraram resistentes aos impactos da crise. O consumo de energia das famílias cresceu em média 1,7%, e nos setores de comércio e público o crescimento foi de 2,3%. No segmento dos transportes, também se consumiu mais energia, ainda que a variação tenha sido relativamente pequena (0,4%) (ver Tabela 1.1).

Tabela 1.1 – Síntese dos Resultados do BEN-2010 (PDE 2010).

<b>Principais Parâmetros</b>	<b>Unidade</b>	<b>2009</b>	<b>2008</b>	<b>Δ%</b>
Produção de Petróleo (1)	$10^3 \text{ bbl} / \text{dia}$	2.029,0	1.903,8	6,6
Produção de Gás Natural	$10^6 \text{ m}^3 / \text{dia}$	57,9	59,2	-2,1
Geração de Energia Elétrica	<i>TWh</i>	466,2	463,1	0,7
Consumo de Combustíveis Líquidos	$10^6 \text{ l} / \text{dia}$	298,1	290,3	2,7
Consumo de Energia Elétrica	<i>TWh</i>	426,0	428,3	-0,5
Consumo Residencial de Energia Elétrica	<i>TWh</i>	100,6	95,6	5,3
Consumo Industrial de Energia Elétrica	<i>TWh</i>	186,7	197,2	-5,3
Oferta Interna de Energia	$10^6 \text{ tep}$	243,9	252,6	-3,4
Oferta Interna de Energia Elétrica (2)	<i>TWh</i>	509,5	506,5	0,6
População (3)	$10^6 \text{ hab}$	191,4	189,6	1,0
PIB (4)	$10^9 \text{ US\$}$	1.573,4	1.576,3	-0,2

(1) bbl = barril; inclui líquidos de gás natural

(2) inclui autoprodução

(3) Estimativa do IBGE para a população residente em primeiro de julho de cada ano

(4) PIB divulgado pelo IBGE convertido para US\$ pela taxa de câmbio média de 2009 (Banco Central: 1,00 = R\$ 1,9976)

O cenário da oferta de energéticos formatado pela crise econômica nacional, registrada no período de 2008 e 2009, reflete o estado de tendências da participação das fontes de geração de energia elétrica para os próximos dez anos, conforme observado no Plano Decenal de Expansão da Energia 2019, o PDE 2019, em que a geração por meio das fontes renováveis, sobretudo a hidroelétrica, será dominante.

Apesar das previsões apresentadas pelo PDE 2019, a oferta de energia elétrica via geração térmica está garantida no Sistema Interligado Nacional – SIN, segundo o Operador Nacional do Sistema – ONS, em função da necessidade da complementaridade térmica à matriz energética brasileira. Esta necessidade advém das reais características sazonais dos sistemas hidroelétricos brasileiros e do contínuo crescimento econômico nacional, que demandará uma geração de energia elétrica diretamente proporcional.

Tabela 1.2 – Oferta Interna de Energia (BEN 2010).

	<b>2009</b>	<b>2008</b>
<b>Energia não Renovável</b>	<b>52,7%</b>	<b>54,1%</b>
Petróleo e Derivados	37,8%	36,6%
Gás Natural	8,7%	10,3%
Carvão Mineral e Derivados	4,8%	5,8%
Urânio ( $U_3O_8$ ) e Derivados	1,4%	1,5%
<b>Energia Renovável</b>	<b>47,3%</b>	<b>45,9%</b>
Produtos da Cana-de-açúcar	18,1%	17,0%
Energia Hidráulica e Eletricidade	15,3%	14,0%
Lenha e Carvão Vegetal	10,1%	11,6%
Outras Renováveis	3,8%	3,4%

### 1.1.1 - Complementaridade térmica

Segundo o PDE 2019 a atividade econômica brasileira crescerá em média 5,1 % ao ano (ver Figura 1.1), no período de 2010 a 2019, projetando um crescimento da demanda anual de energia elétrica de 5,1% no mesmo período. Em vista a este cenário, torna-se necessário agregar o equivalente a, aproximadamente, 6.300 *MW* de nova capacidade ao ano, demandando um aporte de investimentos no setor energético brasileiro de R\$ 951 bilhões, entre projetos nas áreas de energia elétrica, petróleo, gás natural e biocombustíveis. Ainda segundo o PDE 2019, 80% do parque gerador de energia elétrica serão constituídos de fontes renováveis e a hidroeletricidade será o principal meio de geração de energia elétrica (ver Figura 1.2), enquanto que, em termos de capacidade instalada, os 20% restantes serão divididos em origem termoelétrica e termonuclear.

“A hidroeletricidade, além de renovável, é pouco poluente, ainda passível de boa inserção ambiental, embora exija um crescente dispêndio, e de reduzido custo operacional, sendo um fator importante de competitividade da produção nacional no mercado internacional. De fato, a continuidade da vocação hidroelétrica nacional é inegável, e deverá ser majoritária ainda por umas duas ou três décadas, o que, aliás, é reafirmado no Novo Modelo do Setor Elétrico” (SANTOS, 2005). Contudo, segundo o ONS, determinar a capacidade efetiva de oferta hidroelétrica no médio e longo prazo é um grande desafio devido a sua volatilidade característica, pois o adequado equilíbrio, oferta versus demanda de energia elétrica ao longo do tempo, sempre dependerá do comportamento hidrológico

das afluições aos grandes reservatórios de regularização do SIN. Ou seja, o adequado equilíbrio depende de quanto, quando e onde chove.

A Figura 1.3 apresenta o mapa onde são mostradas as áreas geográficas em que se localizam os grandes reservatórios de acumulação hídrica no País. Neste mapa observa-se a característica variabilidade da oferta hidroelétrica no território nacional, com destaque à região denominada de Quadrilátero dos Reservatórios, cuja capacidade total de armazenamento é de 70%, o que representa o maior setor de acumulação nacional.

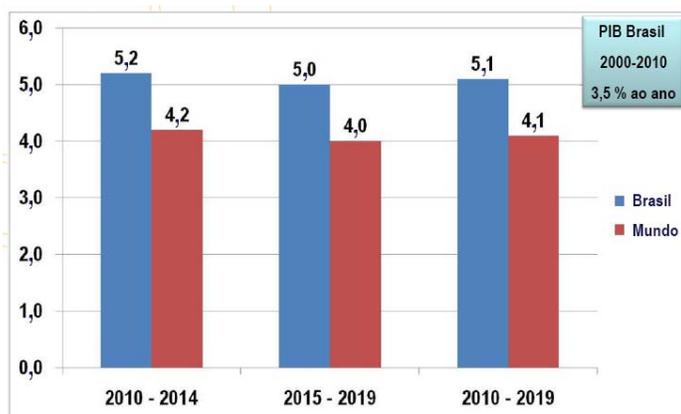


Figura 1.1 – Cenário de Crescimento Econômico – Produto Interno Bruto PIB - % ao ano (adaptado do PDE 2019).

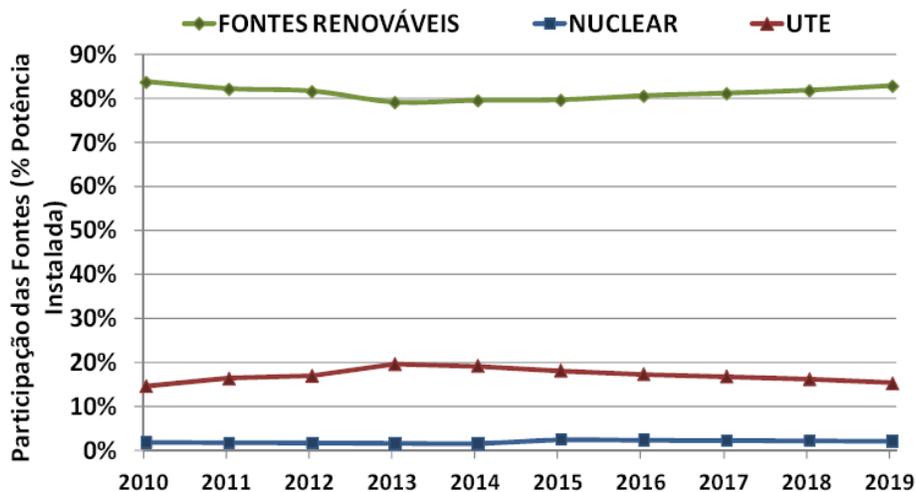


Figura 1.2 – Evolução do Fator de Participação das Fontes de Geração (adaptado do PDE 2019).

Esta variabilidade da oferta hidroelétrica se manifesta em cada bacia hidrográfica, seja no longo prazo, com períodos plurianuais de seca ou, seja no curto prazo, com alguns meses com hidrologias particularmente desfavoráveis. Por exemplo, no subsistema Nordeste, representado, essencialmente, pela bacia do rio São Francisco, observa-se uma variabilidade da oferta hidroelétrica característica (ver Figura 1.4). No quadrimestre correspondente de janeiro a abril se verifica mais de 50% das vazões anuais (chuvas), enquanto que o período de maio a novembro é caracterizado pela menor média das vazões anuais. Contudo, este padrão médio sofre variações ao longo dos anos, com períodos chuvosos sendo adiantados ou atrasados em relação ao cenário apresentado, o que caracteriza o comportamento volátil do quadro hidrológico da região. Esta característica também é observada nos demais subsistemas brasileiros.

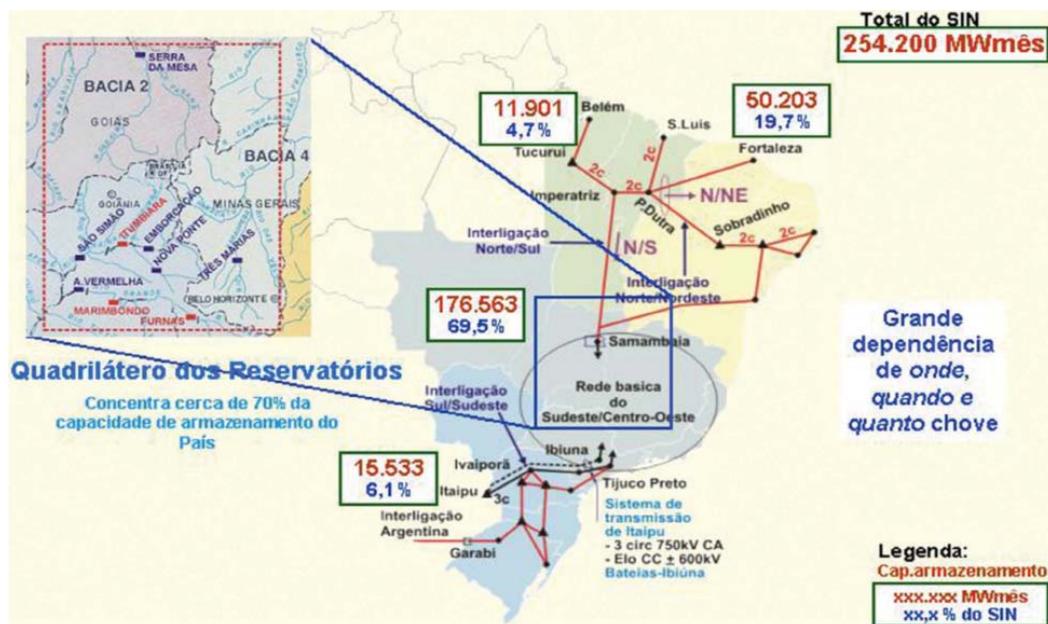


Figura 1.3 – Dependência da Espacialidade das Chuvas (adaptado de SANTOS, 2005).

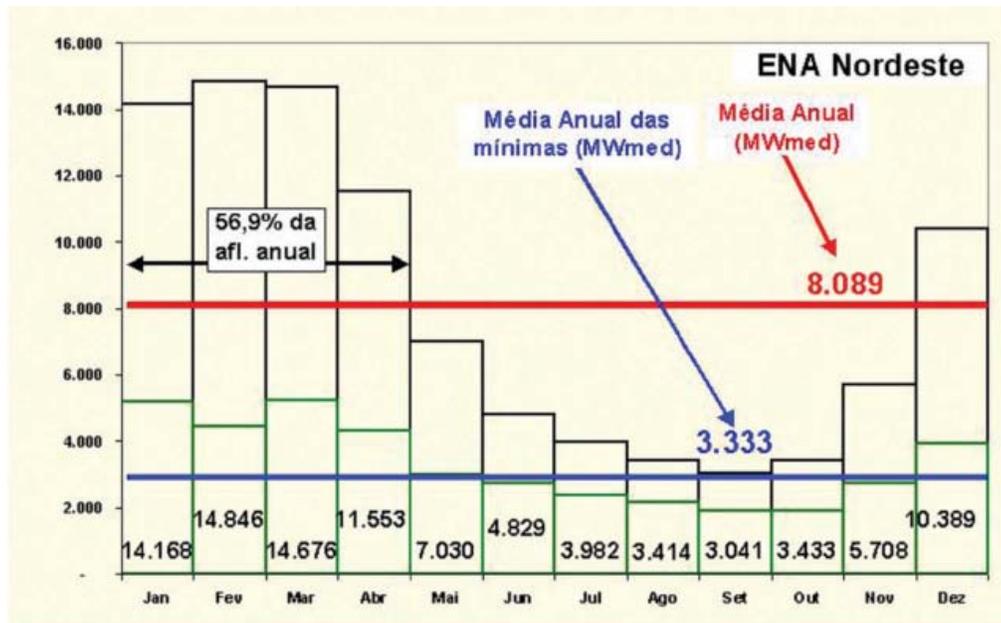


Figura 1.4 – Sazonalidade das Vazões na Região Nordeste (adaptado de SANTOS, 2005).

A característica probabilística da variabilidade da oferta hidroelétrica nacional levou o Setor Elétrico Brasileiro a utilizar modelos estocásticos nos estudos de simulação do comportamento sazonal dos sistemas hidrológicos, tanto no planejamento da expansão, quanto no da operação do SIN. Estes estudos de simulação são realizados anualmente e já utilizam mais de 2.000 séries sintéticas de vazões geradas a partir das séries dos 78 anos de registros históricos. Desta forma, possibilitou-se gerar um banco de dados confiável para o planejamento da expansão energética nacional num horizonte temporal satisfatório.

Com base nas características sazonais hidrológicas citadas, observou-se no estudo do planejamento da expansão energética a necessidade de se considerar todos os recursos hidro e térmico disponíveis, para que o déficit de oferta de energia elétrica não ultrapassasse o patamar máximo de 5%. Ou seja, por meio do uso combinado dos recursos hidro e térmico a oferta atenderia à demanda de energia elétrica em um horizonte determinado, pelo menos em 95% do tempo. O patamar de 5% de déficit corresponde ao critério de risco de abastecimento energético aceitável à demanda nacional, tal como definido pelo ONS.

Portanto, levando em consideração o patamar de 5% de déficit como o critério de risco estabelecido, a complementaridade térmica no sistema energético nacional fica assegurada, visando compensar a variabilidade da oferta das hidroelétricas, de forma a garantir a segurança do fornecimento da energia elétrica em todas as áreas do país, desde

centros urbanos às áreas de eventual deficiência da rede de transmissão que as conecte ao SIN.

Para que a integração hídrica e térmica seja eficiente tornam-se necessários trabalhar os critérios técnicos e gerenciais do segmento energético. Do ponto de vista técnico, o Operador Nacional do Sistema Elétrico e o Sistema Petrobrás estão estritamente interligados, com o objetivo de buscar soluções para o sistema energético do País. Cabe ao ONS assegurar os ganhos sinérgicos da otimização e a conseqüente operação a menor custo, de forma compatível com os critérios de segurança, levando em conta as restrições de uso múltiplo da água. E cabe à Petrobras, e as suas subsidiárias, a questão logística para o fornecimento de combustíveis não só para as usinas térmicas dos sistemas interligados, como para os sistemas isolados da Amazônia. Do ponto de vista gerencial serão criados mecanismos que incentivem, tanto no lado da oferta, como no lado da demanda, a exploração complementar e eficiente do uso da eletricidade e do gás natural, aproveitando, sobretudo, os preços sazonais competitivos.

Esta exploração abriria forte possibilidade de o ONS e o Sistema Petrobras implementarem novas políticas operacionais para o uso otimizado do gás natural e da eletricidade, com benefícios a sociedade brasileira. “Isto tudo, associado à diversificação da matriz energética e à conservação de energia, deverá prover uma oferta segura de energia, o que será o indispensável indutor e catalisador do desenvolvimento sustentado do País” (SANTOS, 2005). Portanto, todas estas ações garantem a sobrevivência do sistema complementar de energia térmica ao SIN ao longo prazo.

## **1.2 - CONTROLE DE EMISSÕES POLUENTES**

Tal como discutido, o Brasil possui uma tendência nítida de crescimento econômico que demandará uma maior disponibilidade de energia elétrica. Para se garantir esta oferta de energia observou-se a necessidade de um maior parque energético com a participação garantida da geração térmica no sistema nacional de energia. Em decorrência deste quadro tem de se considerar os reflexos negativos das atividades de geração via usinas térmicas, sem deixar de lado os reflexos do crescimento acelerado da atividade industrial e da frota de veículos automotores sobre a sociedade, à economia e ao meio ambiente. Com base nas

perspectivas de continuidade destas condições, torna-se imprescindível estabelecer estratégias para o controle, preservação e recuperação da qualidade do ar.

Neste sentido, o Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, órgão incumbido de assistir a Presidência da República na formulação das diretrizes da Política Nacional do Meio Ambiente, estabelece: “mediante a preposta da Secretaria de Estado do Meio Ambiente - SEMA, normas e critérios para o licenciamento de atividades efetiva ou potencialmente poluidoras, a ser concedido pelos Estados e supervisionado pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente - SEMA” (Lei 6.938, 2001). Dentre estas normas e critérios, destacam-se, no contexto da geração de energia elétrica via térmicas, as Resoluções Nº 005, de 15 de junho de 1989, Nº 003 de 28 de junho de 1990 e a Resolução Nº 008 de 06 de dezembro de 1990.

A Resolução Nº 005, de 15 de junho de 1989, institui o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar – PRONAR, “como um dos instrumentos básicos da gestão ambiental para a proteção da saúde e bem-estar das populações e melhoria da qualidade de vida, com o objetivo de permitir o desenvolvimento econômico e social do País, de forma ambientalmente segura, pela limitação dos níveis de emissões de poluentes por fontes de poluição atmosférica, com vistas a: uma melhoria da qualidade do ar, o atendimento aos padrões estabelecidos e, o não comprometimento da qualidade do ar em áreas consideradas não degradadas”.

A Resolução Nº 003, de 28 de junho de 1989, estabelece os padrões de qualidade do ar. Estes padrões são classificados em primários, que correspondem às concentrações de poluentes que, se ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população, e em secundários, que correspondem às concentrações de poluentes abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem-estar da população, assim como o mínimo dano à fauna, à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral. Os padrões de qualidade do ar são o objetivo a ser atingido mediante a estratégia de controle fixada pelos padrões de emissão e tem o papel de orientar a elaboração de Planos Regionais de Controle de Poluição de Ar. Estes padrões ficam estabelecidos conforme observado na Tabela 1.3.

Tabela 1.3 – Padrões Nacionais de Qualidade do Ar (Resolução CONAMA Nº 003 de 28 de junho de 1990).

<b>Poluentes</b>	<b>Tempo de Amostragem</b>	<b>Padrão Primário [mg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Padrão Secundário [mg/m<sup>3</sup>]</b>
Partículas Totais em Suspensão	[CMGA]	80	60
	[CM-24h]	24	150
Fumaça	[CMAA]	60	40
	[CM-24h]	150	100
Partículas Inaláveis	[CMAA]	50	50
	[CM-24h]	150	150
Dióxido de Enxofre	[CMAA]	80	40
	[CM-24h]	365	100
Monóxido de Carbono	[CM-8h]	10.000	10.000
	[CM-1h]	40.000	40.000
Ozônio	[CM-1h]	160	160
Dióxido de Nitrogênio	[CMAA]	100	100
	[CM-1h]	320	190

CMGA – Concentração Média Geométrica Anual; CMAA – Concentração Média Aritmética Anual; CM – Concentração Média

A Resolução Nº 008, de 06 de dezembro de 1990, estabelece os limites máximos de emissão de poluentes do ar (padrões de emissão) para processos de combustão externa em novas fontes fixas de poluição com potências nominais totais de até 70 MW e superiores. Os limites máximos de emissão estão apresentados na tabela anterior e, para os efeitos desta resolução, são consideradas fontes novas de poluição aquelas pertencentes à empreendimentos cuja licença prévia vier a ser solicitada aos órgãos licenciadores competentes após a sua publicação. Para estas fontes novas, os limites máximos de emissão são mais rigorosos.

### **1.3 - COMBUSTOR DE BAIXAS EMISSÕES – TECNOLOGIA LPP**

A obrigação do cumprimento dos limites legais de emissões poluentes e a necessidade de se garantir a complementaridade térmica ao sistema energético primário demandam o uso de tecnologias com um processo de combustão mais eficiente, que

proporcione a diminuição drástica dos efeitos danosos causados pelos produtos deste processo ao meio ambiente e ao homem.

Dentre as espécies químicas resultantes dos processos de queima, o óxido de nitrogênio e o dióxido de nitrogênio, ou os correspondentes óxidos nitrogenados (NO<sub>x</sub>), destacam-se em função da sua importância à saúde pública. Os óxidos nitrogenados são considerados um grande problema ambiental por contribuírem com a formação do ozônio troposférico (O<sub>3</sub>) e da chuva ácida (EPA, 1986). O ozônio é formado a partir de transformações fotoquímicas do NO<sub>x</sub> na presença de raios ultravioletas e a chuva ácida resulta da combinação de óxidos de nitrogênio e enxofre com a água para formar os componentes HNO<sub>3</sub> e o H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Dentro das células humanas o NO<sub>x</sub> pode formar íons com a combinação do oxigênio da hemoglobina, fazendo com que ela perca a capacidade de ligar-se reversivelmente ao O<sub>2</sub>. Este fenômeno é chamado de formação de metaemoglobina que, em uma proporção de 60 a 80%, é letal (MARTINS, 1998).

Devido aos efeitos nocivos dos óxidos nitrogenados, foram identificados os processos físico-químicos de geração do NO<sub>x</sub> e os principais fatores para a sua formação, permitindo, desta forma, estabelecer as tecnologias necessárias ao seu controle (CRUZ, 2006).

Nos processos de combustão os óxidos de nitrogênio se formam a partir do nitrogênio presente no ar e a partir do nitrogênio presente no combustível. No processo de combustão em turbinas a gás, por exemplo, a maior parte dos combustíveis usados tem uma quantidade insignificante de nitrogênio em sua composição e uma parte significativa de enxofre ( $\leq 0.3\%$ ), de forma que só o NO<sub>x</sub> resultante da combinação com o nitrogênio do ar (denominado de NO<sub>x</sub> Térmico), é o mais relevante (GUPTA, 1997). Portanto, o processo de formação do NO<sub>x</sub> é um dos mecanismos de maior interesse no contexto das novas tecnologias para o controle da combustão em turbinas a gás.

A contribuição do NO<sub>x</sub> Térmico nos índices de emissões é pequena para temperaturas de reação inferiores a 1200 °C, e significativa em temperaturas de reação acima de 1400 °C, tendo em seu processo de formação uma dependência exponencial da temperatura de reação e uma dependência linear do tempo de residência (GUPTA, 1997), o que torna o pico de temperatura de chama uma referência primária como o guia para o nível de produção do NO<sub>x</sub> Térmico (ANDRAUS, 2003).

No contexto da geração de energia elétrica por meio de turbinas a gás estão disponíveis algumas soluções tecnológicas para o controle de emissões do NO<sub>x</sub> Térmico que utilizam o pico de temperatura da chama como referência à tecnologia. São elas: a

adição de diluentes (água - vapor ou líquida atomizada - e recirculação de gases do exaustor), o método de Redução Catalítica Seletiva – RCS, e as alterações de projetos de combustores ao conceito *Lean Premixed Prevaporized* - LPP (CALDEIRA-PIRES, 2003), também conhecido como o combustor de baixo NOx. Dentre as tecnologias citadas o conceito de turbinas LPP faz parte do foco de desenvolvimento deste trabalho.

A tecnologia LPP utiliza uma pré-mistura pobre dos reagentes e a dinâmica do escoamento com elevada rotação para sustentar um processo de queima de alta eficiência. Este escoamento, obtido por meio de um dispositivo gerador de vórtices, denominado *swirler* (ver Figura 1.5), possui uma importante função tanto na fase de pré-mistura dos reagentes (formação de uma mistura uniforme e homogênea), quanto no processo de sustentação da chama. O princípio de sustentação, ou ancoramento da chama, decorre de uma expansão abrupta, ou colapso, da base do escoamento rotativo à entrada do combustor (ver Figura 1.5), provocada pela ação centrífuga sobre a estrutura deste escoamento. Forma-se, então, um vórtice, também conhecido na literatura como o vórtice colapsado, cuja região à linha de centro apresenta uma zona de recirculação capaz de trazer os gases quentes, resultantes da combustão, de encontro à mistura reativa (ANACLETO et al., 2003). Este processo desencadeia a ignição da mistura e torna contínua a queima no combustor (ver Figura 1.6).

A dinâmica deste escoamento permite que o processo combustão ocorra até mesmo aos limites da flamabilidade, ocasionando a queda do pico de temperatura da chama por excesso de diluentes e, conseqüentemente, minimizando as emissões dos óxidos nitrogenados. Quando este escoamento é capaz de proporcionar as condições ideais ao funcionamento do combustor LPP ele é caracterizado como regular.

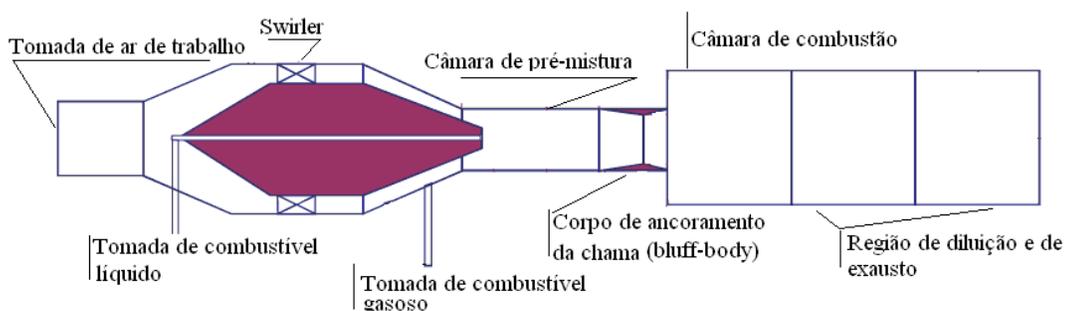


Figura 1.5 – Concepção de um modelo de turbina LPP (adaptado de ANACLETO et al., 2003).

A zona de recirculação desempenha um importante papel no processo de sustentação da chama, contudo, ela está associada às pulsações advindas do núcleo do vórtice, conhecido na literatura como o PVC (Precessing Vortex Core). O PVC é caracterizado pela sua dinâmica precessional, que é a fonte de um tipo de instabilidade hidrodinâmica que se dissipa por todo o escoamento, gerando pulsações de pressão e de velocidade de grandes amplitudes, que podem ser amplificadas e acopladas com os modos acústicos naturais do combustor, causando fatores indesejáveis como ruídos e vibrações (ANACLETO et al., 2003). Além disto, as instabilidades podem afetar o funcionamento de uma turbina, provocando a autoignição, o retorno da chama (“flashback”) e a dificuldade de partida do processo de combustão, por exemplo. Por outro lado a dinâmica do escoamento rotativo pode ajudar a reduzir as emissões de NO<sub>x</sub> e o consumo de combustível por meio do aumento das grandes escalas de turbulência.

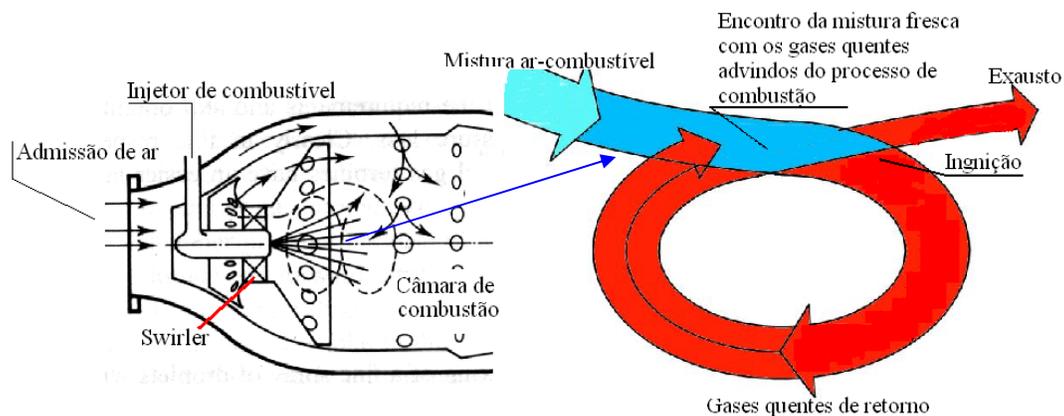


Figura 1.6 – Esquema de um Processo de Ancoramento da Chama pela Dinâmica do Escoamento Rotativo. (adaptado de SILVA, 2003).

As instabilidades hidrodinâmicas provocadas pelo escoamento rotativo não estão presentes apenas em processos de combustão das turbinas a gás. Dependendo das condições de operação estas instabilidades podem ocorrer em demais sistemas que possuem o escoamento rotativo como fluido de trabalho ou como o produto de um determinado processo, tais como os vórtices formados à saída de uma turbina hidroelétrica (SUSAN-RESIGA et al., 2006).

## 1.4 - OBJETIVOS DO TRABALHO

A natureza estrutural e as instabilidades hidrodinâmicas presentes no escoamento aplicado à tecnologia de turbinas LPP compõem o objeto de motivação deste trabalho, pois o característico escoamento trás importantes informações para o desenvolvimento de projetos de combustores mais confiáveis e eficientes, do ponto de vista energético, ambiental e estrutural.

Isto posto, o trabalho tem como objetivo: caracterizar experimentalmente o escoamento isotérmico com elevada rotação, considerado regular à aplicação em um combustor de tecnologia LPP, para analisar a funcionalidade do sistema experimental responsável pela geração do escoamento reativo do combustor em questão.

O sistema experimental, ou sistema gerador de fluxo (ver Figura 1.7), é formado por um *swirler* axial e pela câmara de pré-mistura de um combustor LPP, ambos instalados no laboratório de combustão do Departamento de Engenharia Mecânica - ENM da Universidade de Brasília – UnB. O sistema foi construído para fornecer o escoamento rotativo reativo capaz de sustentar um processo de queima de alta intensidade que resulte em baixas emissões de NO<sub>x</sub>, CO e CO<sub>2</sub>, com o uso da tecnologia LPP. Por isto, torna-se necessário verificar a sua funcionalidade para garantir que as experimentações realizadas com o combustor mencionado sejam confiáveis.

A caracterização do escoamento tem o objetivo de identificar o vórtice colapsado regular à saída da câmara de pré-mistura. Este processo é realizado por meio de uma análise do campo de velocidades da base do escoamento e por meio da detecção do PVC e da condição de regularidade do vórtice. Identificados o característico campo de velocidades, o PVC e a condição de regularidade, pode-se afirmar que o sistema gerador de fluxo é capaz de compor a bancada de testes do combustor de baixo NO<sub>x</sub>, por disponibilizar o escoamento reativo com as qualidades necessárias para as experimentações com a tecnologia LPP.

Para tanto, as medições ocorrerão em um ambiente não confinado à saída da câmara de pré-mistura do combustor LPP, conforme apresentado na Figura 1.8. Os dados medidos serão processados e, então, analisados com base nos resultados observados na literatura. Neste trabalho serão utilizadas duas técnicas de medição do escoamento: anemometria a temperatura constante – ATC e velocimetria por imagem de partículas (PIV – *particle image velocity*), por serem técnicas já consolidadas em estudos de dinâmica dos fluidos.



Figura 1.7 – Sistema Experimental; *Swirler* axial + Câmara de Pré-mistura do Combustor LPP.

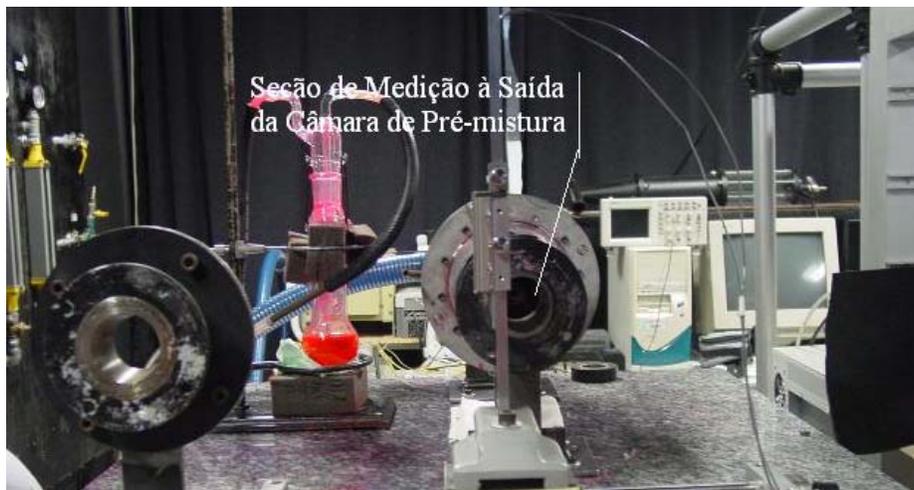


Figura 1.8 – Seção de Medição do Escoamento – Saída da Câmara de Pré-mistura do Combustor LPP.

## 1.5 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em mais quatro capítulos que decorrem da seguinte forma: o capítulo 2 descreve o estado da arte sobre as características do escoamento rotativo aplicado aos combustores de baixa emissão de NO<sub>x</sub>. O capítulo é iniciado com uma caracterização geral da estrutura do escoamento rotativo por meio de exemplos do seu desenvolvimento em dispositivos presentes nas atividades industriais e em conversores de energia, como os motores de ciclo Otto e Diesel. Em seguida são apresentados a estrutura e a dinâmica deste escoamento aplicado especialmente aos combustores de baixa emissão de NO<sub>x</sub> e, posteriormente serão apresentadas as equações estatísticas utilizadas para caracterizar este escoamento. A parte final do capítulo apresenta o desenvolvimento matemático do fator utilizado para quantificar a intensidade de rotação do escoamento ( número de *swirl*).

No capítulo 3 são apresentados os sistemas e procedimentos experimentais adotados no trabalho. O capítulo se desenvolve com a apresentação do sistema experimental e com as definições das técnicas de medições e da metodologia experimental utilizada.

O capítulo 4 apresenta a caracterização do escoamento rotativo por meio do seu campo de velocidades, por meio do sinal de velocidade (observado nos domínios do tempo e da frequência), e por meio da visualização do núcleo do vórtice (PVC). Ao longo deste capítulo serão discutidos e analisados os resultados, as técnicas de medição e as metodologias empregadas no trabalho, tomando como base os estudos apresentados na revisão bibliográfica. O capítulo é finalizado com uma resposta aos objetivos do trabalho.

No capítulo 5 é apresentado um discurso geral sobre o trabalho e as perspectivas futuras de continuidade desta pesquisa.

## **2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 - VISÃO GERAL DOS ESCOAMENTOS ROTACIONAIS COM ELEVADA ROTAÇÃO**

Os escoamentos com elevada rotação estão presentes tanto na natureza, como fenômenos aleatórios, quanto em sistemas mecânicos como fluidos de trabalho, responsáveis pelo desempenho e características dos resíduos produzidos nestes sistemas. Como fluido de trabalho, os escoamentos rotacionais são os principais vetores de atuação em inúmeras aplicações na indústria, na propulsão aérea e naval e em estações para a geração de energia elétrica, por exemplo, o que os torna um importante objeto de estudo na engenharia. Neste contexto, para efeito de caracterização geral, serão apresentadas a seguir a estrutura e a dinâmica do escoamento rotativo como fluido de trabalho, levando-se em consideração a sua atuação e influência na produção das emissões poluentes de determinados dispositivos.

Os processos isotérmicos de separação de particulados constituem uma importante etapa no beneficiamento de variados insumos industriais. Dentre os equipamentos aplicados a tal etapa os tubos de vórtice e os ciclones separadores são amplamente utilizados por apresentarem um excelente desempenho em seus processos, boa capacidade de trabalho e independência da temperatura ambiente. Um tubo de vórtice é operacionalizado com base no conceito de efeito centrífugo do escoamento, o que torna possível separar, por exemplo, o material particulado de gases resultantes de um processo de combustão com uma eficiência de aproximadamente 80% (RIU et al., 2002). No caso de um separador de partículas do tipo ciclone a força centrífuga produzida pelo escoamento rotativo é capaz de separar, também com elevada eficiência, as substâncias com o mesmo peso específico, mas de diferentes tamanhos.

No trabalho de Matsuzaki et al. (2007), são analisados dois tipos de separadores de partículas do tipo ciclone tangencial com o objetivo de caracterizar o escoamento para validar uma simulação computacional baseada em resultados experimentais. O volume de controle no qual o escoamento é analisado está apresentado na Figura 2.1 e corresponde a dois tipos de separadores, A e B. Para as análises computacionais foi utilizada a

metodologia conhecida como *Large Eddy Simulation* – LES, ou, metodologia de simulação de grandes escalas.

Nas Figuras 2.2 e 2.3 são apresentados, respectivamente, o campo de velocidades transversal do escoamento e a sua composição tridimensional-longitudinal ocorrendo nos dois tipos de separadores. Observa-se nas Figuras 2.2-b e 2.3-b que o escoamento desenvolvido no ciclone do tipo B é mais complexo, apresentando uma região periférica e um núcleo bem definido, cuja estrutura percorre, praticamente, todo o comprimento do vórtice.

Segundo Matsuzaki et, al. (2007) estas características indicam que o prolongamento do duto de saída na câmara de ciclone tem influência marcante na formação do vórtice, proporcionando uma maior capacidade de separação de particulados, em função das variações de velocidade e pressão existentes entre as regiões nuclear e a rotativa periférica.

A mesma estrutura rotativa aplicada para separar materiais pode ser trabalhada, ou moldada, e então empregada em processos para atomizar e homogeneizar combustíveis em meio ao oxidante, conforme observado em sistemas isotérmicos de mistura (KIMOTO et al., 2007).

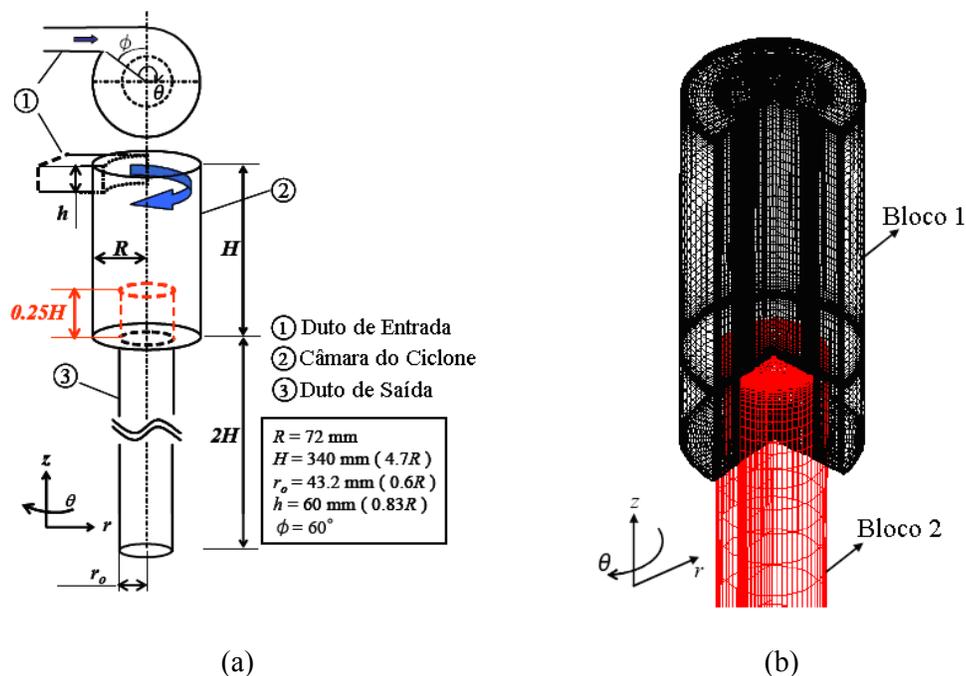


Figura 2.1 – Volume de controle de atuação do escoamento rotativo (adaptado de MATSUZAKI et al., 2007). (a) esquema da estrutura do ciclone separador de partículas tipo A e tipo B (prolongamento do duto de saída na câmara do ciclone). (b) domínio computacional para o ciclone do tipo B. Análise via metodologia LES.

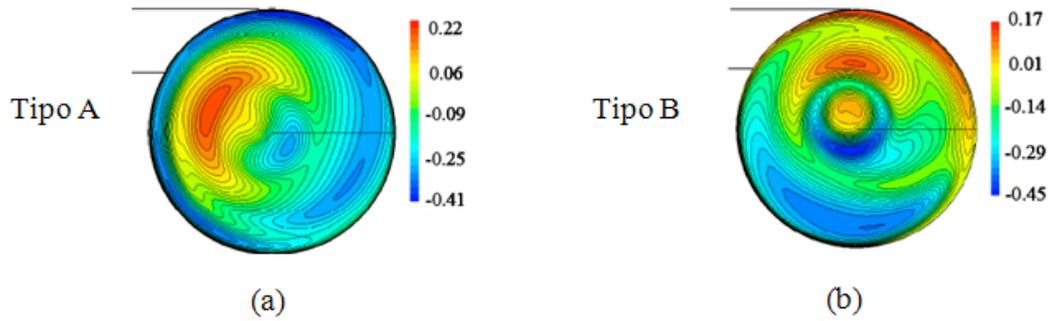


Figura 2.2 – Simulação (LES) dos campos de velocidade transversais formados nos ciclones do tipo A e B com as respectivas escalas adimensionais de velocidade (adaptado de MATSUZAKI et al., 2007).

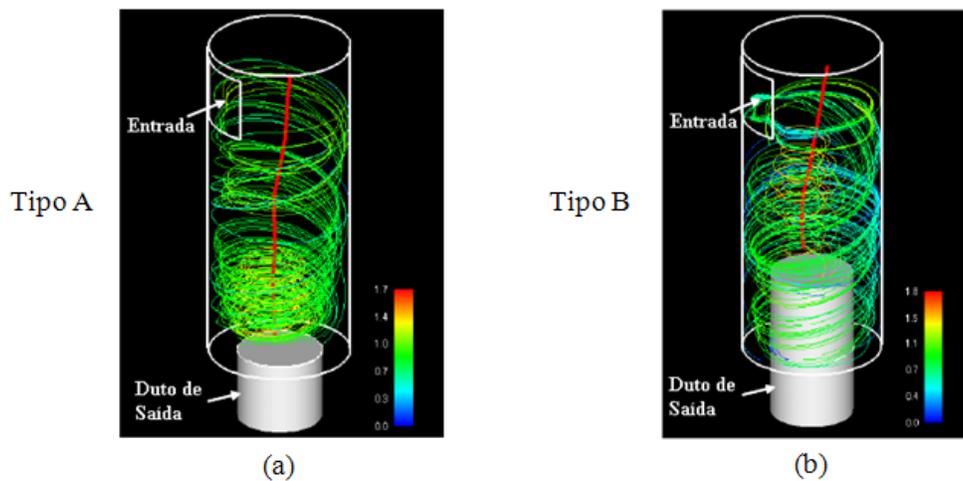


Figura 2.3 – Simulação (LES) tridimensional dos campos de velocidade longitudinais formados nos ciclones do tipo A e B com as respectivas escalas adimensionais de velocidade (adaptado de MATSUZAKI et al., 2007).

Com relação aos processos exotérmicos, os escoamentos rotacionais possuem uma importante aplicação na manutenção da chama, na influência das emissões poluentes e no consumo de combustível, em função das suas características dinâmicas. Neste contexto, Ikeda et al. (2003) apresentam um conceito de combustor empregado em sistemas de geração de energia elétrica (ver Figura 2.4), que utiliza a dinâmica do escoamento rotativo para sustentar o complexo processo de queima do carvão sub-betuminoso pulverizado, que apresenta alta umidade e concentração de particulados não-reativos em sua estrutura.

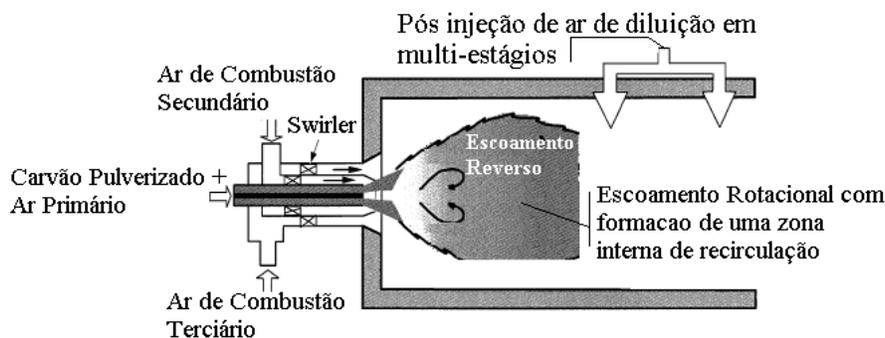


Figura 2.4 – Conceito de combustor de baixo NOx com múltiplos estágios de injeção de ar de diluição (adaptado de IKEDA et al., 2003).

O campo de velocidade do escoamento gerado neste conceito de combustor é analisado em Watanabe et al. (2009). O estudo foi realizado com base no domínio computacional apresentado na Figura 2.5 e tem como objetivo comparar duas técnicas computacionais de simulação de grandes escalas do escoamento: LES – *Large Eddy Simulation* e RANS – *Reynolds Averaged Navier-Stokes*. Para esta análise levou-se em consideração as configurações tal como apresentadas na Tabela 2.1, em que  $S_w$  (1; 2 e 3) corresponde à configuração experimental utilizada,  $S_{w2}$  e  $S_{w3}$  correspondem aos ângulos de entrada dos escoamentos secundário e terciário, respectivamente, em relação à linha de centro longitudinal do combustor, e  $S_w$  corresponde ao número de *swirl* baseado em uma metodologia adotada no trabalho mencionado.

Observa-se em ambos os resultados das simulações (ver Figura 2.6) um escoamento axial reverso, presente na região interna do vórtice, envolto por um escoamento axial de sentido positivo. Observa-se, também, que conforme o número de *swirl* evolui, os níveis de velocidade e o volume ocupado pelo escoamento reverso sofrem modificações.

Tabela 2.1 – Dados de entrada para a caracterização computacional do escoamento analisado (adaptado de Watanabe et al., 2009).

Configurações	Ar secundário, $S_{w2}$ [graus]	Ar terciário, $S_{w3}$ [graus]	Número de <i>swirl</i> , $S_w$
$S_w(1)$	81	72	6.54
$S_w(2)$	63	72	6.14
$S_w(3)$	81	63	5.28

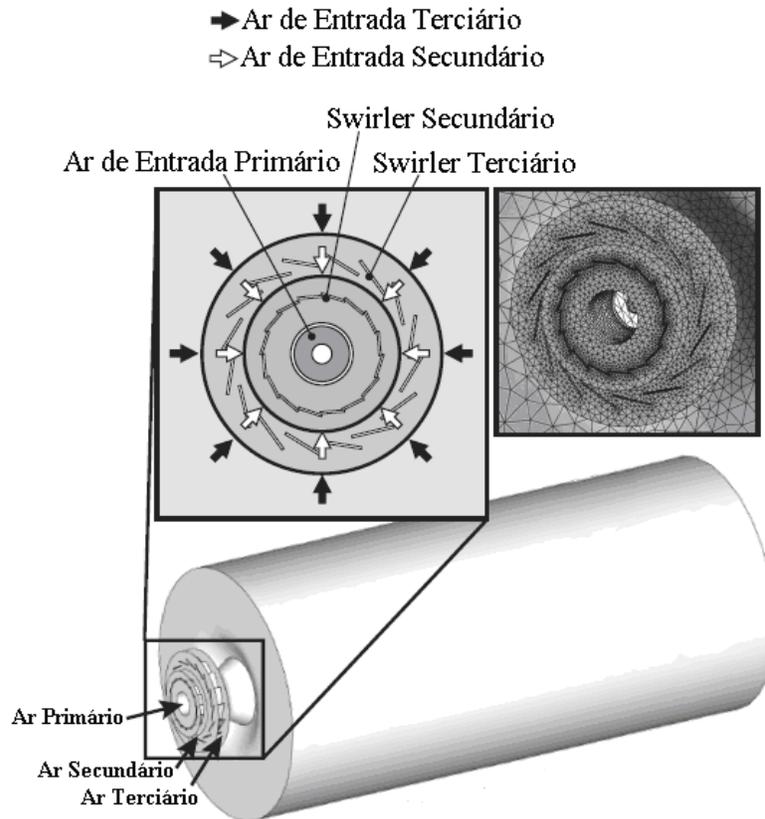


Figura 2.5 – Domínio computacional utilizado nas simulações do combustor de baixo NOx (adaptado de WATANABE et al., 2009).

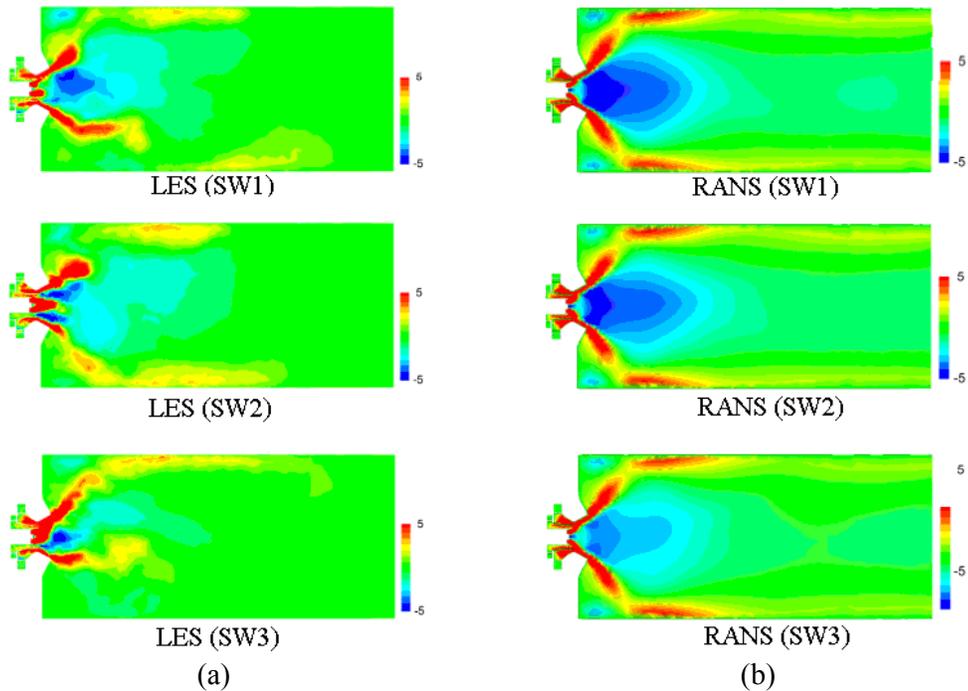


Figura 2.6 – Resultado das simulações computacionais no combustor de baixo NO<sub>x</sub>. (a) simulação da distribuição radial da velocidade axial média por meio da técnica LES, em função das configurações adotadas e (b) simulação da distribuição radial da velocidade axial média por meio da técnica RANS, em função das configurações adotadas.

O resultado da influência do escoamento rotativo nas emissões de NO<sub>x</sub> geradas no mesmo sistema experimental apresentado na Figura 2.4 é discutido em Ikeda et al. (2002) (ver Figura 2.7). Neste estudo foram analisadas as emissões poluentes decorrentes do produto da queima de dois tipos de carvão, o betuminoso e o sub-betuminoso, em função do ângulo de rotação do escoamento do ar secundário ( $S_{w2}$ ).

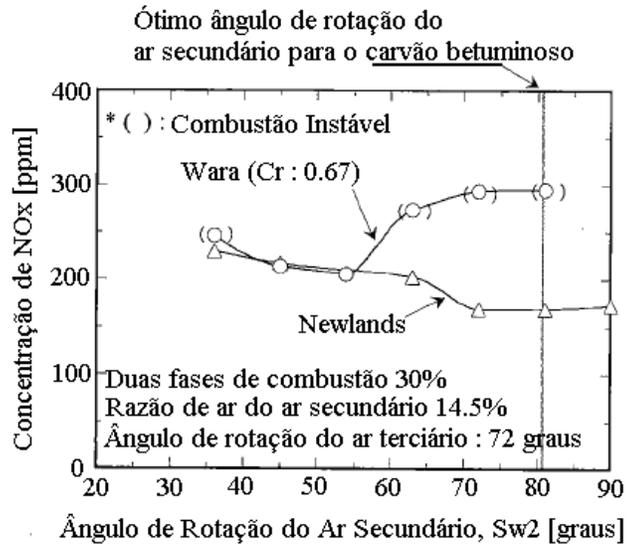


Figura 2.7 – Relação entre o ângulo de rotação do ar secundário com a geração de NOx por meio do uso dos dois tipos de carvão: betuminoso - Wara e o sub-betuminoso –Newlands (adaptado de IKEDA et al., 2002).

Observou-se nos resultados que a evolução da rotação do escoamento permite otimizar, diferencialmente, o processo de queima com ambos os comburentes, com impacto na concentração de NOx. Este fato decorre de uma condição de flamabilidade (mistura ultra-pobre) sustentada pela dinâmica do escoamento, que possibilita atenuar o pico de temperatura da chama e, conseqüentemente, diminuir as emissões de NOx.

Segundo Ikeda et al. (2002), a dinâmica do escoamento rotativo também é capaz de proporcionar um tempo de queima adequado às características da mistura reativa de forma a se obter o máximo aproveitamento do combustível, tornando o processo de queima mais completo.

Em função destas características observou-se que o escoamento rotativo possui fundamental importância em processos de queima, não só em combustores de baixo NOx, mas também, em variados conversores de energia, como os motores a pistão aplicados à mobilidade e/ou à geração de energia elétrica. Neste contexto, Laramée et al. (2006), em uma investigação computacional da dinâmica do escoamento em motores de combustão interna, apresentam os característicos escoamentos rotacionais que ocorrem em conversores de energia que utilizam os ciclos Diesel e Otto.

Em um motor movido a óleo diesel o escoamento rotativo se desenvolve conforme o esquema apresentado na Figura 2.8, formando uma espiral ao longo de um eixo de rotação

hipotético posicionado verticalmente no cilindro. Este movimento é usualmente chamado de *swirl*. A rotação é produzida a partir de uma componente tangencial imposta ao escoamento por uma geometria apropriada formada pelos dutos de admissão e pelo orifício de entrada da câmara de combustão.

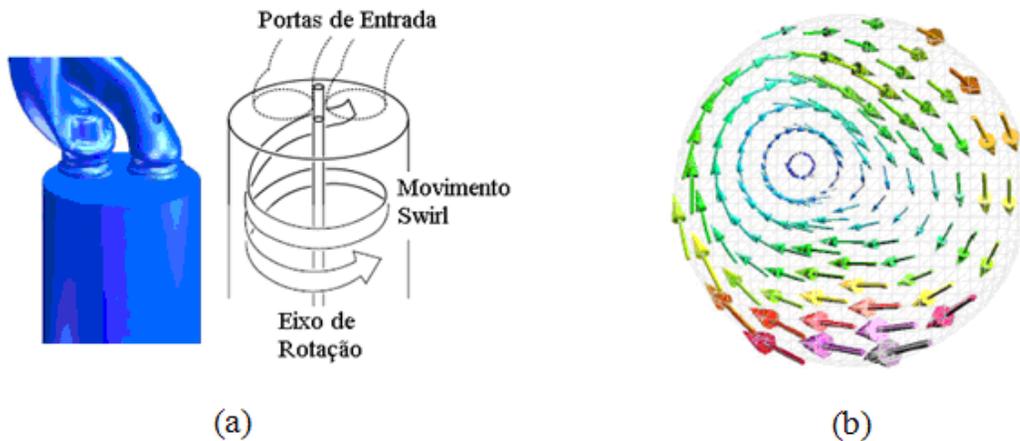


Figura 2.8 – Dinâmica do escoamento rotativo aplicado aos motores de ciclo Diesel.  
(a) Sentido da movimentação de *swirl* no cilindro e (b) visualização transversal do escoamento com *swirl* no cilindro - Simulação Computacional (adaptado de LARAMEE et al., 2006).

A movimentação do tipo *tumble* é mais comum em motores a ciclo Otto com uma entrada de admissão. O movimento *tumble* corresponde à rotação do escoamento ao longo de um eixo hipotético posicionado horizontalmente no cilindro, ortogonal ao eixo da movimentação de *swirl* (ver Figura 2.9). Da mesma maneira que nos motores movidos à óleo diesel, o escoamento rotativo produzido nos motores de ciclo Otto é o resultado da adição de uma componente tangencial ao escoamento admitido, imposta por uma geometria formada pelo duto de admissão e pelo desenho do orifício de entrada da câmara de combustão.

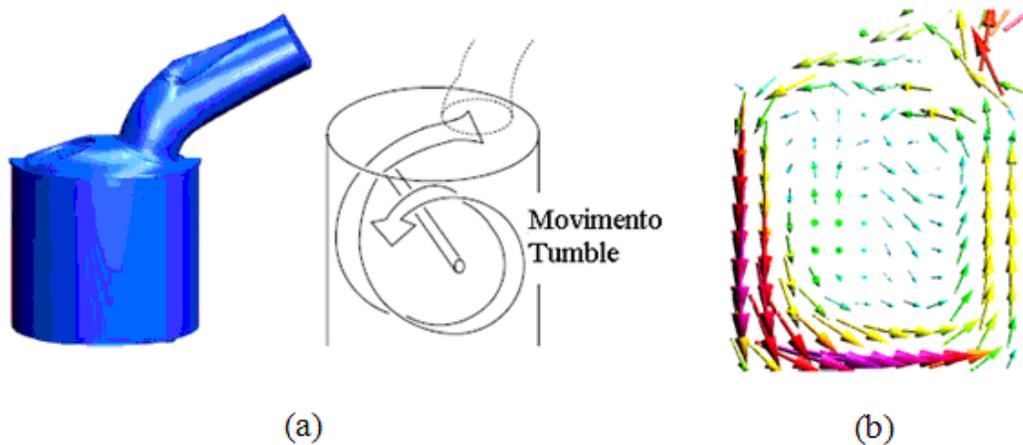


Figura 2.9 – Dinâmica do escoamento rotativo aplicado aos motores de ciclo Diesel. (a) Sentido da movimentação *tumble* no cilindro e (b) visualização transversal do escoamento com *tumble* no cilindro - Simulação Computacional (adaptado de LARAMEE et al., 2006).

Nestes ciclos termodinâmicos, a energia cinética associada aos movimentos de rotação do escoamento é usada na geração de turbulência para o processo de mistura do oxigênio fresco com o combustível atomizado. Quanto maior a turbulência gerada, melhor a mistura de ar e combustível, e assim, mais estável o processo de combustão. Ou seja, maximizando a movimentação de *swirl*, ou *tumble*, é possível beneficiar as condições do processo de combustão (melhoria da preparação da mistura e um alto EGR - *Exhaust Gas Ratio*), possibilitando um decréscimo no consumo de combustível e de emissões poluentes. Porém, um escoamento com a rotação muito elevada propicia uma intensa troca de calor da chama com o volume de controle, causando irregularidades em sua propagação e impedindo a ignição do restante da mistura. Desta forma, o combustível é oxidado parcialmente.

Estas características tornam o controle da movimentação do escoamento em um objeto fundamental para se obter estabilidade e reprodutibilidade das condições ideais para a combustão em cada ciclo motor.

Com base nestas percepções, Jeong et al. (2006) apresentam um estudo sobre a aplicação do escoamento rotativo controlado em um motor a ciclo Diesel, com o objetivo de minimizar as emissões de particulados e de espécies químicas. O trabalho foi desenvolvido por meio de um modelo computacional denominado *Kringing*, utilizado no desenho da câmara de combustão de baixas emissões.

Nos motores a ciclo Diesel o NOx é produzido quando o nitrogênio presente no ar de combustão reage com o oxigênio disponível sob a condição de altas temperaturas. A fuligem encontrada nos gases de exausto corresponde a um subproduto do processo de combustão produzida por meio da queima incompleta do comburente quando o oxigênio é insuficiente ou a temperatura do processo de combustão é muito baixa. Para se reduzir a emissão de NOx, conciliado com um baixo índice de emissões de particulados, Jeong et al. (2006) propuseram misturar o gás de alta temperatura, decorrente do processo de combustão, com o ar frio admitido, em uma dinâmica que demanda um curto intervalo de tempo, mas capaz de arrefecer os gases de combustão com alta temperatura (ver Figura 2.10). Desta forma, segundo Jeong et al. (2006), a emissão de NOx pôde ser reduzida sem qualquer aumento adicional de fuligem.

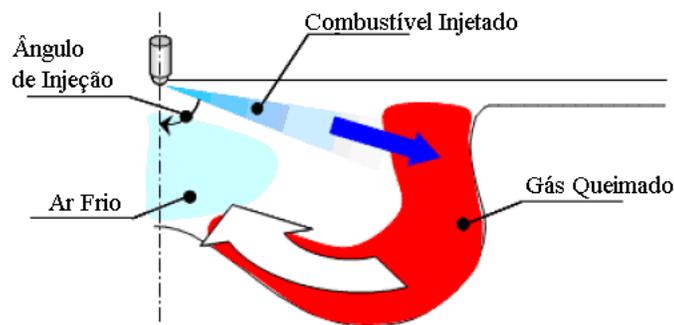


Figura 2.10 – Esquema da estratégia de resfriamento dos gases quentes como solução para a diminuição do NOx emitido (adaptado de JEONG et al., 2006).

Esta estratégia só é possível com uma conciliação harmônica entre a geometria da câmara de combustão, o nível de rotação do escoamento e o controle de entrada de ar frio (eficiente dinâmica na abertura das válvulas de admissão). Assim, o escoamento rotativo é empregado tanto no processo de mistura dos reagentes, para uma queima eficiente, quanto no processo de mistura do ar fresco com os gases quentes do produto da combustão.

## 2.2 - ESCOAMENTO ROTATIVO COM ELEVADA ROTAÇÃO APLICADO AO COMBUSTOR DO TIPO LPP

Conforme mencionado no primeiro capítulo, o modelo LPP de combustores utiliza o escoamento rotativo como fonte de estabilização do processo de combustão e trabalha com uma pré-mistura pobre entre os reagentes. Fator que possibilita queimar todo o combustível em uma chama fria e, conseqüentemente, minimizar as emissões de NO<sub>x</sub>, CO e de combustível não queimado. O escoamento rotativo aplicado ao combustor LPP é conhecido na literatura como o vórtice colapsado (JOCHMANN et al., 2006), que surge como uma solução eficiente ao processo de queima nos combustores de baixo NO<sub>x</sub>. Ele é o resultado da expansão abrupta, ou o colapso, da base do escoamento rotativo à entrada deste combustor (ver Figura 2.11), possui um núcleo com movimento de precessão, conhecido como o *Precessing Vortex Core* – PVC, e uma zona central de recirculação - ZCR, localizada a frente deste núcleo, capaz de estabilizar os processos de queima de alta intensidade (ANACLETO et al., 2003).

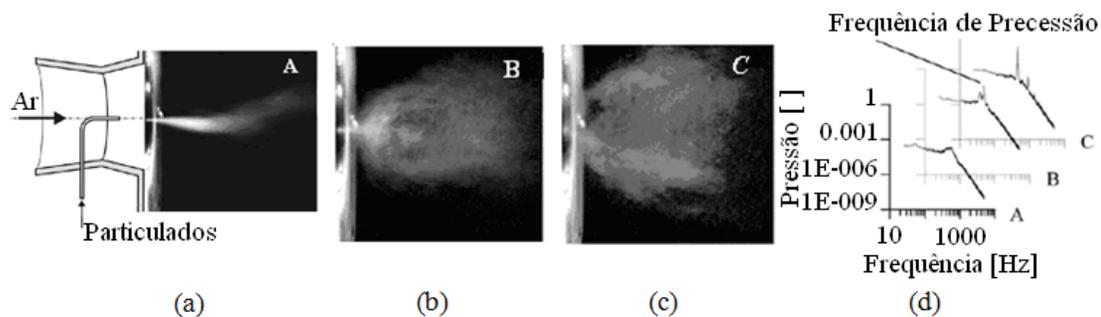


Figura 2.11 – Formação do vórtice colapsado à entrada de um combustor do tipo LPP. (a) intensidade de rotação  $S' = 0,32$ ; (b)  $S' = 0,62$ ; (c)  $S' = 1,05$  e (d) evolução dos picos dos espectros de pressão do escoamento em função de  $S'$  (adaptado de FERNANDES et al., 2006).

No processo de formação do vórtice colapsado o escoamento rotativo gera um gradiente de pressão radial em função da aceleração centrífuga, forçando uma expansão do fluxo e causando o decaimento das velocidades axial e tangencial. O resultado é o surgimento do gradiente de pressão radial que, por sua vez, causa um gradiente de pressão

axial negativo às proximidades do eixo longitudinal do vórtice. Este processo resulta em um escoamento reverso que se torna responsável pela formação da zona central de recirculação (ver Figura 2.12).

À região nuclear do escoamento, a distribuição da velocidade tangencial é da forma Rankine (velocidade tangencial proporcional ao raio) e, portanto, o núcleo do vórtice pode se tornar instável transformando-se em um PVC com o aumento da rotação (SYRED, 2006). A Figura 2.11-d mostra que a formação do vórtice colapsado é acompanhada do crescimento de um pico no espectro de pressão da base do escoamento, cuja intensidade é ampliada com a evolução da rotação. Estes picos de frequência caracterizam o escoamento por indicarem as possíveis instabilidades hidrodinâmicas provocadas pelo PVC, que ocorrem em forma de pulsações no campo de pressão (ANACLETO et al., 2003), e podem provocar falhas no processo de queima, além de danos à estrutura da câmara de combustão.

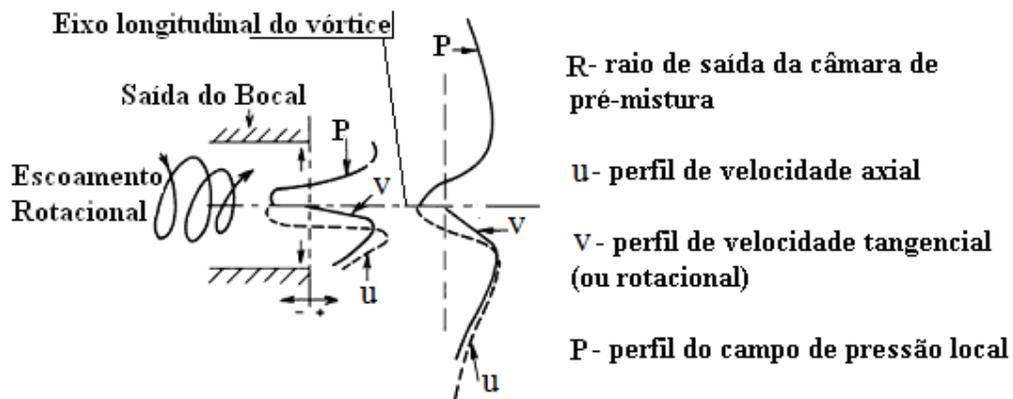


Figura 2.12 – O campo de velocidades caracterizando o momento do colapso do escoamento rotativo à entrada de um combustor LPP (adaptado de SYRED, 2006).

A composição tridimensional do vórtice colapsado é detalhada em Cala et al. (2006) em uma simulação do escoamento rotativo isotérmico, aplicado a um combustor de baixo NOx. Em suas análises são apresentadas as respectivas estruturas instantâneas, as limitações geométricas, as inter-relações e os fluxos ocorrentes neste escoamento, conforme mostrado na Figura 2.13.

Na Figura 2.13-a observa-se uma estrutura vorticial, rotacionando no sentido indicado pela seta, que revela dois vórtices de grande escala em formato de espiral: o vórtice secundário externo (VSE) e o vórtice secundário interno (VSI). Nas Figuras 2.13-b

e 2.13-c são mostrados os campos de velocidades radial-axial e radial-tangencial, respectivamente, da região interna do escoamento. Observa-se que o plano horizontal revela mais uma estrutura no escoamento denominada de vórtice primário (VP), enquanto que o plano vertical apresenta as estruturas helicoidais já mencionadas (VSI e VSE), além do VP. Conforme a escala de nível de vorticidade adotada por Cala et al. (2006), o vórtice primário corresponde à estrutura de maior energia, indicando que contém a vorticidade principal gerada pelo *swirler*, conforme observada nas Figuras 2.13-b e 2.13-c.

Na Figura 2.13-d observa-se, por meio das setas, a distribuição do sentido das rotações das estruturas do vórtice (ou a helicidade do escoamento) relativa à direção da velocidade do fluxo local. Esta análise mostra diferentes sentidos de rotação, sugerindo que as estruturas secundárias do vórtice rotacionam em sentidos contrários e que os vórtices primário e secundário interno possuem o mesmo sentido de rotação.

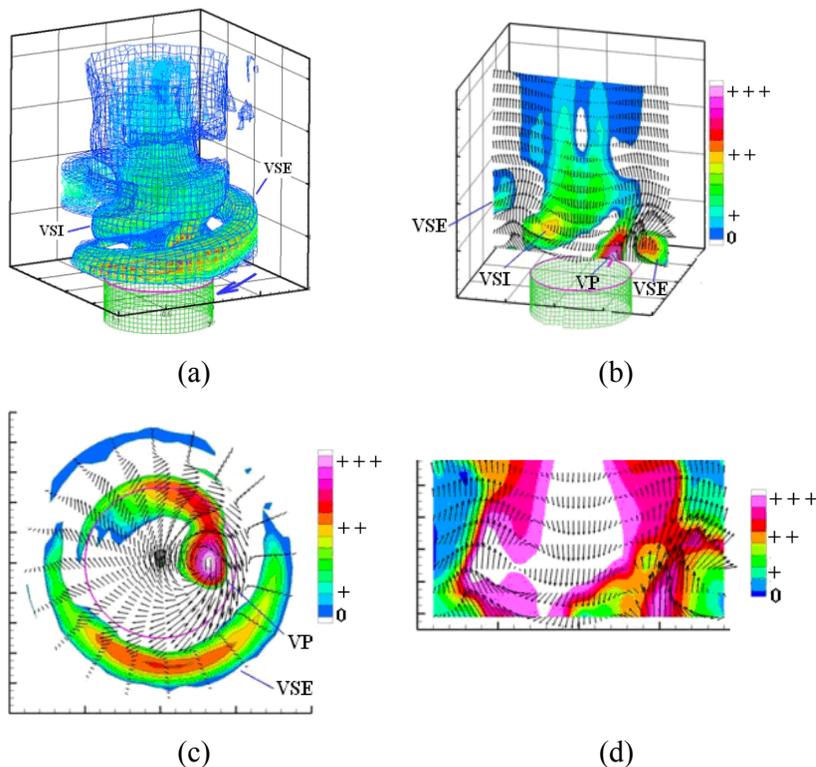


Figura 2.13 – Simulação em 3-D do vórtice colapsado. (a) visualização global do vórtice com ênfase ao VSI e ao VSE; (b) visualização da seção longitudinal com ênfase ao VP, ao VSI e ao VSE; (c) visualização da seção transversal com ênfase aos VP e ao VSE e (d) sentido da helicidade dos escoamentos (adaptado de CALA et al., 2006).

As possíveis estruturas geométricas do núcleo do vórtice, ou PVC, são detalhadas nos trabalhos de Dinesh et al. (2009) , Syred (2006) e Dinesh et al. (2010) (ver Figuras 2.14, 2.15 e 2.16, respectivamente), em uma análise computacional do escoamento rotativo isotérmico aplicado à mesma concepção de combustores. Em Dinesh et al. (2009) observa-se um PVC cuja estrutura apresenta mudanças físicas em função da elevação da rotação do escoamento, passando de um estado de geometria coerente a um corpo de volume ampliado e com a presença de ramificações. Em Syred (2006), para um determinado nível de rotação do escoamento, observa-se um PVC desenvolvido e prolongando-se em uma estrutura helicoidal que se expandirá, tal qual mostrado em Dinesh et al. (2010), (ver Figura 2.16), até formar o mencionado vórtice secundário interno.

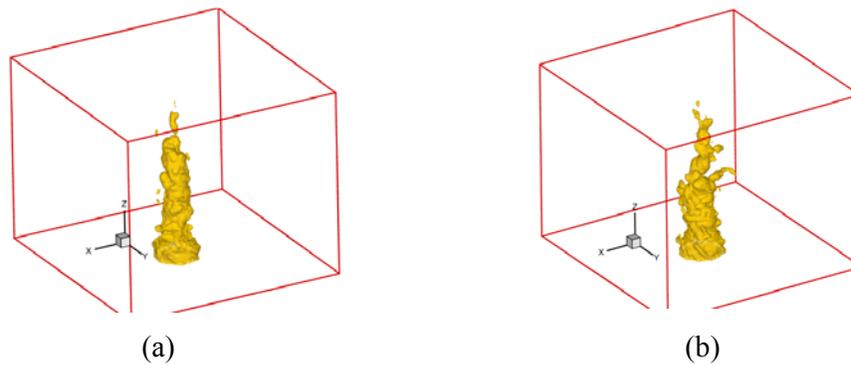


Figura 2.14 – Visualização do PVC isotérmico. (a)  $S = 0,40$  e (b)  $S = 0,45$  (adaptado de DINESH et al., 2009).

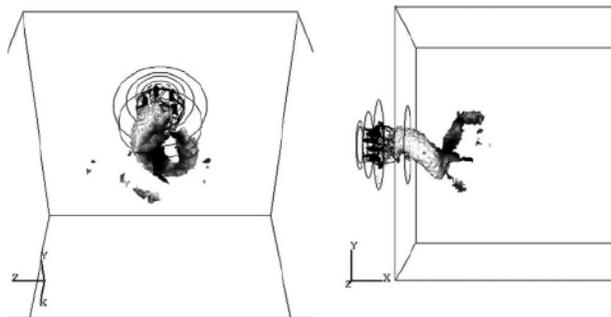


Figura 2.15 – Visualização do PVC isotérmico com um prolongamento helicoidal da sua estrutura (adaptado de SYRED, 2006).

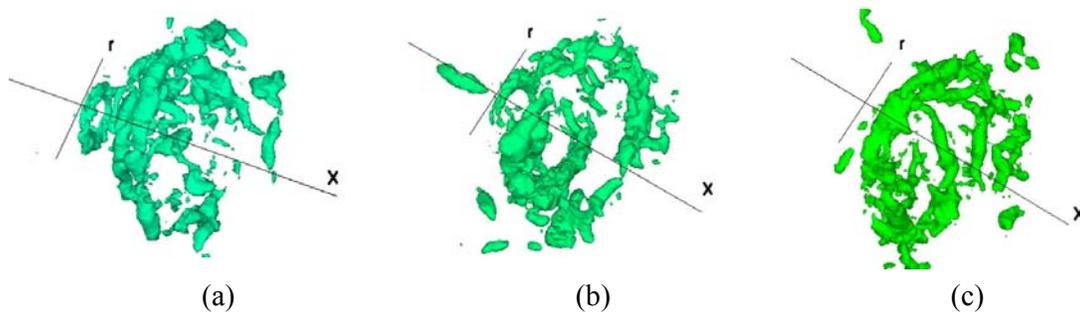


Figura 2.16 – Visualização do PVC isotérmico desenvolvendo-se na estrutura helicoidal. (a)  $S = 0,47$ ; (b)  $S = 0,7$  e (c)  $S = 0,94$  (adaptado de DINESH et al., 2010).

O vórtice secundário interno é uma estrutura que surge como um importante indutor para a sustentação da ZCR, conforme observado nas análises em Fick et al. (1997), Stopper et al. (2010), e por Jochmann et al. (2006), (ver Figuras 2.17, 2.18 e 2.19, respectivamente). Observa-se nas figuras que a maior parte do escoamento reverso ocorre aderida ao VSI, pois a sua dinâmica cria um mecanismo a mais, em relação aos já mencionados deltas de pressão adversos, que facilita o desenvolvimento do escoamento reverso na ZCR e o desenvolvimento do escoamento externo, ou periférico (ver detalhes nas Figuras 2.19, 2.20 e 2.21-b).

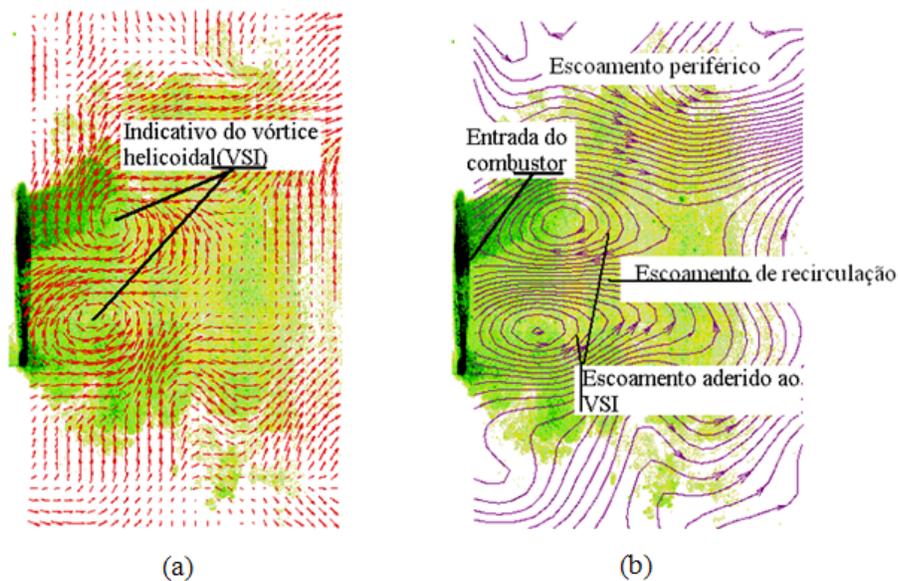


Figura 2.17 – Visualização computacional da base do escoamento isotérmico axial do vórtice colapsado. (a) Análise vetorial com ênfase ao VSI e (b) análise por meio das linhas de corrente com ênfase ao VSI (adaptado de FICK et al., 1997).

Conforme observado em Dinesh et al. (2010), (ver Figura 2.20), o aumento da rotação do vórtice colapsado impacta diretamente nas dimensões da ZCR. Nesta situação a zona central de recirculação, ou a bolha do vórtice, segundo o autor, sofre um aumento de volume, e então, passa a apresentar camadas de escoamentos reversos que se amplificam de forma linear (ver figura 2.20-d), resultando em aumento das intensidades das forças mantenedoras do escoamento reverso.

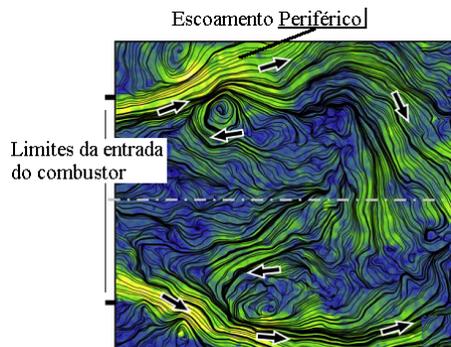


Figura 2.18 – Visualização computacional do escoamento isotérmico axial do vórtice colapsado com ênfase ao VSI e ao escoamento periférico (adaptado de STOPPER et al., 2010).

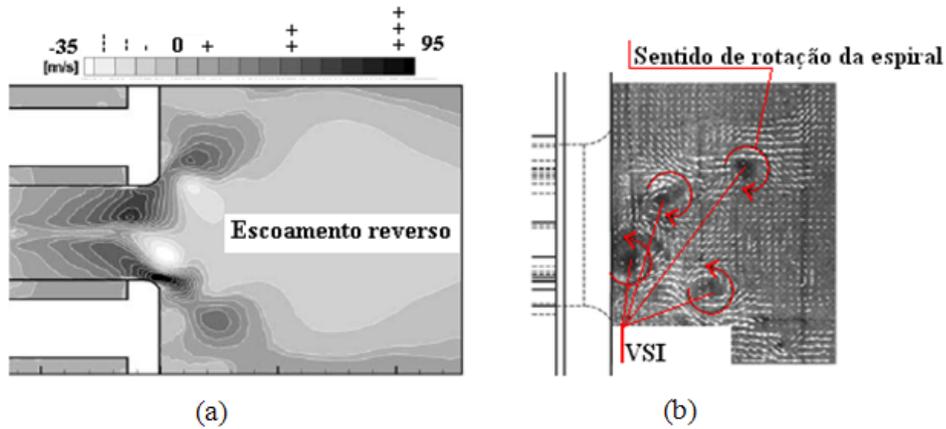


Figura 2.19 – Visualização computacional do escoamento isotérmico axial do vórtice colapsado. (a) ênfase ao VSI e a intensidade da velocidade e (b) ênfase ao VSI por meio de vetores (adaptado de JOCHMANN et al., 2006).

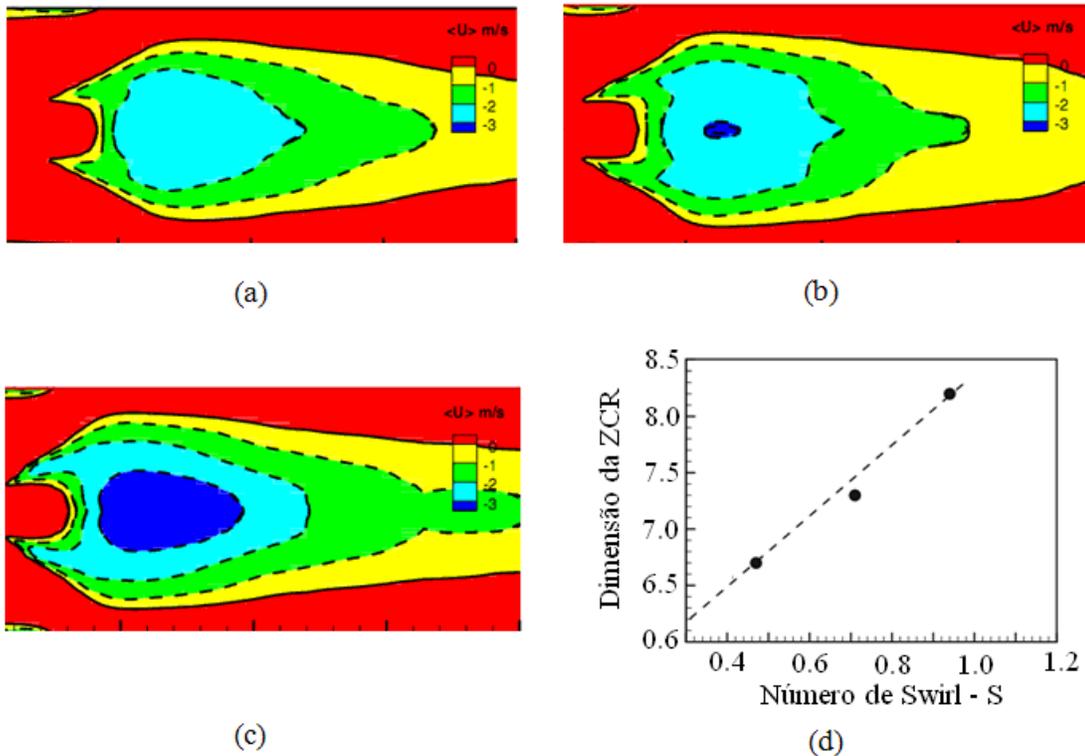


Figura 2.20 – Desenvolvimento da ZCR em função da rotação do escoamento. (a)  $S=0,47$ ; (b)  $S=0,7$ ; (c)  $S=0,94$  e (d) Dimensão da ZCR – medida longitudinal/diâmetro médio da bolha (adaptado de DINESH et al., 2010).

A Figura 2.21 apresenta o vórtice colapsado por meio de uma linha estrutural que sintetiza as informações discutidas até aqui. Neste esquema observa-se a estrutura helicoidal do VSI como o segmento, ou o prolongamento, do VP, conforme já referido, e observa-se também, que uma importante parcela da vorticidade gerada pelo *swirler* é atribuída ao vórtice secundário interno para a manutenção da ZCR. Os sentidos das setas mostram que a interação entre o VSI e o VSE surge como um dipolo tridimensional, de geometria helicoidal, cujo efeito do acoplamento entre eles é sugerido como um mecanismo reforçador da estabilidade da estrutura global do escoamento (CALA et al., 2006).

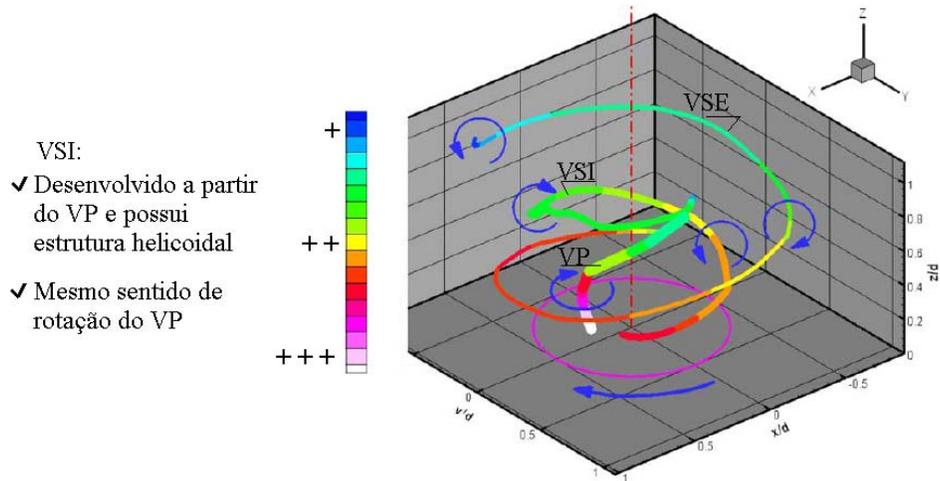


Figura 2.21 – Caracterização do vórtice colapsado por meio da estrutura vorticial (adaptado de CALA et al., 2006).

## 2.3 – CARACTERIZAÇÃO DO CAMPO DE VELOCIDADES DA BASE DO ESCOAMENTO E IDENTIFICAÇÃO DO PVC E DA CONDIÇÃO DE REGULARIDADE DO VÓRTICE

Conforme mencionado no capítulo introdutório a caracterização do escoamento é o meio de se identificar o vórtice colapsado para analisar o sistema gerador de fluxo (*swirler* axial e câmara de pré-mistura), quanto a sua funcionalidade para as experimentações com o combustor LPP (ENM-UnB). O processo de caracterização consiste em detectar os elementos intrínsecos do vórtice colapsado que correspondem ao campo de velocidades, ao PVC e à condição de regularidade do escoamento como um todo. Para tanto, serão analisados os parâmetros integrais obtidos na saída da câmara de pré-mistura (base do vórtice), que são: os perfis do campo de velocidades, os sinais de velocidade (caracterizados no domínio do tempo e da frequência) e as visualizações do escoamento nesta região. As análises ocorrem em função da variação do número geométrico de *swirl*.

### 2.3.1 – Perfis de Velocidade e Identificação do PVC

O campo de velocidades do vórtice colapsado caracteriza-se, basicamente, conforme o apresentado em Weigand et al. (2006), (ver figura 2.22). A figura mostra o escoamento

não isotérmico representado pelas componentes radial (ou expansiva) e axial de velocidades para a seguinte condição: 20 m/s e  $S=0,9$ . Com base na orientação mostrada na figura observa-se que logo à entrada do combustor ocorre a região de expansão, ou colapso, do escoamento e o início do campo de fluxos reversos (destacado em vermelho), que compõe a já mencionada zona central de recirculação.

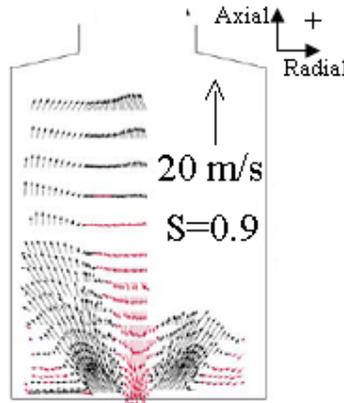


Figura 2.22 – Simulação do campo vetorial do escoamento não isotérmico, com elevado número de swirl, em um combustor de baixo NO<sub>x</sub>, com ênfase às componentes radial e axial de velocidades (adaptado de WEIGAND et al., 2006).

O perfil de velocidade axial observado na base do escoamento rotativo é apresentado em Syred (2006), (ver Figura 2.23). Observam-se duas regiões bem definidas na base deste escoamento, uma periférica com desenvolvimento positivo e uma central com desenvolvimento negativo. Ambas caracterizam, respectivamente, os escoamentos axiais periféricos (próximos a parede do combustor), e o início da ZCR. Observa-se também, que os domínios da zona central de recirculação podem ser detectados com o afastamento da base do vórtice.

A componente tangencial do campo de velocidades do escoamento está representada pelos perfis de velocidades mostrados na Figura 2.24 (DINESH et al., 2010). Observa-se que não há movimentação tangencial à base do escoamento reverso, apenas na região periférica e, novamente, os domínios da zona central de recirculação são caracterizados com a evolução dos perfis de velocidade tangencial, na medida em que o escoamento se afasta da entrada do combustor.

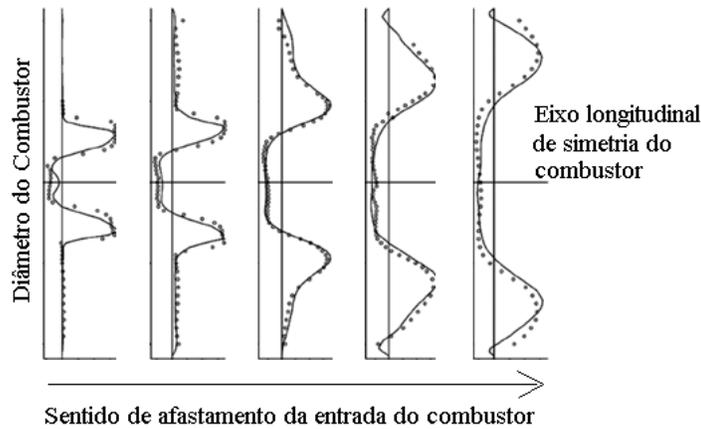


Figura 2.23 – Perfis de velocidade axial desenvolvendo-se em um combustor de baixo NOx. Comparação entre técnicas experimental de medição (linhas contínuas - LDA) e computacional (símbolos - LES) (adaptado de SYRED 2006).

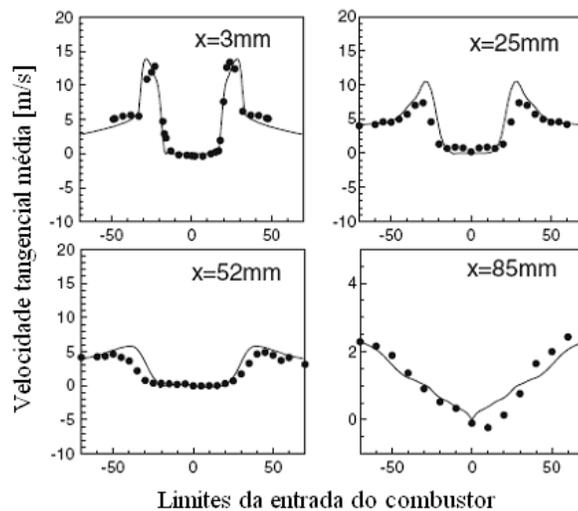


Figura 2.24 - Perfis de velocidade tangencial desenvolvendo-se em um combustor de baixo NOx. Comparação entre técnicas experimental de medição (linhas contínuas - LDA) e computacional (símbolos - LES) (adaptado de DINESH et al., 2010).

A Figura 2.25 apresenta o desenvolvimento conjunto dos perfis de velocidades axial- $u$ , tangencial- $v$  e de pressão longitudinal  $-P$ , em uma região que abrange da base do vórtice à área de diluição de um combustor de baixo NOx. Observa-se que com a evolução dos correspondentes perfis ao longo do combustor a componente tangencial se mantém nula à linha de centro do escoamento e os níveis máximos da pressão adversa e da intensidade do fluxo reverso ocorrem, somente, na entrada do combustor (correspondente região de formação do vórtice colapsado). Observa-se também, que os perfis de pressão e de

velocidades axial e tangencial tendem a se igualar com o afastamento da base do escoamento, apontando os limites máximos da ação da ZCR.

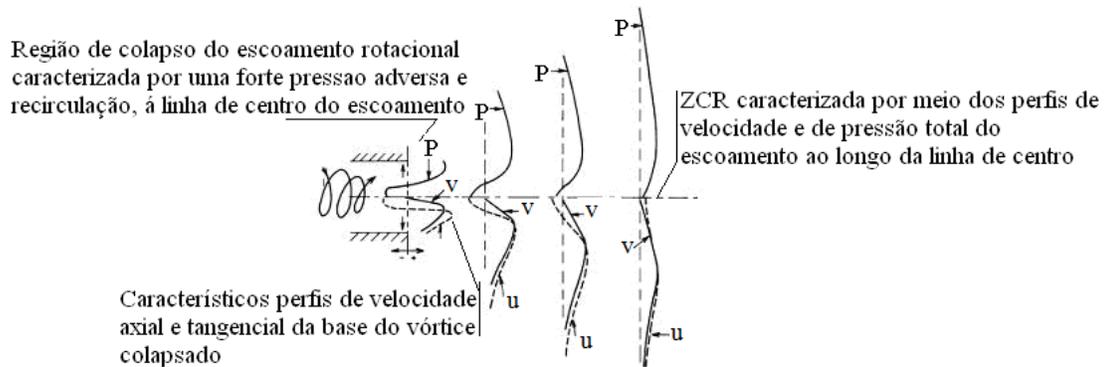


Figura 2.25 – Campo de velocidades axial- $u$  e tangencial- $v$  e de pressão centrífuga do escoamento com elevado número de *swirl* desenvolvendo-se em um combustor de baixo NOx (adaptado de Syred 2006).

Em Jochmann et al. (2006) observam-se os correspondentes sinais de velocidade referentes ao desenvolvimento axial do escoamento em dois pontos na entrada de um combustor de baixo NOx (ver Figura 2.26-a).

Ao monitor número 1 o sinal de velocidades indica a presença de fortes pulsações no escoamento e apresenta um comportamento periódico, com valores positivos e negativos, enquanto que ao monitor número 2 o sinal de velocidades também caracteriza um escoamento com elevadas pulsações, porém sem a presença da característica periódica observada ao monitor 1 (ver Figura 2.26-b).

Os espectros de potência (ver Figuras 2.26-c e 2.26-d) também sugerem um escoamento com regiões diversificadas: ao centro da seção de medição observa-se um fluxo de escalas mais elevadas, acompanhado de um harmônico dominante, que se dissipa por meio de estruturas de menores escalas. Na região periférica o escoamento é caracterizado pela ausência de dissipação de energia, contudo apresenta harmônicos dominantes de variadas amplitudes. Observa-se nas figuras mencionadas um pico de frequência com o valor de 400 Hz presente em ambos os espectros de potência, mas de diferentes amplitudes, o que pode indicar uma movimentação precessional presente em toda a região analisada do escoamento.

Observou-se, portanto, uma diferenciação entre as estruturas do escoamento na base do vórtice em função do posicionamento dos sensores. Conforme discutido em Anacleto et

al. (2003), a presença dos característicos sinais de velocidades e dos espectros de potência em toda a base do vórtice indicam a ocorrência de um típico PVC emergindo nesta região.

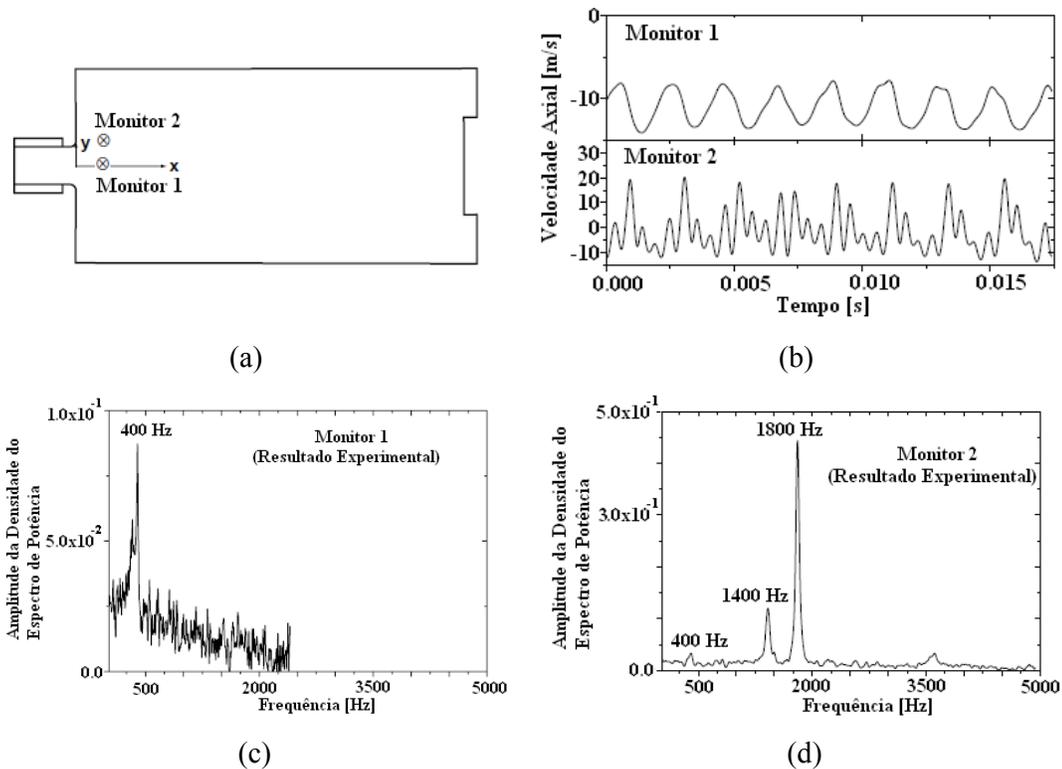


Figura 2.26 – Monitoramento do sinal de velocidade do escoamento com elevado número de *swirl* em um combustor de baixo NOx. (a) posição dos sensores à entrada do combustor; (b) caracterização dos sinais de velocidade axial no domínio do tempo; (c) e (d) caracterização dos sinais de velocidade axial no domínio da frequência.

Os estudos apresentados em Syred (2006), Anacleto et al. (2003) e Jochmann et al. (2006) (ver Figuras 2.27, 2.28 e 2.29, respectivamente), mostram imagens instantâneas da base do vórtice colapsado que destacam a condição de descentralização do seu núcleo em relação às limitações geométricas do combustor. As estruturas nucleares observadas caracterizam um típico PVC no qual a ZCR (ver Figura 2.29) e o escoamento descarregado na câmara de combustão (região de velocidade positiva, ver Figura 2.28), ocorrem anexados a ele. Segundo Anacleto et al. (2003), todas as possíveis instabilidades hidrodinâmicas geradas nesta região são transferidas ao restante do escoamento por meio desta ligação.

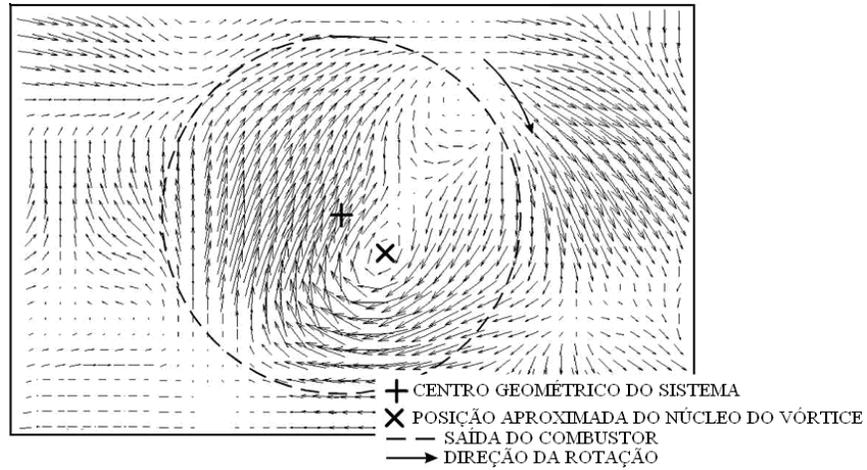


Figura 2.27 – Descentralização do PVC ocorrente em um combustor de baixo NOx. Simulação do campo vetorial de velocidades (adaptado de SYRED, 2006).

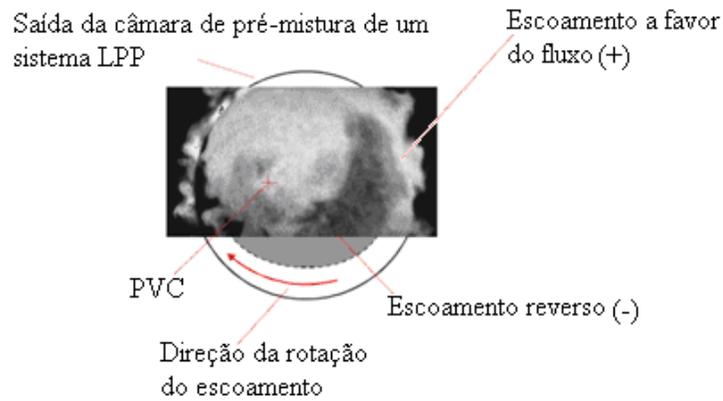


Figura 2.28 – Visualização transversal da região nuclear do escoamento com elevado número de *swirl*, com ênfase aos fluxos axiais (adaptado de ANACLETO et al., 2003).

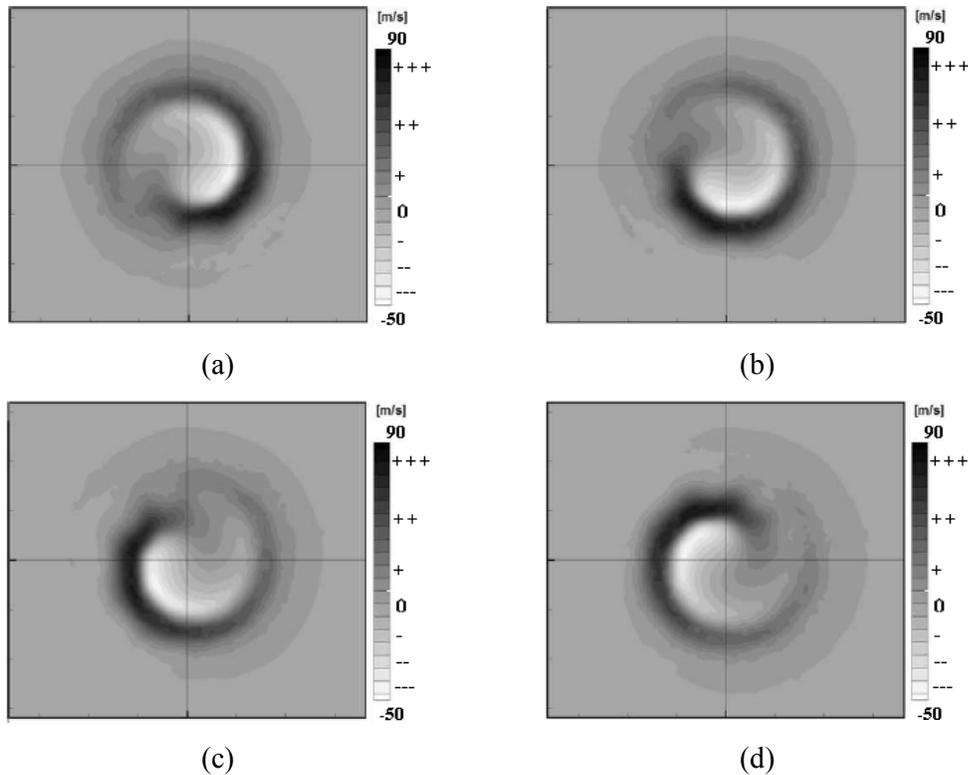


Figura 2.29 – Visualização do núcleo do vórtice com elevado número de *swirl*. Simulação computacional do escoamento, no plano azimutal, com ênfase aos fluxos na direção axial (adaptado de JOCHMANN et al., 2006).

### 2.3.1.1 – Identificação da condição de regularidade do escoamento via análises dos harmônicos dominantes do PVC

Dentre as análises realizadas em Anacleto et al. (2003), observou-se o comportamento das frequências dominantes do PVC em função da evolução de  $S'$ , relacionado ao ponto ótimo de funcionamento do combustor LPP (ver figura 2.31 e 2.32). Os dados foram obtidos com o sistema experimental apresentado na Figura 2.30, que serviu como base para o projeto de combustor instalado no Departamento de Engenharia Mecânica da UnB. As técnicas de medições utilizadas por este autor foram: velocimetria a laser Doppler e captação dos sinais acústicos do escoamento via microfones.

A figura 2.32 mostra que a melhor condição de operação do combustor ocorre para a reduzida faixa de rotação compreendida entre os denominados alternativos números de *swirl*  $S'=0,88$  a  $S'=1,26$ , permitindo-o operar sob um estreito intervalo de razões de



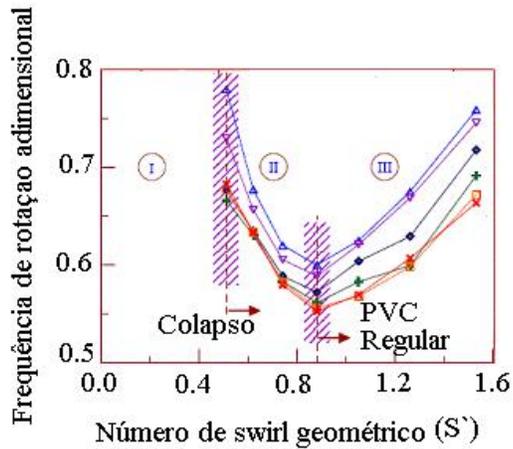


Figura 2.31 – Evolução das frequências dos harmônicos dominantes nos em função de  $S'$  (adaptado de ANACLETO et al., 2003).

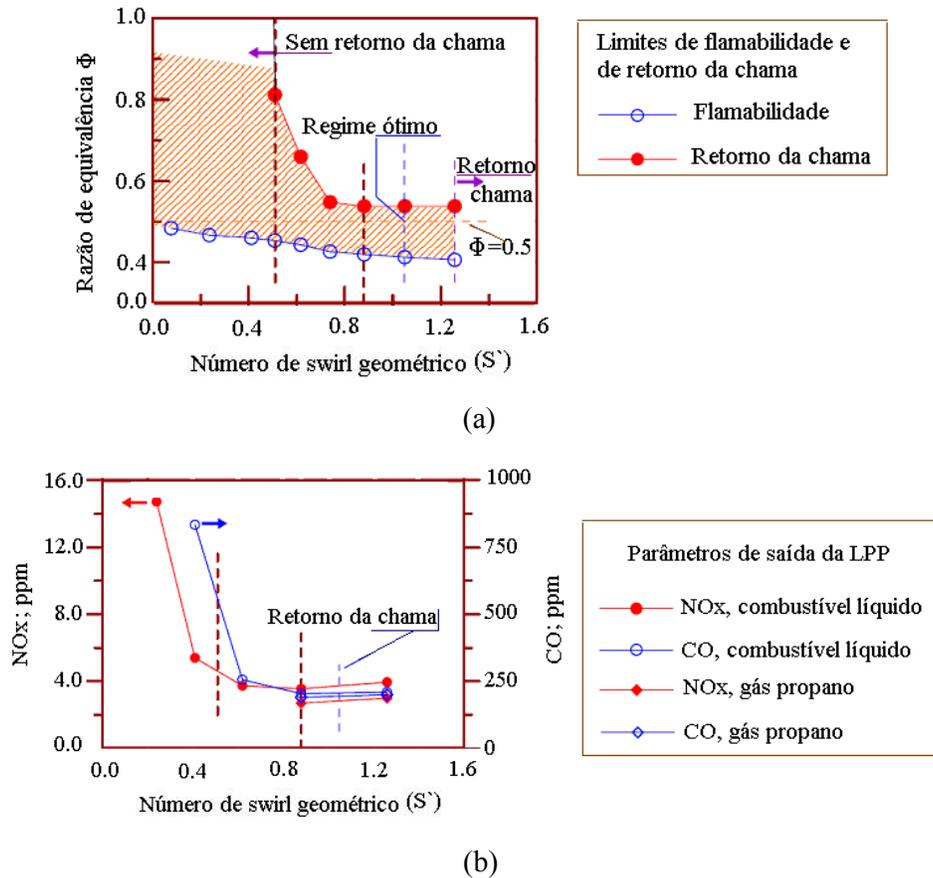


Figura 2.32 – Caracterização da condição de colapso do escoamento em função do número de *swirl* geométrico. (a) limites da flamabilidade e de retorno da chama do processo de combustão do sistema LPP e (b) concentração de espécies químicas à saída do combustor do sistema LPP (adaptado de ANACLETO et al., 2003).

## 2.4 - O NÚMERO DE SWIRL

Conforme mencionado, o escoamento rotativo é amplamente utilizado em turbinas a gás como a fonte de estabilização do processo de combustão. Em turbinas do tipo LPP, por exemplo, o escoamento rotativo possibilita estabilizar o processo de queima pobre até mesmo aos limites da flamabilidade, tornando possível minimizar as emissões de NO<sub>x</sub>, CO e de combustível não queimado. Nesta e em demais tecnologias de turbinas a gás o escoamento é gerado por meio de um dispositivo chamado *swirler* que corresponde, basicamente, a uma seção anular preenchida por um conjunto de pás (ver figuras 2.34 e 2.35), responsável pela transmissão da componente de rotação ao escoamento.

Os dois tipos mais comuns de *swirlers* são apresentados esquematicamente na Figura 2.33, são eles: o *swirler* de geometria axial, tal qual o utilizado neste trabalho, e o de geometria radial. Ambos normalmente aplicados em combustores de turbinas a gás de seções tubular e anelar (LEFEBVRE, 1998).

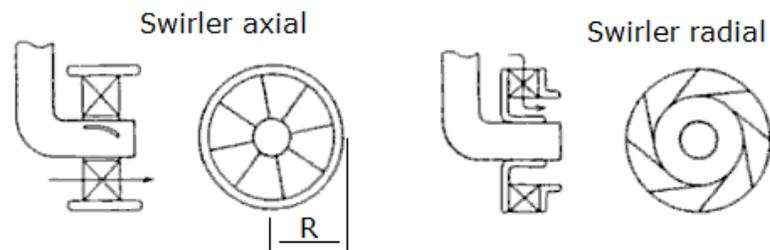


Figura 2.33 – Os dois tipos principais de *swirlers* (adaptado de LEFEBVRE, 1998).

Os *swirlers* são altamente eficientes em processos de ancoramento da chama, ao se comparado com a utilização de *blow bodies*. Primeiramente, por serem capazes de gerar o escoamento rotativo e, em segundo, por permitirem uma melhor flexibilidade na administração do processo de queima. Esta flexibilidade é conseguida por meio da variação do ângulo das pás e por modificações em sua configuração geométrica, tal como mostrado nas Figuras 2.34 e 2.35.

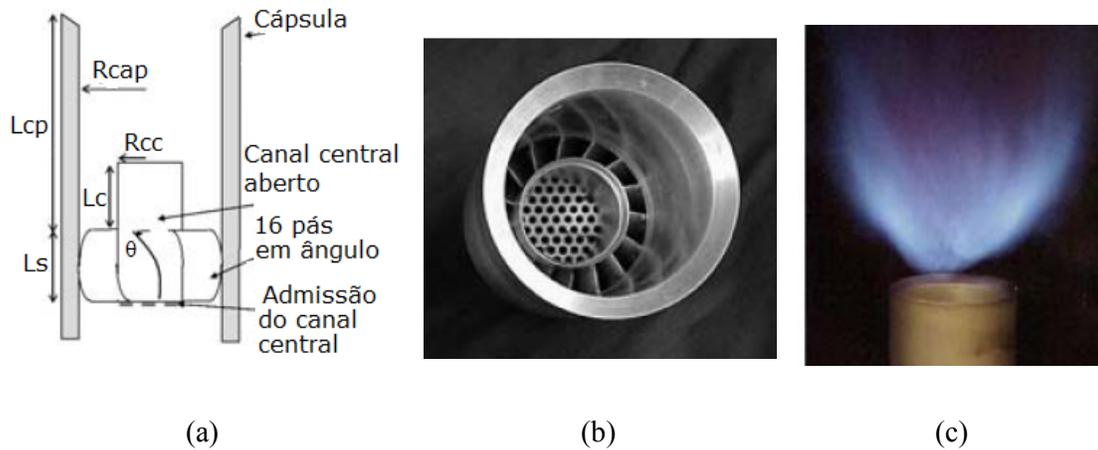


Figura 2.34 – Influência da configuração do *swirler* na produção da chama. (a) esquema representativo de um *swirler* axial com capsula alongada e admissão da mistura reativa via canal central aberto; (b) detalhe do *swirler* de capsula alongada; (c) visualização da chama produzida nesta configuração de *swirler* (adaptado de CHANG et. al., 2008).

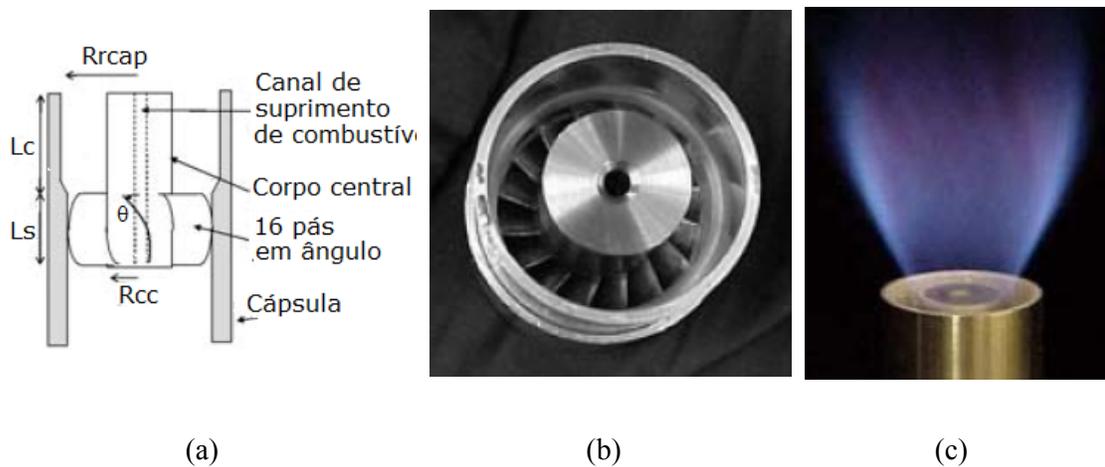


Figura 2.35 – Influência da configuração do *swirler* na produção da chama. (a) esquema representativo de um *swirler* axial com capsula curta e admissão da mistura reativa via canal central fechado; (b) detalhe do *swirler* de capsula curta; (c) visualização da chama produzida nesta configuração de *swirler* (adaptado de CHANG et. al., 2008).

Com o emprego do escoamento rotativo em processos de queima, surgiu a necessidade de caracterizá-lo para fins de análises técnicas, conforme observado por BEER et al. (1972). Neste sentido, os autores citados propuseram uma formulação, conhecida na literatura como o já mencionado número de *swirl-S*, cujo objetivo é quantificar o nível de rotação do escoamento à saída do *swirler*.

O número de *swirl*, basicamente, corresponde a um parâmetro adimensional calculado por meio da razão entre os momentos angular e linear do escoamento rotativo, associado a uma variável geométrica do *swirler* (ver equação 2.1).

$$S = \frac{G_\theta}{G_x R} \quad (2.1)$$

Onde,

$$G_\theta = \int_0^\infty (\rho uv + \overline{\rho u'v'}) r^2 dr \quad (2.2)$$

Corresponde ao fluxo axial do momento angular, ou de rotação, do escoamento à seção de saída do *swirler*, incluindo o termo de tensão de cisalhamento turbulento nas direções  $x-\theta$ .

$$G_x = \int_0^\infty (\rho u^2 + \overline{\rho u'^2} + (p - p_\infty)) r dr \quad (2.3)$$

É o fluxo axial do momento linear do escoamento à seção de saída do *swirler*, incluindo a direção  $x$  do termo de tensão normal turbulenta e o termo de participação da distribuição de pressão,  $p$ , no escoamento.

$R$  é o raio do bocal de saída do *swirler* (ver Figura 2.33),  $\rho$  corresponde à densidade específica do fluido e  $u$  e  $v$  são as componentes de velocidade axial e angular, respectivamente, expressas em coordenadas cilíndricas  $(x, r, \theta)$ .

O número de *swirl* é usualmente empregado nas análises da maior parte dos trabalhos relacionados aos estudos em escoamentos rotativos. Contudo, observa-se na literatura que certas suposições acerca da natureza do escoamento e da estrutura do *swirler* podem ser adotadas para facilitar os cálculos deste parâmetro em uma aproximação de engenharia (CHANG, 2008). Uma vez que o processo de medição dos valores das velocidades e dos níveis de pressões exigidos como dados para os cálculos de  $S$ , pode solicitar um elevado nível de complexibilidade.

Conforme apresentado em CHANG et. al. (2008) e em LEFEBVRE (1998), as suposições consideradas no cálculo de  $S$  para um escoamento gerado em um *swirler* axial

(ver Figura 2.36) correspondem à: 1) levam-se em conta que as pás são absolutamente finas ao ponto de não transmitirem ao escoamento significativas tensões de cisalhamento turbulentas, apenas a imposição do sentido de rotação; 2) supõem-se que o escoamento seja um corpo sólido com movimento de rotação ao passar através da seção anular do *swirler*.

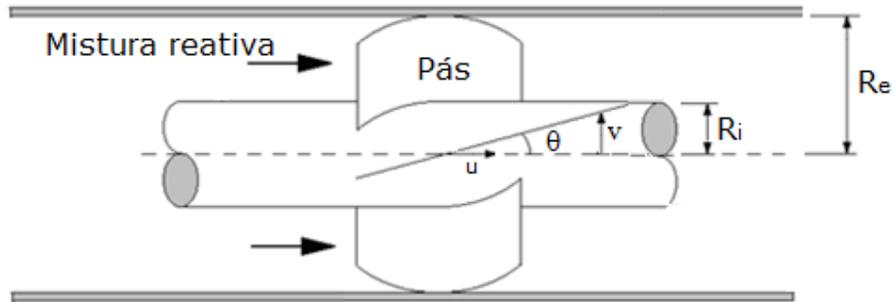


Figura 2.36 – Estrutura básica de um *swirler* de geometria axial (adaptado de FERREIRA, 2007).

Com base nas suposições apresentadas conclui-se que tanto os termos relacionados às tensões de cisalhamento no escoamento quanto a variação de pressão podem ser omitidos nas equações 2.2 e 2.3. Portanto, considerando a área da seção anular do *swirler*, o equacionamento dos novos, ou alternativos, momentos angular e linear do escoamento podem ser reescritos da seguinte forma:

$$G'_\theta = 2\pi \int_{R_i}^{R_e} \rho u v r^2 dr \quad (2.4)$$

$$G'_x = 2\pi \int_{R_i}^{R_e} \rho u^2 r dr \quad (2.5)$$

Em que  $R_i$  e  $R_e = R$  correspondem, respectivamente, aos raios inferior e externo do *swirler*, (ver Figura 2.36).

Para este caso, é observado em CHANG et. al. (2008) que  $u$  e  $v$  estão cineticamente relacionados ao ângulo das pás do *swirler* por meio da relação:  $\tan \theta = v/u$  (ver Figura 2.36), em que  $\theta$  corresponde ao ângulo de inclinação das pás. Portanto, a equação do fluxo axial do momento angular pode ser reescrita tal como se segue.

$$G'_\theta = 2\pi \tan \theta \int_{R_i}^{R_e} \rho u^2 r^2 dr \quad (2.6)$$

Levando-se em consideração as equações 2.5 e 2.6 obtém-se um parâmetro conhecido como o número de *swirl* alternativo-S' Alguns autores o reconhecem como o número de *swirl* geométrico, pois observou-se nele a possibilidade de se quantificar a rotação imposta ao escoamento com base, apenas, nos dados geométricos da seção anular do *swirler*.

Portanto, sendo:

$$S' = \frac{G'_\theta}{G'_x R_e} = \frac{2\pi \tan \theta \int_{R_i}^{R_e} \rho u^2 r^2 dr}{R_e 2\pi \int_{R_i}^{R_e} \rho u^2 r dr} \quad (2.7)$$

Resolvendo as integrais da equação 2.7, para um ângulo fixo das pás, obtém-se.

$$S' = \frac{2\pi \rho u^2 \left[ \frac{R_e^3 - R_i^3}{3} \right] \tan \theta}{2\pi \rho u^2 \left[ \frac{R_e^3 - R_e R_i^2}{2} \right]} \quad (2.8)$$

O que resulta em uma expressão que utiliza, apenas, os dados geométricos do *swirler* e o valor do ângulo de inclinação das pás. Portanto.

$$S' = \frac{2}{3} \left[ \frac{1 - (R_i/R_e)^3}{1 - (R_i/R_e)^2} \right] \tan \theta \quad (2.9)$$

O número de *swirl*, tal como apresentado na equação 2.9, será utilizado na caracterização do escoamento rotativo analisado neste trabalho.

### 3 - SISTEMAS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O capítulo apresentará as metodologias experimentais, uma síntese teórica das técnicas de medições do escoamento e dos correspondentes métodos de processamento dos dados. Conforme mencionado no capítulo introdutório, as medições ocorrerão no escoamento isotérmico de elevada rotação à saída da câmara de pré-mistura do combustor LPP e serão realizadas por meio de duas técnicas já consolidadas em práticas de medições em fluidos: velocimetria por imagens de partículas (PIV) e anemometria a temperatura constante (ATC). As características experimentais consideradas para o escoamento correspondem a:

- Escoamento não confinado;
- Temperatura do ar de trabalho: 40°C;
- Fluxo horário de trabalho: 40NI/h (mantida constante em todo o procedimento de medição);
- Número de Reynolds: 31.800 (baseado na velocidade axial do escoamento e no diâmetro de saída da câmara de pré-mistura (ver ANACLETO et al., 2003);
- Números de *swirl* geométricos –  $S'$ : 0,88; 1,05 e 1,26.

Mesmo sob a condição de não confinamento, as características consideradas para as medições do escoamento garantem a paridade experimental deste trabalho com alguns estudos analisados no capítulo de revisões bibliográficas, pois o efeito do confinamento pode ser desconsiderado até um máximo de  $S'=1,3$ , no qual as frequências de rotação dos vórtices e, portanto, as suas estruturas, permanecem similares (SYRED, 1995), (ver Figura 3.1).

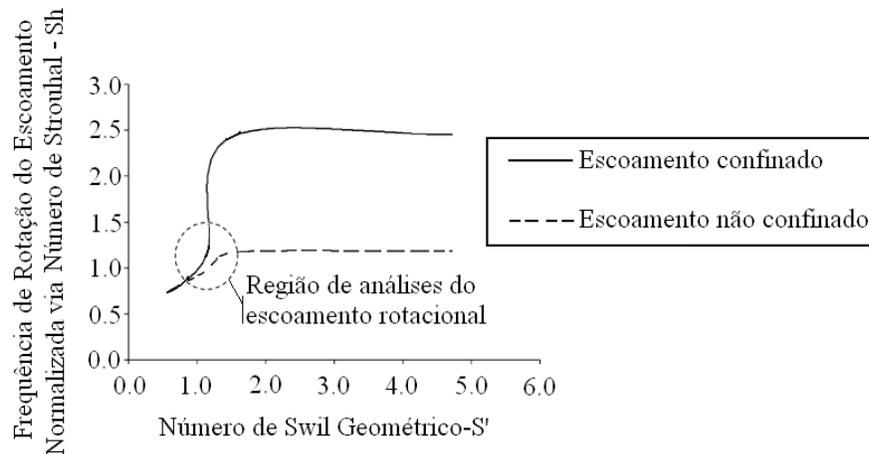


Figura 3.1 – Análise de paridade entre experimentações com escoamentos com elevado número de *swirl* ocorrendo em ambientes confinados e não confinados.

### 3.1 - SISTEMA GERADOR DE FLUXO

A Figura 3.2 apresenta o esquema do sistema experimental, ou sistema gerador de fluxo, utilizado no trabalho que é formado por um *swirler* axial e pela câmara de pré-mistura da LPP. O *swirler* foi projetado por SILVA (2003) e tem como objetivo disponibilizar uma mistura reativa à câmara de combustão e governar o processo de queima do sistema LPP, em questão, com base na variação da intensidade de rotação do escoamento. Este dispositivo foi fabricado em aço 1020 e recebeu uma película anti-corrosiva de zinco.

A sua geometria foi definida em função dos critérios de projeto da seção do difusor e em função das relações entre o adimensional número de *swirl* geométrico e os possíveis ângulos de posicionamento das pás. A Figura 3.3 (SILVA, 2003), mostra em detalhes, a estrutura interna do *swirler* e os seus componentes, que correspondem basicamente:

- Seção do difusor - recebe o ar de diluição do compressor e foi projetado de forma a minimizar as perdas de carga geradas pelo descolamento da camada limite de sua superfície interna.
- *Swirler* axial - é formado por uma estrutura externa, um corpo interno e a seção de pás dinâmicas. Corresponde ao local onde o escoamento adquire a configuração rotativa. O ângulo de giro das pás é governado por um conjunto de engrenagens formado

por uma coroa e vinte engrenagens cônicas. A coroa faz a ligação direta com as engrenagens e possui uma interface para a instalação de um sistema de controle.

➤ Medidor dos ângulos das pás - constituído por um transferidor e uma agulha (ver Figura 3.2), instalada diretamente a um eixo que recebe uma das pás. Portanto, a relação entre o valor lido no medidor e o ângulo de giro das pás é direta.

➤ Seção do injetor - componente que faz a união do *swirler* com a câmara de pré-mistura. Ele forma uma seção cônica, juntamente com o corpo interno, onde ocorre a intensificação da rotação e do deslocamento axial do fluxo, além de formar a região de pré-mistura com o combustível gasoso.

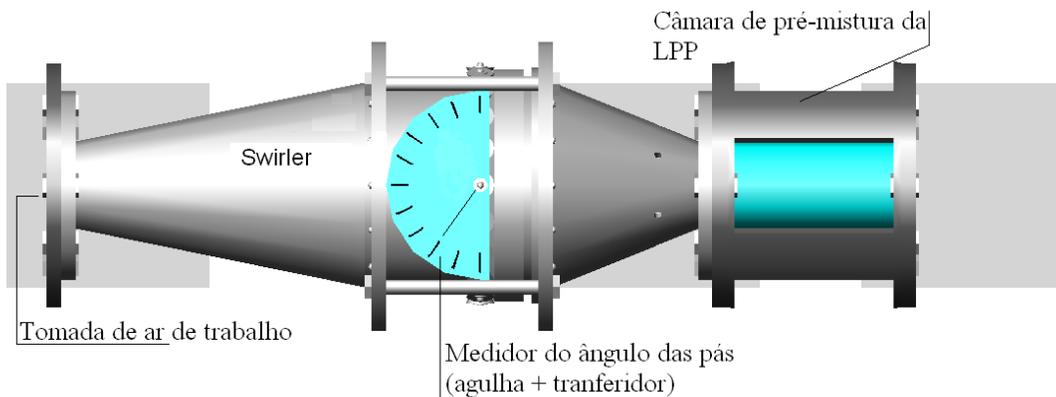


Figura 3.2 – Sistema gerador de fluxo de ar (*swirler* axial).

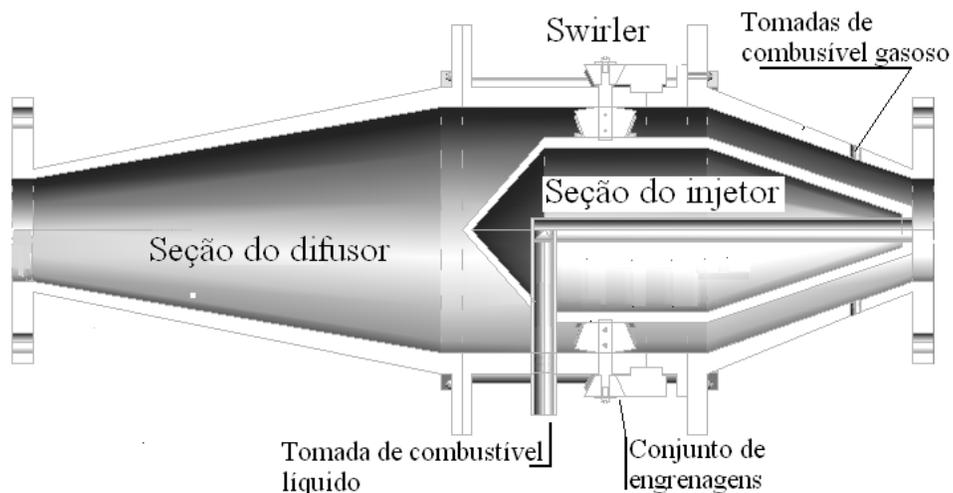


Figura 3.3 – Detalhe interno do *swirler* axial (adaptado de SILVA, L.I.C., 2003).

A câmara de pré-mistura da LPP (ver Figura 3.2) é formada, basicamente, por uma estrutura metálica com proteção anticorrosiva, suportes e por um tubo de vidro temperado para o acesso ótico ao escoamento. A conexão da câmara ao *swirler* é realizada por meio de um dos seus suportes. O seu diâmetro interno e o comprimento foram definidos, respectivamente, com base na seção de saída do *swirler* e com base em uma estimativa do tempo de residência dos reagentes.

As fotografias que detalham o *swirler* e a câmara de pré-mistura da LPP estão no Apêndice A.

## **3.2 - TÉCNICA DE VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULAS – PIV**

### **3.2.1 – Definição e princípio de funcionamento**

A técnica de velocimetria por imagem de partícula é um tipo de medição ótica que fornece campos globais de velocidades instantâneas do escoamento por meio da avaliação do deslocamento das partículas que acompanham o fluido. Este deslocamento é obtido a partir da captura da luz dispersada por estas partículas ao atravessarem uma folha de luz laser (ver Figura 3.4). Este processo ocorre tomando-se duas imagens (ou fotografias) consecutivas da mesma região no fluido e calculando a distância percorrida pelas partículas com base nestas imagens. Em um experimento de PIV deve-se iluminar o escoamento com um plano de luz laser e capturar o reflexo das partículas contidas neste escoamento por meio de uma câmara que possua um sensor CCD (*Charge Coupled Device*). O plano ótico tem de estar posicionado de forma perpendicular ao plano de laser citado (NEIVA, 2007).

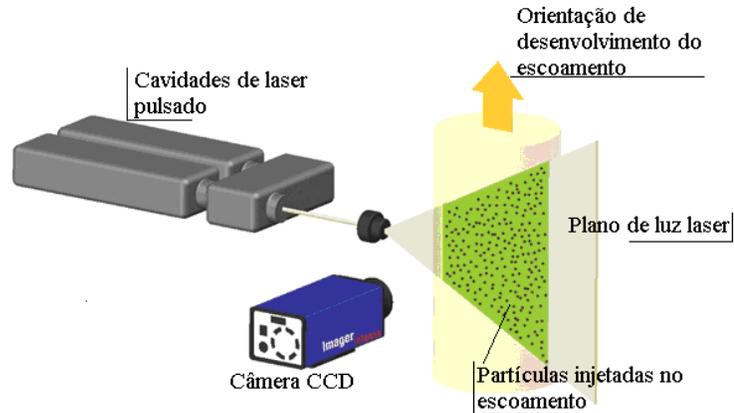


Figura 3.4 – Representação do processo de medição via PIV. (adaptado de LA VISION 2010).

Assim, em um instante de tempo, “ $t$ ”, uma partícula iluminada que ocupa a posição  $p(t)$  irá formar uma imagem (fotografia) na posição  $P(t)$  no sensor CCD da câmera, conforme descrito pela equação 3.1:

$$P(t) = g_i \cdot p(t) \quad (3.1)$$

Em que  $g_i$  é a relação de tamanho entre a imagem e o objeto no plano de luz e é calculado por meio da equação 3.2:

$$g_i = \left( \frac{d_i}{d_0 - z_i} \right) \quad (3.2)$$

Cujos termos correspondem a:

$d_i$  : tamanho da imagem;

$d_0$  ; tamanho do objeto (partícula);

$z_i$  ; distância entre o objeto e a imagem.

Devido ao intervalo  $\Delta t$  entre os pulsos de luz, esta partícula irá se deslocar para a posição  $p(t + \Delta t)$  formando, em um segundo momento, uma segunda imagem correspondente no CCD da câmera. Assim, a determinação da velocidade da partícula é

basicamente definida pelo deslocamento destas partículas nestas imagens, pelo tempo entre os pulsos de luz incidente e pela razão de tamanhos entre a imagem e o objeto, neste caso a partícula, conforme observado na equação 3.4:

$$\vec{u}(p,t) = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{\Delta p}{g_i \cdot \Delta t} \quad (3.4)$$

A técnica de PIV comparada às demais técnicas, LDA, por exemplo, fornece mapas de vetores de velocidades instantâneos e tridimensional (PIV estereoscópico). Ao contrário da técnica de velocimetria por imagens de partículas, algumas técnicas de medição perturbam o escoamento e são morosas, por outro lado o PIV apresenta as seguintes desvantagens: necessidade de partículas específicas, não considera a curvatura da trajetória de uma partícula ( $\Delta t$  pequeno) e necessita de grande exigência computacional (768 X 576 pixels a 8 bit  $\rightarrow$  840 Kb  $\rightarrow$  fluxo de dados 21 Mb/s) (LULA, 2006).

### 3.2.2 – Processamento de dados

A Figura 3.5 apresenta um esquema de processamento dos dados fotográficos em um sistema PIV. O processo consiste basicamente em subdividir cada imagem em pequenas subáreas, denominadas por áreas de interrogação – AI's. Estas áreas são definidas por um programa específico com base no interesse de resolução, e então, associadas a um vetor. O segundo processo corresponde ao cálculo da correlação cruzada entre os dados de uma subárea da primeira imagem com a respectiva subárea da imagem consecutiva. Por meio do cálculo da correlação cruzada definem-se o deslocamento na direção x, denominado por  $\Delta x$ , e o deslocamento na direção y, denominado por  $\Delta y$ . Tendo-se os valores de  $\Delta x$  e de  $\Delta y$  e a diferença de tempo,  $\Delta t$ , entre uma imagem e outra, calculam-se então, as componentes de velocidade  $v_y$  e  $v_x$  no plano iluminado do escoamento.

O deslocamento médio das partículas é observado entre as áreas de interrogação de mesma posição nas imagens 1 e 2 (ver Figura 3.6). Uma área de interrogação  $f(m,n)$  da imagem 1 é capturada em um instante de tempo  $t_0$  e a outra área de interrogação,  $g(m,n)$  da imagem 2, é capturada em um instante de tempo  $t_0 + \Delta t$ . A partir destes dados o sistema

determina um deslocamento espacial  $s(m,n)$  e uma função ruído  $d(m,n)$ , que, segundo Willert et al. (1991), pode ser o resultado direto do movimento das partículas entre as AI's que não apareceram na região  $g(m,n)$ , ou se deslocaram na direção não captada no plano analisado. Então, a partir das funções  $s$  e  $d$  calcula-se uma função deslocamento  $s'(m,n)$  estimada por meio da aplicação da correlação cruzada.

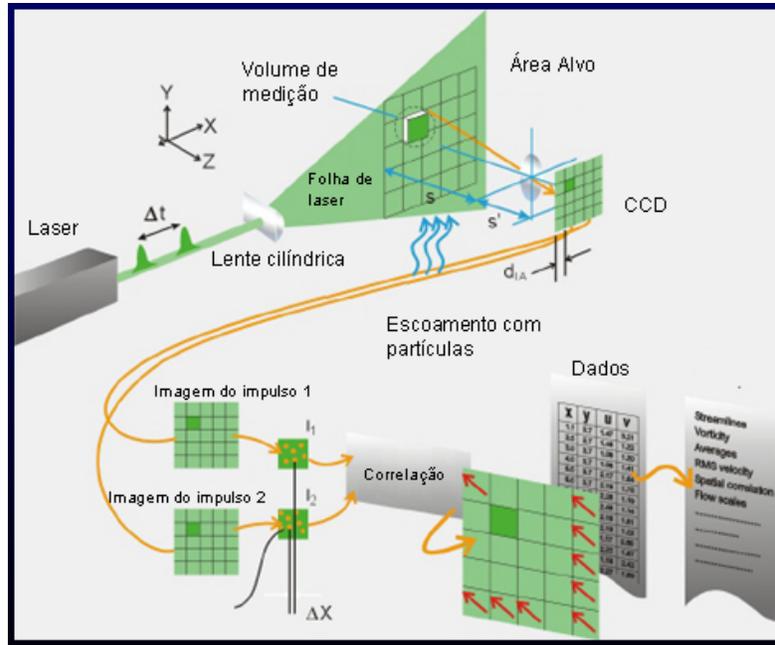


Figura 3.5 – Esquema representativo do processamento de dados da técnica de PIV (adaptado de VOGADO, 2010).

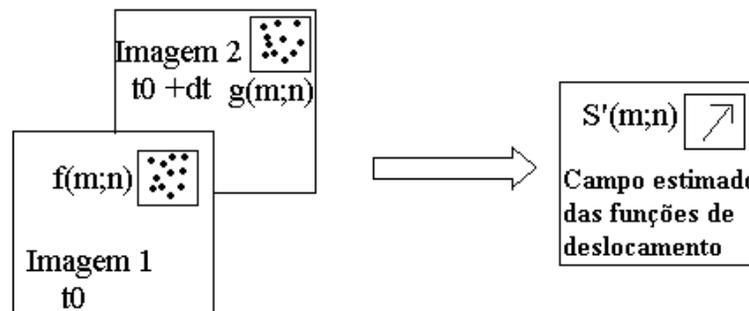


Figura 3.6 – Esquema representativo da formação da função deslocamento  $S'(m,n)$  a partir das áreas de interrogação  $f(m,n)$  e  $g(m,n)$  (adaptado de WILLERT et al., 1991).

A equação 3.5 apresenta o cálculo do deslocamento da área de interrogação  $f(m,n)$  à área de interrogação  $g(m,n)$ .

$$g(m,n) = [f(m,n) * s(m,n)] + d(m,n) \quad (3.5)$$

O símbolo (\*) corresponde a convolução espacial das funções  $f(m,n)$  e  $s(m,n)$ , o que permite reescrever a equação acima tal como apresentado na equação 3.6 (in LULA, 2006):

$$g(m,n) = \left[ \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} s(k-m, l-n) f(m,n) \right] + d(m,n) \quad (3.6)$$

A função de deslocamento  $s(m,n)$  é identificada como sendo, no caso discreto, a função delta de Dirac deslocada da origem por  $(i,j)$  unidades, que corresponde diretamente ao deslocamento das partículas. Dividindo-se este deslocamento pelo tempo correspondente ao intervalo entre os pulsos, obtém-se a velocidade média das partículas com base nas áreas de interrogação analisadas.

As boas correlações cruzadas possuem valores próximos a 1, indicando que a correlação encontrou a melhor posição para a representação vetorial do deslocamento médio das partículas entre as AI's. No esquema mostrado na Figura 3.7 observa-se um pico emergente (melhor posição) dentre os demais picos não tão expressivos, representando um o resultado de uma boa correlação dentre as baixas correlações ou dentre a presença de ruídos.

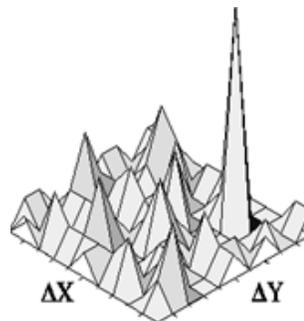


Figura 3.7 – Pico resultante da correlação cruzada dos dados contidos nas AI's das imagens 1 e 2 (adaptado de VOGADO, 2010).

O modelo estrutural de um algoritmo computacional básico para se chegar ao valor da correlação desejada, e por fim determinar o campo de velocidades, pode ser exemplificado conforme mostra o esquema da Figura 3.8. Após capturar as imagens em  $t_0$  e  $t_0 + \Delta t$  e dividi-las em áreas de interesse (correspondentes AI's) elas são analisadas de modo que as informações de intensidade luminosa presente nos pixels sejam transformadas em duas funções,  $f(m,n)$  e  $g(m,n)$ , conforme mencionado. Estas funções temporais são convertidas em funções espaciais no domínio da frequência por meio da transformada rápida de Fourier (FFT). As funções, agora no domínio da frequência,  $F(u,v)$  e  $G(u,v)$ , são utilizadas no cálculo para encontrar a maior correlação entre as imagens, resultando em uma função  $\phi_{fg}(u,v)$ , também no domínio da frequência. Aplicando-se a transformada inversa de Fourier sobre a função  $\phi_{fg}(u,v)$ , o resultado é uma função temporal  $\phi_{fg}(m,n)$  que representa o pico da correlação, bem como a sua direção e sentido. No passo seguinte calculam-se as velocidades médias dentro das AI's correlacionadas.

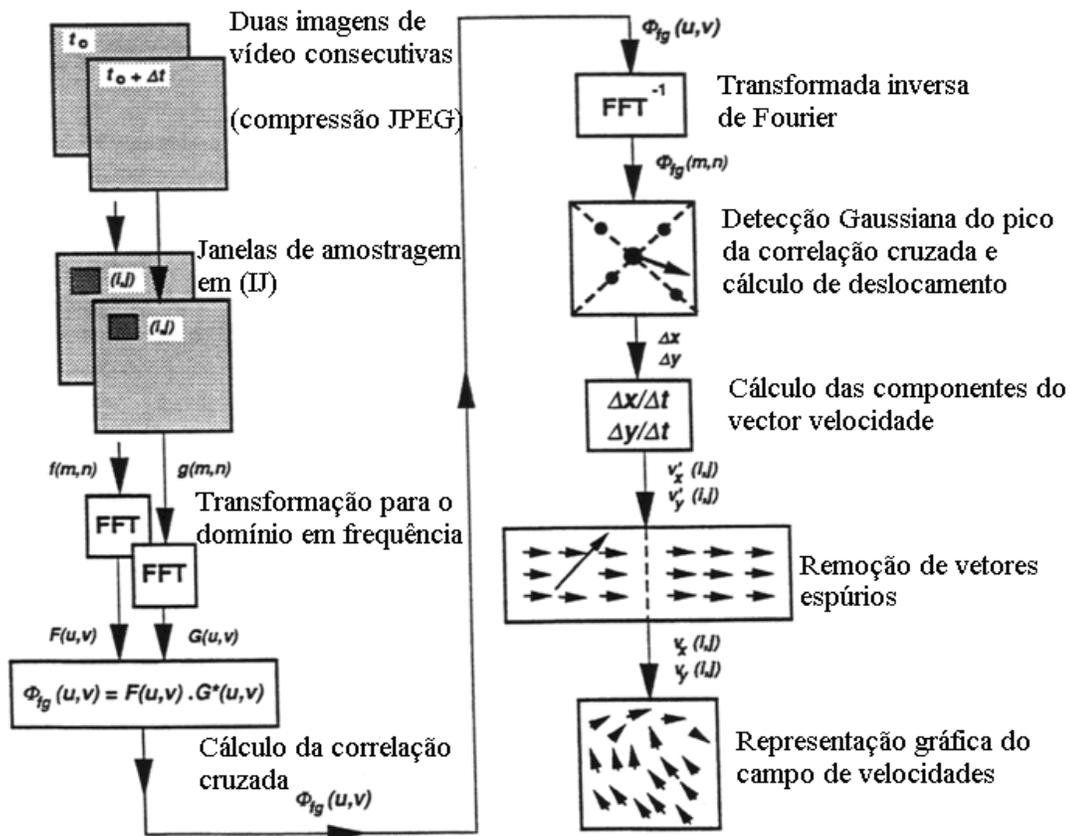


Figura 3.8 – Esquema representativo do cálculo da correlação cruzada dos dados das AI's (adaptado de VOGADO, 2010).

### 3.2.3 - Particulados

A técnica de PIV consiste de uma medição indireta do campo de velocidade do escoamento via particulados inseridos ao fluido analisado, portanto, as partículas que acompanham o fluxo são um componente crítico do sistema PIV. Elas devem ser capazes de combinar as suas propriedades com as propriedades do escoamento e se distribuírem de forma homogênea e uniforme para seguirem perfeitamente o fluxo, sem interferirem em seu desenvolvimento. Basicamente, estas partículas devem obedecer a dois requerimentos: devem ser capazes de seguirem o escoamento sem que haja excessivo deslizamento e devem funcionar como eficientes refletores da luz incidente na direção desejada.

Embora a escolha das partículas seja dependente da natureza do fluido, geralmente, nos casos de pesquisas em escoamentos isotérmicos, são utilizadas esferas de vidro, isopor, flocos de alumínio ou gotículas de óleo (se o fluido for um gás). A capacidade das partículas em seguirem o fluxo do escoamento é diretamente proporcional à diferença de densidade entre elas e o fluido, e diretamente proporcional ao quadrado do seu diâmetro.

Conforme a condição de não deslizamento imposta pelo primeiro requerimento básico pode-se avaliar a aplicação das partículas pela sua velocidade de sedimentação sob a ação da gravidade, como apresentado pela equação 3.7 (in LULA, 2006):

$$V_{sp} = \frac{g \cdot d_p^2 \cdot (\rho_p - \rho_f)}{18\mu} \quad (3.7)$$

Cujos termos correspondem a:

$V_{sp}$ - Velocidade de sedimentação da partícula;

$g$  - Aceleração da gravidade;

$d_p$  - Diâmetro da partícula;

$\rho_p$  - Massa específica da partícula;

$\rho_f$  - Massa específica do fluido;

$\mu$  - Viscosidade dinâmica do fluido

Assim, partículas com a velocidade de sedimentação desprezível em relação à velocidade do fluxo, podem ser utilizadas nos experimentos. Outra característica ligada a

este requerimento é a condição da similaridade entre a densidade do escoamento e das partículas refletoras.

Para obedecer à segunda condição obrigatoriamente tem de se utilizar partículas com boa reflexibilidade. A luz espalhada por estas partículas é dominada pela dispersão de Rayleigh e também é proporcional ao quadrado do diâmetro das partículas. Portanto, além da característica reflexiva da partícula, o seu tamanho tem de ser equilibrado com a questão sedimentar para espalhar luz o suficiente tornando possível a sua visualização com precisão dentro do plano de luz laser.

Para que o processo de medição via PIV seja considerado satisfatório, o mecanismo de atomização, ou semeadura, deve ser apropriado aos requerimentos básicos mencionados, além de oferecer um particulado homogêneo. O conceito de homogeneidade é relativo e, portanto, tem de ser definido um padrão de concentração de partículas adequado à técnica do PIV (ADRIAN, 1991).

Segundo Adrian (1991), existem três tipos de imagens que levam em consideração a densidade, ou concentração, de partículas, conforme apresentado na Figura 3.9. Na Figura 3.9-a, a quantidade de partículas permite com que um processo simples de rastreamento determine a sua localização de forma visual na segunda imagem. As imagens com esta densidade de partículas podem ser utilizadas no processamento, por exemplo, da técnica de velocimetria por rastreamento de partículas – VRP. A figura 3.9-b apresenta uma imagem considerada de média densidade. Neste nível não é mais possível identificar visualmente uma partícula no segundo instante, apenas por meios estatísticos, tal como o processamento da técnica PIV.

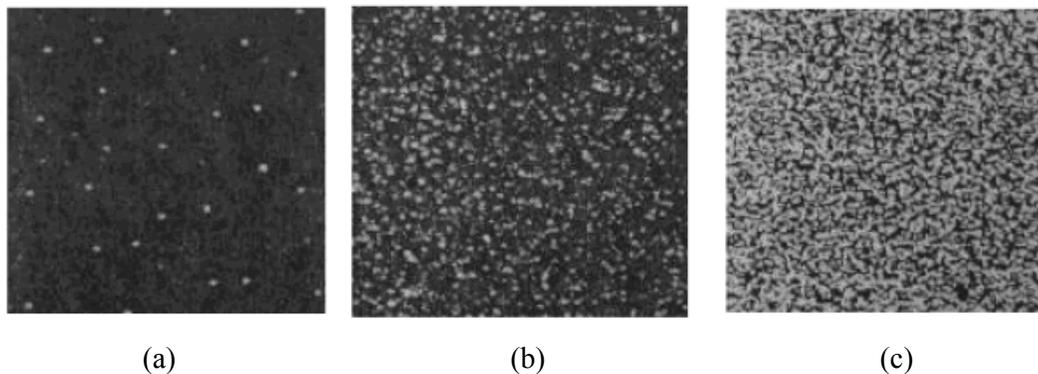


Figura 3.9 – Amostras do nível de densidade da nuvem de particulados utilizados no processo de medição (adaptado de ADRIAN, 1991).

Nas imagens consideradas de alta densidade, Figura 3.9-c, por exemplo, não é possível especificar uma partícula no primeiro e nem no segundo instante, pois ocorre uma aglomeração, ou superposição destas partículas. Nesta situação é possível medir o seu deslocamento apenas por meio de técnicas como a Laser Lpeckel Velocimetry.

### **3.2.4 – Plano de laser pulsado**

O plano de luz usualmente aplicado às medições com o PIV é o laser pulsado. Uma das razões para o uso dos pulsos de laser é a possibilidade de medições em fluxos bastante rápidos, evitando imagens tremidas ou borradas. O intervalo de tempo entre os pulsos do laser determina a resolução temporal do escoamento, pois quanto menor esse intervalo maior a possibilidade de se capturar o comportamento dos componentes de microescalas da turbulência. Os pulsos podem ter duração de 6 a 10 micro-segundos o que é suficiente para congelar qualquer movimento. Além do curto tempo dos pulsos outro importante quesito faz-se necessário ao processo de medição, o sincronismo entre a emissão do pulso de luz e a captura da imagem do escoamento. Por isso, uma câmera especial é utilizada no processo de medição.

A outra razão para o uso do laser pulsado é tornar possível focar um plano de luz tal como uma folha leve e fina o suficiente para que apenas as partículas que transitarem através deste plano sejam capturadas como imagem. Caso contrário, a luz dispersa por partículas em outros planos tornaria impossível um processo de medição com qualidade (LULA, 2006).

### **3.2.5 – Medição do escoamento**

A montagem experimental utilizada para a medição dos campos de velocidade à saída da câmara de pré-mistura da LPP está representada na Figura 3.11. As duas cavidades de laser pulsante correspondem ao sistema Nd:Yag e foram utilizadas para a formação das imagens consecutivas 1 e 2. Para a gravação destas imagens foram utilizados uma câmera digital com sensor CCD e um conjunto de lentes com um filtro passa banda da

marca Optosigma, modelo CWL 532 ± 3 nm, que permite passar somente o comprimento de onda da luz refletida pelas partículas, evitando que as imagens gravadas apresentassem ruídos resultantes de alguma luminosidade externa ao processo.

Para a formação do particulado foi utilizado uma mistura de glicerina com o corante Rodamina B para a reflexão da luz incidente. O atomizador utilizado disponibiliza partículas refletoras com uma concentração de  $10^{10}$  partículas por metro cúbico, de massa específica e diâmetro médio adequados. Estas características obedecem às condições ideais, segundo Lula (2006), para o uso em PIV. Além dos componentes do sistema de medição a figura 3.10 apresenta um compressor industrial para o fornecimento de ar, cujo controle é realizado por um variador de frequência, e um rotômetro.

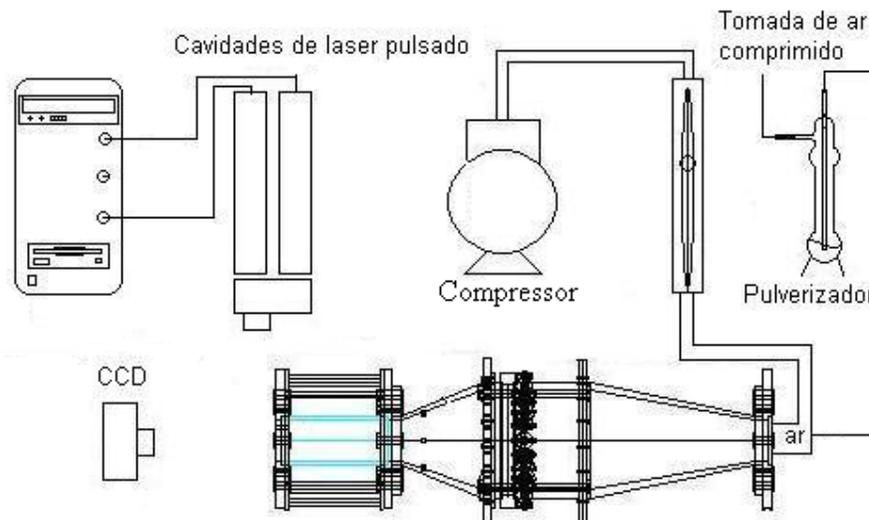


Figura 3.10 – Esquema da montagem experimental para o processo de medição via PIV.

### 3.2.5.1 – Calibração do PIV

O processo de calibração no sistema PIV consiste, basicamente, em converter as unidades de pixels na imagem às unidades do objeto real, neste caso em mm. Para tanto, foram capturadas algumas imagens no campo de medições com o uso de um papel milimetrado, posicionado no local de incidência do plano de luz laser. Dessa forma, ao se associar as unidades de pixels ao comprimento do objeto real pôde-se, de modo prático,

conseguir uma relação de conversão da velocidade registrada no sistema PIV em m/s. Neste caso a relação corresponde a 706 pixels = 50 mm.

### 3.2.5.2 – Processo de medição do escoamento

A configuração do sistema de aquisição de dados, tanto para a calibração quanto para as medições definitivas, está listada na tabela 3.1:

Tabela 3.1 – Configuração do sistema de medição do escoamento.

Grandeza	Valor
Tempo entre os pulsos de laser	1000 $\mu$ s
Q-switch	200 $\mu$ s
Frequência do laser	15 Hz
Frequência de aquisição CCD	15 Hz
Tempo de exposição CCD	66 ms
Binning	2x2
Constrast	0
Brightenss	0
Modo	Triggered

O sistema laser de duas cavidades foi posicionado de forma que o plano de luz laser se formasse a 10 mm à saída da câmara de pré-mistura da LPP e o melhor ponto focal da câmara CCD foi determinado por meio de alguns testes para definir a distância e o seu posicionamento (ver Figuras 3.12 e 3.13). As medições foram gerenciadas por meio do *software* dedicado ProVision-XS e realizadas sob os parâmetros listados na tabela 3.1. O modelo de captura das imagens corresponde ao modo *Double Exposure* no qual cada imagem é capturada em cada pulso de laser para se obter um par de imagens para o processamento. O sincronismo entre a câmara digital e o sistema laser é realizado conforme o esquema apresentado na Figura 3.11.

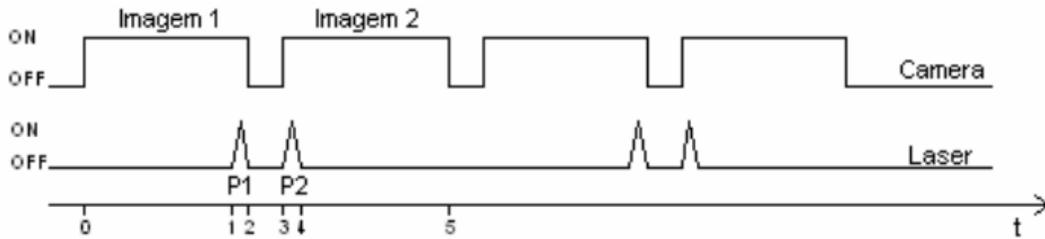


Figura 3.11 – Sincronismo entre os pulsos de laser e os momentos de captura das imagens pela câmera (adaptado de LULA, 2006).

Para a formação da primeira imagem a câmera digital começa a gravar a intensidade luminosa no tempo  $t_0$ . No tempo  $t_1$  o sistema laser dispara o pulso de laser (P1) que dura até o tempo  $t_2$  quando a câmara digital termina de gravar. A formação da segunda imagem ocorre logo após o término da gravação da primeira, no tempo  $t_3$ . Neste tempo a câmera inicia a uma nova gravação juntamente com o segundo disparo do pulso de laser (P2). O tempo do disparo do segundo pulso dura até o tempo  $t_4$  e o término da gravação da intensidade luminosa ocorre ao tempo  $t_5$ . Este mecanismo garante o sincronismo ideal entre a câmera digital e o sistema laser e, por conseqüência, garante uma boa qualidade das imagens geradas. O controle do sincronismo é realizado pelo sincronizador X-Stream Timming Hub auxiliado pelo *software* ProVision-XS, que acompanha o sistema PIV.

Após a gravação, cada imagem foi dividida em áreas de interrogação de  $70 \times 70$  pixels e as componentes de velocidade a serem analisadas foram definidas, via *software*, como sendo a velocidade tangencial- $\bar{V}$  e radial- $\bar{W}$ , correspondendo ao movimento médio das partículas em cada AI. Ou seja, apenas os vetores ocorrentes às direções tangencial e radial serão analisados (ver detalhe na figura 3.13). O processamento das imagens permitiu, então, obter visualizações em duas dimensões.

As primeiras aquisições foram realizadas para se obter o zero hidrodinâmico do escoamento e assim identificar a posição zero no marcador de ângulo das pás do *swirler* (ver Figura 3.1). O zero hidrodinâmico corresponde à condição em que o escoamento apresenta o mínimo de perturbação (rotação) e, portanto, o marcador deve mostrar o ângulo zero. Na primeira análise, com a agulha do marcador mostrando o ângulo de  $-5^\circ$ , observou-se um campo de velocidades com atividade tangencial ocorrendo na banda esquerda da imagem e ao centro, conforme observado na Figura 3.14. A Figura 3.15 apresenta o resultado de uma medição com a marcação em  $0^\circ$ . Observa-se que a movimentação tangencial é próxima de zero, indicando um escoamento praticamente sem

rotação. Com a agulha do marcador mostrando o ângulo de  $5^\circ$ , observa-se que a movimentação tangencial passa a ocorrer na banda direita da imagem e, novamente, ao centro (ver Figura 3.16).

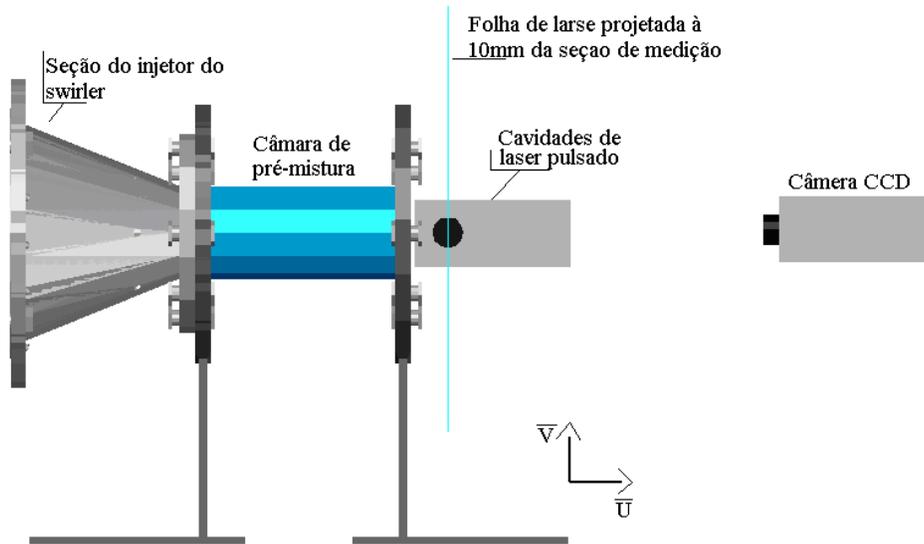


Figura 3.12 – Posicionamento do plano de luz laser e da câmera CCD.

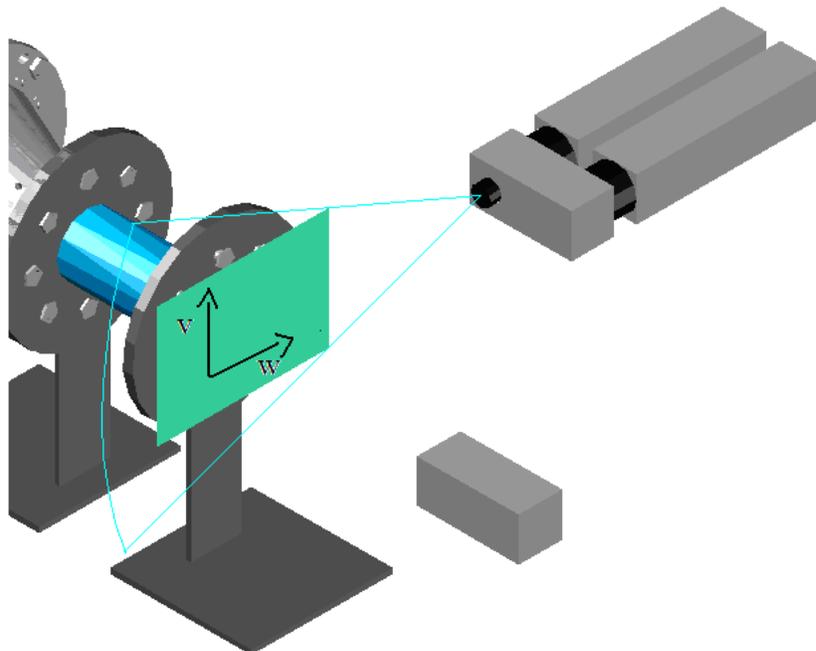


Figura 3.13 – Segunda perspectiva apresentando o posicionamento do plano de luz laser e da câmera CCD.

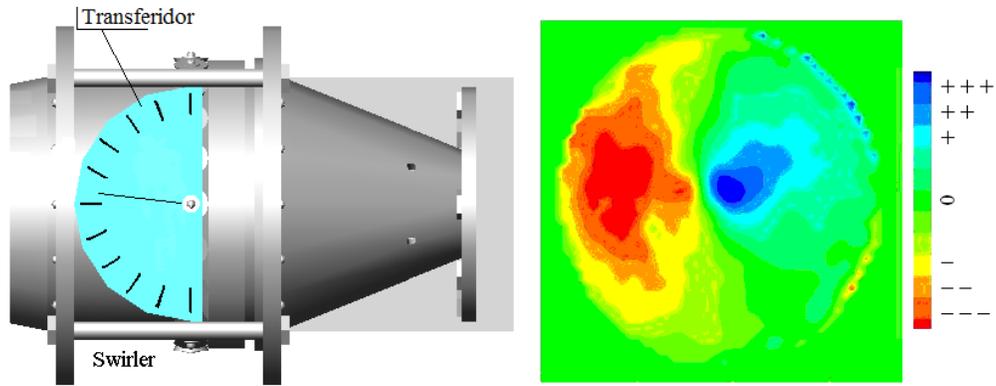


Figura 3.14 – Vista transversal do escoamento em teste para localizar o zero hidrodinâmico do escoamento  $\theta = -5^\circ$ .

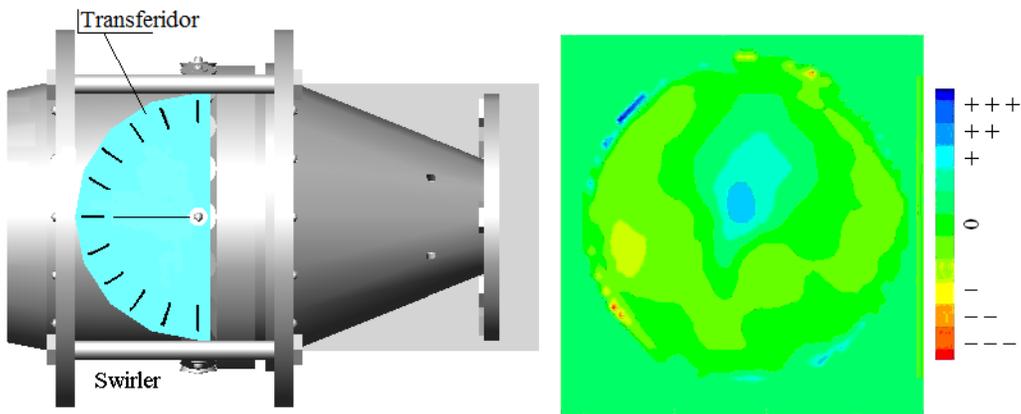


Figura 3.15 – Vista transversal do escoamento em teste para localizar o zero hidrodinâmico do escoamento  $\theta = 0^\circ$ .

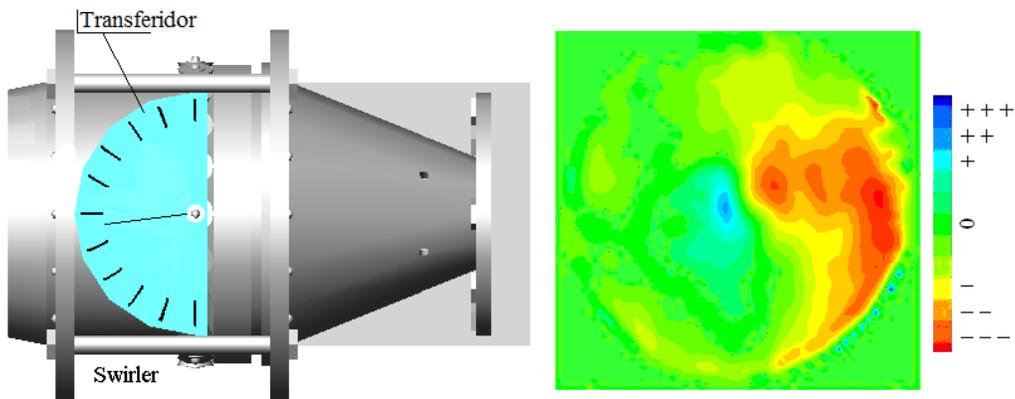


Figura 3.16 – Vista transversal do escoamento em teste para localizar o zero hidrodinâmico do escoamento  $\theta = 5^\circ$ .

O resultado obtido com o ângulo zero demonstra ser o mais próximo do zero hidrodinâmico do escoamento, indicando que o sistema de medição de ângulos do *swirler* está correto. Portanto, todas as medições com o PIV e com a técnica de ATC levam em consideração o ângulo zero no medidor de ângulos do *swirler* como o ponto de menor interferência das pás no escoamento.

Definidos os parâmetros experimentais foram realizadas três medições, conforme a disposição dos dispositivos apresentados na Figura 3.12, uma para cada número de *swirl* geométrico, 0,88; 1,05 e 1,26, que correspondem aos respectivos ângulos de inclinação das pás do *swirler*:  $\alpha = 45^\circ$ ,  $50^\circ$  e  $55^\circ$  a partir do ângulo zero.

### **3.3 - A TÉCNICA DE ANEMOMETRIA A TEMPERATURA CONSTANTE - ATC**

#### **3.3.1 - Definição**

A anemometria a temperatura constante (ATC) é uma técnica intrusiva que utiliza um equipamento denominado anemômetro, oferece resultados seguros e é considerada de fácil manipulação. Apesar de a palavra anemometria originalmente significar medição do vento, esta técnica também é aplicável à medição da velocidade do escoamento de outros fluidos (CRUZ, 2003). A ATC apresenta boa sensibilidade do sinal e uma resposta de frequência adequada, o que torna possível o estudo de escoamentos turbulentos. Os dados obtidos são, por natureza, normalizados, e por isto permitem apenas o registro direcional do escoamento. Mesmo sendo uma técnica intrusiva a ATC fornece informações precisas aos cálculos das propriedades aerodinâmicas do escoamento, em função das suas características: pequeno tamanho das sondas e disponibilidade de informações no domínio do tempo.

O componente primário de um anemômetro é a ponte de Wheatstone que corresponde a um circuito capaz de corrigir o valor da tensão no caso de uma variação/desequilíbrio (ver Figura 3.17). Esta variação ocorre quando um dos resistores realiza a troca de calor com o meio fluido, o qual se quer medir a velocidade, pois nesta condição o valor da resistência do elemento em contato é alterado e, conseqüentemente, provoca a mudança de valor da tensão  $e_0$ .

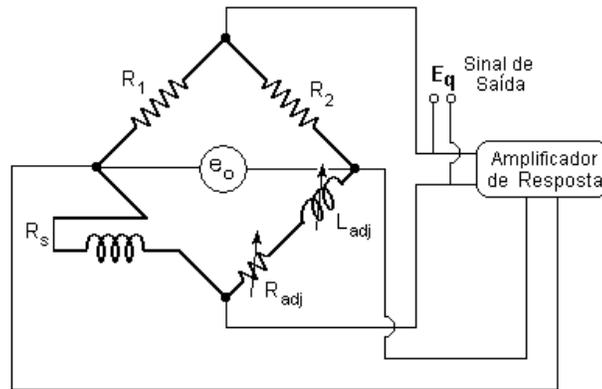


Figura 3.17 – Ponte de Wheatstone de um anemômetro a temperatura constante (Modificado de Cruz,2003).

Quando o valor da resistência é alterado, um amplificador de resposta corrige a tensão de alimentação da ponte Wheatstone de forma a trazê-la novamente ao equilíbrio, fazendo com que, em um processo de medição, a resistividade e a temperatura dos elementos resistores mantenham-se praticamente constantes.

Além dos resistores, a ponte apresenta um indutor ajustável ( $L_{adj}$ ), para compensação da resistência imposta pelos cabos de ligação do fio sensor, e um resistor ajustável ( $R_{adj}$ ), para que se possa aumentar a temperatura do fio a valores superiores aos da temperatura do escoamento onde o sensor esteja inserido.

Uma sonda anemométrica comum é composta por duas agulhas (ou hastes), por um fio sensor soldado a elas, por um corpo e por dois contatos (ver Figura 3.18). Tanto as agulhas de suporte quanto os contatos são recobertos com ouro ou platina para se reduzir ao máximo a sua resistência. O corpo da sonda é feito em material cerâmico ou epóxi e o fio sensor é construído em liga de platina para adquirir uma elevada temperatura de fusão e alta resistência à corrosão. Contudo, sua resistência mecânica é baixa, especialmente em temperaturas elevadas.

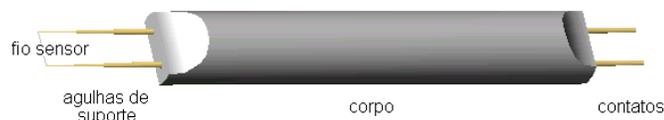


Figura 3.18 – Sonda anemométrica. (Modificado de CRUZ,2003).

Há duas características desejáveis no material do fio sensor: altos coeficientes térmicos de resistividade ( $\alpha_r$ ) e a resistividade elétrica. A primeira característica indica a variação da resistividade do sensor quando se eleva a temperatura ambiente em 100°C, portanto, quanto maior for o seu valor, mais sensível será o anemômetro. A segunda característica é uma função da diferença entre as temperaturas ambiente e a de referência, conforme indicado pela equação 3.8.

$$R_s = R_0 \cdot [1 + \alpha_r \cdot (T_a - T_{ref})] \quad (3.8)$$

Em que:

$R_s$ : resistividade do fio sensor à temperatura ambiente;

$R_0$ : resistividade do fio sensor à temperatura de referência;

$\alpha_r$ : coeficiente térmico de resistividade

$T_a$ : temperatura ambiente;

$T_{ref}$ : temperatura de referência.

### **3.3.2 - Caracterização experimental do escoamento**

#### **3.3.2.1 – Calibração dos anemômetros**

Para se medir o campo de velocidades do escoamento os anemômetros precisam ser calibrados de acordo com as propriedades da sonda anemométrica e do fluido o qual se quer medir a velocidade. O processo de calibração consiste em obter o polinômio de operação utilizado na conversão do sinal lido nas medições em valores de velocidades médias do escoamento. Neste trabalho será realizado o procedimento de calibração estático dos anemômetros, que consiste em relacionar a intensidade do sinal de resposta do sensor com a variação da velocidade do escoamento (fenômeno de interesse), (CRUZ, 2003).

As medições dos campos de velocidades serão realizadas por meio de dois anemômetros de fio quente. Portanto a configuração experimental utilizada no processo de calibração (ver Figura 3.19) consiste de dois anemômetros da marca Dantec, modelo Mini

CTA 54T30, uma sonda anemométrica de dois fios sustentada por um suporte do tipo longo em ângulo reto (ver Figura 3.20), do aparato de calibração DISA 55D090 (bocal e controlador do escoamento de ar), de um manômetro digital, além de cabos e conectores diversos. Os anemômetros trazem um *software* dedicado ao processamento dos sinais de velocidade.

No interior do aparato de calibração há um estabilizador de fluxo, cuja função é tornar o escoamento de ar laminar, além de filtros especializados que impedem a passagem de partículas suficientemente grandes que poderiam danificar a sonda. Para o fornecimento do ar de calibração foi utilizada uma das tomadas de ar comprimido disponível no laboratório de combustão, o que gerou a vantagem de se poder trabalhar com um escoamento sem pulsações.

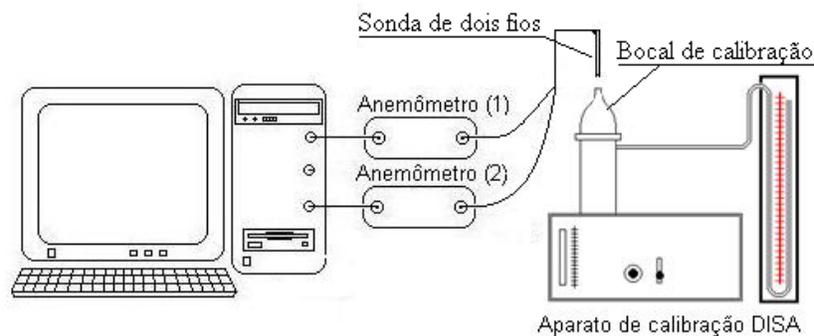


Figura 3.19 – Esquema experimental para a calibração dos anemômetros.

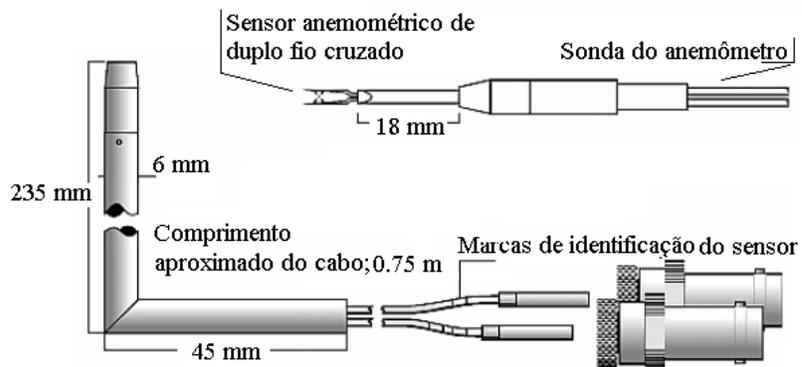


Figura 3.20 – Detalhe da sonda e do suporte. Características dos fios do sensor; 90% Platina, 10% Tungstênio,  $\varnothing$  5 $\mu$ m. O suporte é do tipo 55H24 (adaptado do manual do fabricante – DANTEC).

No processo de calibração dos anemômetros os valores de velocidade do escoamento são determinados, principalmente, com base na temperatura deste escoamento. Definida a temperatura de calibração foram calculados os valores de velocidades por meio da equação da conservação da energia aplicada entre as extremidades do bocal de calibração (ver figura 3.21), sendo definida conforme a equação 3.9 (in CRUZ, 2003).

$$u_0 = \sqrt{2 \cdot \frac{\gamma \cdot R}{\gamma - 1} \cdot T_0 \cdot \left[ \left( \frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]} \quad (3.9)$$

Em que;

$u_0$  – velocidade do escoamento à saída do bocal;

$\gamma$  – coeficiente isentrópico;

$R$  – constante universal dos gases;

$T_0$  – temperatura à saída do bocal;

$P_0$  – pressão à saída do bocal;

$P_1$  – pressão à base do bocal

Segundo o fabricante, o bocal foi especialmente projetado de forma que as perdas de carga por atrito em suas paredes e os efeitos de compressibilidade sejam, praticamente, desconsiderados.

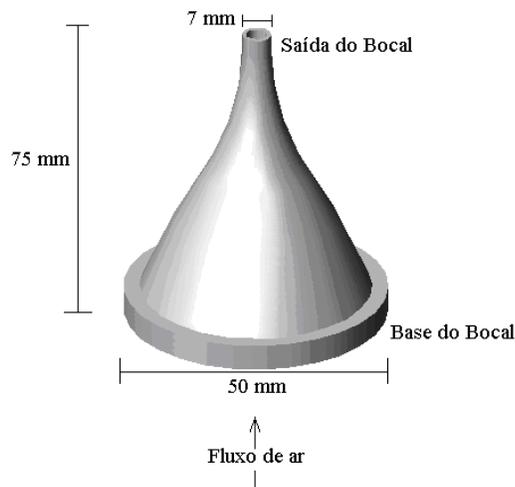


Figura 3.21 – Bocal de calibração dos anemômetros (adaptado de CRUZ, 2003).

Portanto, nos cálculos das velocidades do ar de calibração levou-se em consideração a diferença entre a pressão atmosférica local (ou de referência), a pressão do escoamento lida à base do bocal de calibração ( $\Delta P$ ), e a da temperatura ambiente.

Para se determinar a temperatura à saída do bocal de calibração considerou-se a temperatura ambiente. A temperatura local foi estabilizada por meio do sistema de condicionamento de ar do laboratório e o valor utilizado no processo de calibração resulta de três medições realizadas em pontos diferentes deste laboratório. Com relação ao valor de pressão à saída do bocal foram considerados três valores de pressão atmosférica lidos no barômetro instalado no próprio laboratório. Portanto, os dados ambientais de entrada para a calibração dos anemômetros correspondem a:

- Pressão atmosférica ( $P_0$ ):  $(674,3 \pm 2,05)mmHg$
- Temperatura ambiente ( $T_0$ ):  $(22,0 \pm 0,80)^\circ C$

O nível de tensão aplicado aos fios do sensor foi ajustado com base em suas características resistências térmica e elétrica, que foram informadas pelo fabricante dos anemômetros, e com base na temperatura e pressão do fluido. Como os dois fios devem trabalhar superaquecidos em relação ao escoamento, as suas resistências de trabalho são ajustadas nos anemômetros via um fator de sobreaquecimento. O processo de ajuste da tensão é realizado por meio de uma tabela de seleção e adaptação deste valor (Apêndice A) conforme determinado pelo fabricante dos anemômetros. Após ajustar os valores das resistências, a sonda é colocada à saída do bocal de forma que o sensor esteja posicionado frontalmente em relação ao fluxo de ar, no centro desta saída. Assim, as áreas de contato dos dois fios do sensor com o ar se tornam as mesmas, permitindo calibrar o sinal dos anemômetros sob as mesmas condições.

O tempo e a frequência adotados para a medição do processo de calibração foram, respectivamente, 10s e 10 kHz. Levando-se em consideração que o escoamento medido neste processo é praticamente laminar, pode-se afirmar que os parâmetros de tempo e frequência garantem valores satisfatórios de médias de velocidades.

As curvas de calibração dos anemômetros foram levantadas por meio dos valores de velocidades de calibração em função dos valores de tensão associados. A faixa de velocidades aplicada no processo de calibração corresponde a 0 - 25 m/s. A partir das curvas foram gerados dois polinômios de calibração de quarto grau, cuja escolha do grau

foi baseada no coeficiente de correlação entre a linha de tendência e a curva de calibração. Os valores dos coeficientes de correlação  $R^2$  correspondem a 0.99 para as duas curvas, indicando que elas são coerentes à aplicação de conversão do sinal elétrico em valor de velocidade do escoamento.

A Figura 3.22 apresenta as curvas de calibração dos anemômetros. Observa-se que a partir do ponto de velocidade zero do escoamento, a menor alteração no fluxo de ar causa um súbito aumento da tensão, conforme o registrado pelo anemômetro. Segundo Cruz, (2003), o salto entre o primeiro e o segundo ponto das curvas é uma característica peculiar do processo de medição com o ATC. Este fato é atribuído a certas características dos componentes eletrônicos do anemômetro, mas se deve também ao nível de precisão do aparato de calibração.

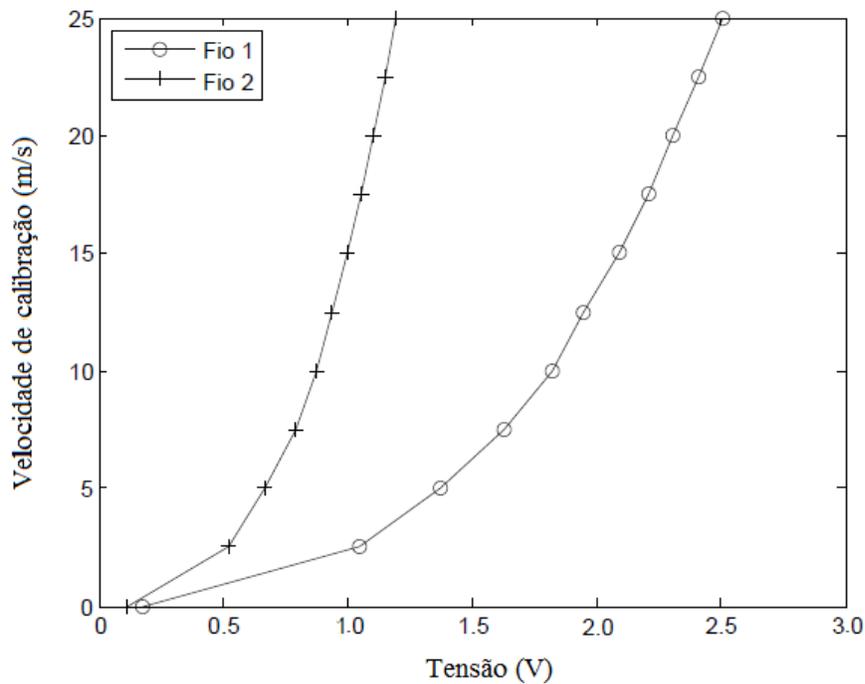


Figura 3.22 – Curvas de calibração dos anemômetros.

Como o processo de medição do fluxo ocorre em um escoamento de uma única fase, sem variações bruscas de densidade, temperatura e pressão, assegurou-se, então, que a sonda suportaria todo o processo de medição sem alterar as suas características mecânicas, térmicas e condutoras de energia elétrica. Quanto à manutenção da calibração com as

paradas e retorno das operações, houve o cuidado em pré-aquecer os anemômetros por uma hora antes dos procedimentos, além de estabilizar a temperatura de saída da câmara de pré-mistura conforme a temperatura de calibração.

Para a estimativa de erro atribuído às medições nos processos de calibração e de medição do escoamento via ATC consideraram-se os intervalos de 10 a 20%, conforme observados em Cruz (2003), em função da equivalência de equipamentos e condições de contorno do processo de calibração. A repetibilidade do anemômetro foi verificada no processo de calibração, obtendo-se um desvio médio de 2% entre as coletas.

### **3.3.2.2 – Processo de medição do escoamento**

A figura 3.23 apresenta o sistema experimental utilizado no levantamento do campo de velocidades a saída da câmara de pré-mistura. Para o processo de medição utilizou-se o ar de trabalho fornecido por um compressor, ao invés de uma das tomadas de ar do laboratório, a fim de suprir a demanda de vazão necessária. As medições foram realizadas a 10 mm da saída da câmara de pré-mistura, tal como nos procedimentos via PIV, e o campo de velocidades foi levantado com base em 17 pontos equidistantes, na direção horizontal, conforme apresentado nas Figuras 3.23; 3.24 e 3.25.

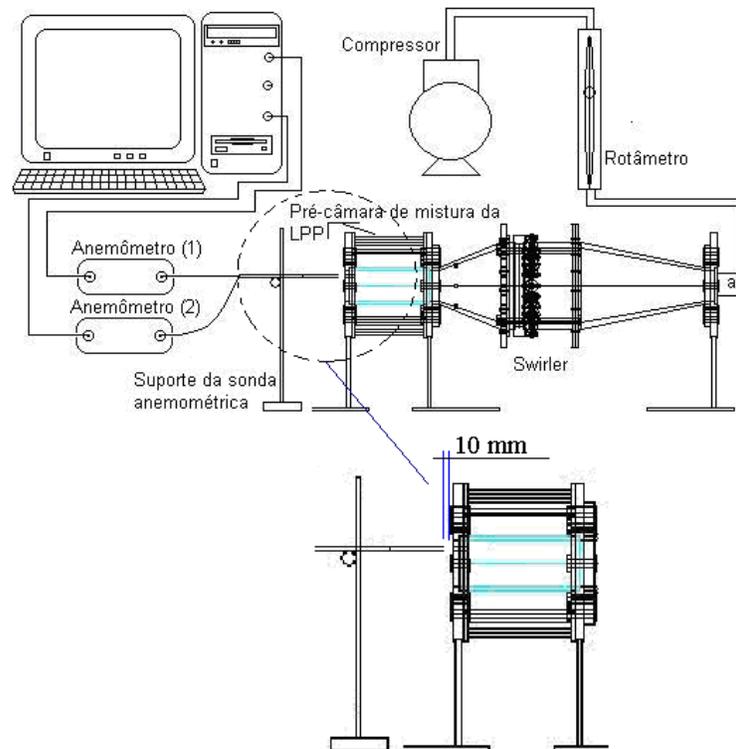


Figura 3.23 – Esquema experimental para a aquisição do campo de velocidades via ATC e posicionamento da sonda anemométrica na região de medição do escoamento.

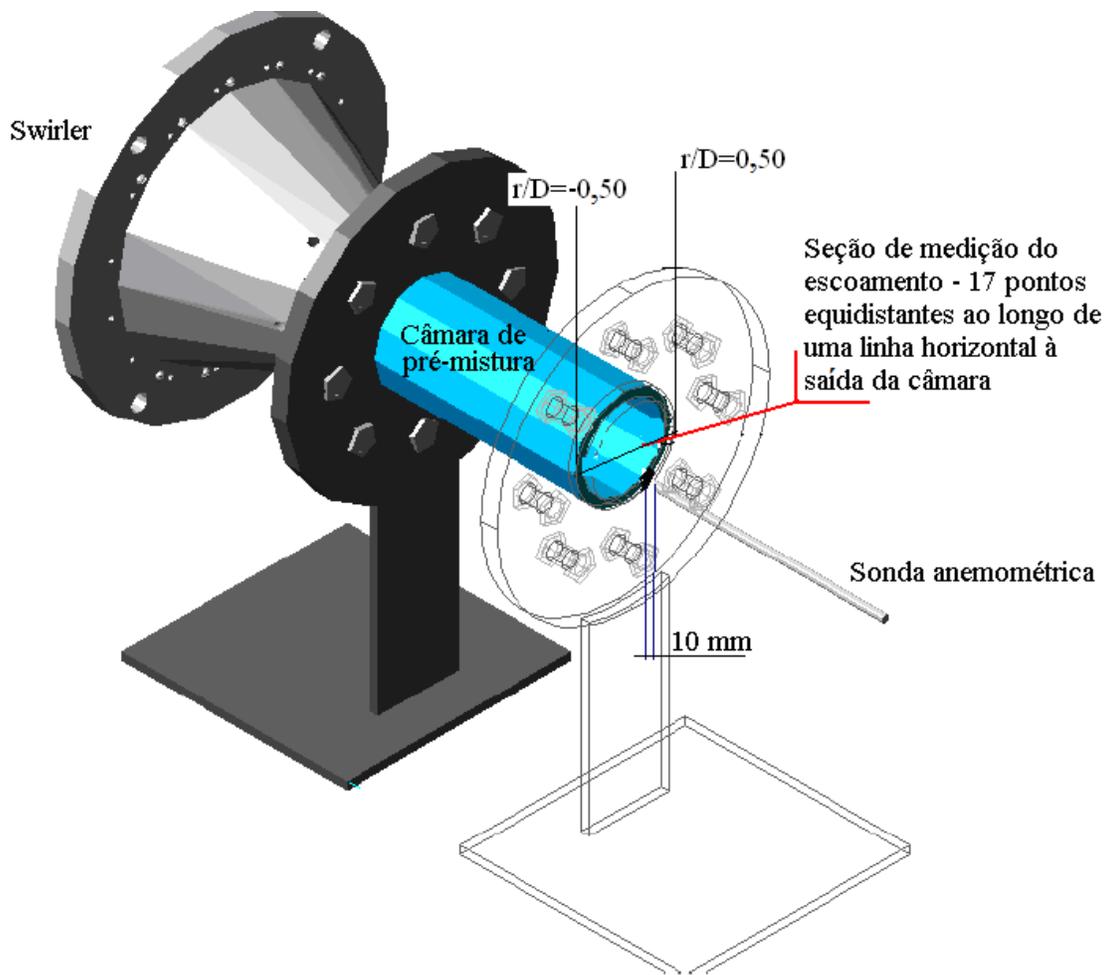


Figura 3.24 – Posicionamento da sonda no campo de medições com ênfase aos 17 pontos de aquisição das velocidades do escoamento.

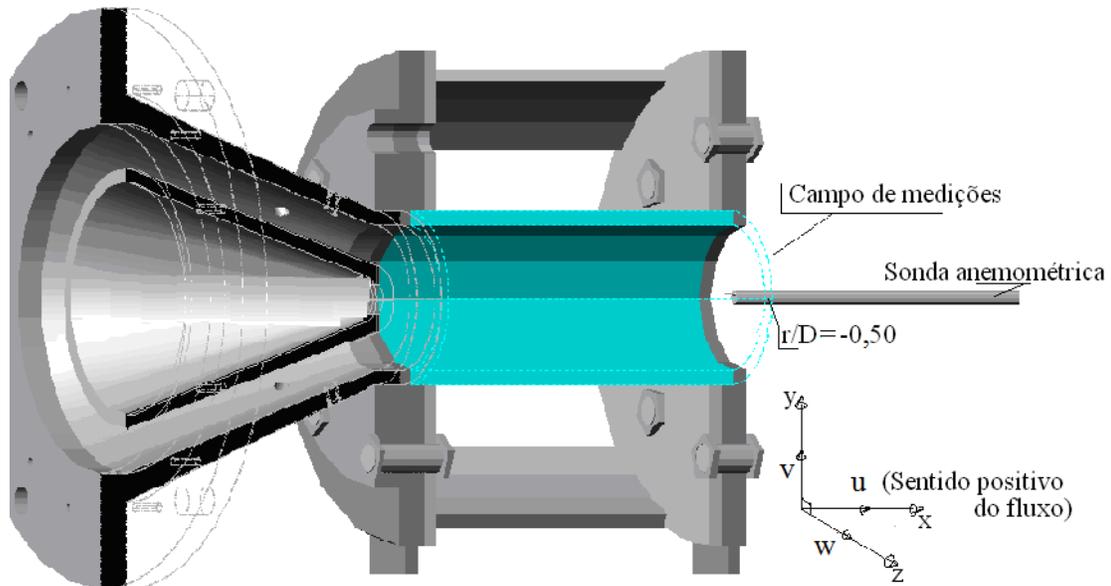


Figura 3.25 – Detalhe do injetor do *swirler*, da câmara de pré-mistura da LPP e da sonda anemométrica para a adoção das direções consideradas neste trabalho.

Em se tratando de medições em escoamentos rotacionais, para se medir o campo de velocidades, com suas correspondentes flutuações, existem basicamente dois modos de se empregar a técnica de anemometria a temperatura constante:

- 1 Técnicas de multisondas (“*n*” sondas de fio único);
- 2 Técnicas de multiorientações (multiposições), por meio de uma sonda simples ou uma sonda com dois ou mais fios.

A primeira técnica tem duas desvantagens consideráveis. Ela é significativamente mais complexa que a técnica de multiposição, pois exige um sofisticado sistema eletrônico de processamento de sinal para lidar com as variadas voltagens instantâneas do anemômetro. Outro ponto importante a ser considerado nesta técnica é o tamanho do corpo da sonda e a quantidade de sondas usadas nas medições, pois podem provocar distúrbios significantes no campo de velocidade do escoamento. Usando somente uma sonda simples de um único fio, ou com duplo fio, os efeitos dos distúrbios são consideravelmente reduzidos, tornando possível obter resultados mais confiáveis (FITOURI et al., 1995).

A técnica de multiorientações consiste em calcular os dados de velocidade do escoamento com base nos valores das velocidades efetiva de resfriamento do(s) fio(s) do sensor anemométrico, em função de diferentes ângulos de rotação ( $\beta$ ) (ver Figura 3.26),.

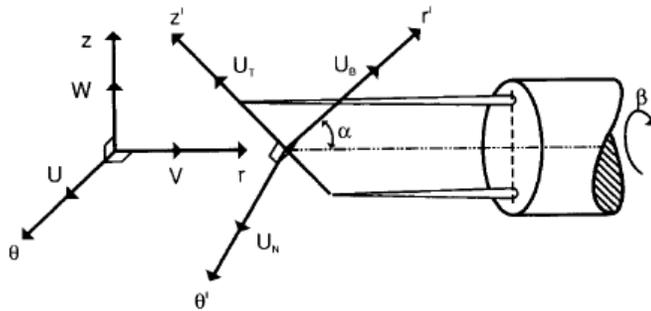


Figura 3.26 – Possibilidade de multiposicionamento da sonda anemométrica para o processo de aquisição levando em conta a mudança de referência espacial em função do ângulo de giro  $\beta$  (adaptado de FITOURI et al., 1995).

Fitouri et al. (1995) utilizou o método de multiorientação (multiposição) da sonda do ATC para mensurar as velocidades do escoamento nas direções axial, tangencial e radial, além das respectivas tensões de Reynolds, para diferentes valores de  $(\beta)$ . Este processo é possível uma vez que o vetor velocidade poder formar qualquer ângulo espacial com a sonda anemométrica em um escoamento tridimensional. Neste caso, o sinal da sonda anemométrica é usualmente direcionado em função do sistema de coordenada do fio sensor conforme mostrado na Figura 3.26.

Para a aplicação do método de multiposição da sonda foi adotada, neste trabalho, a orientação espacial conforme mostrado na Figura 3.25, na qual o escoamento se desenvolve (axial-u, tangencial-v (ou rotativo) e radial-w (ou expansiva)). Para o processo de medições levou-se em consideração o ângulo de giro ( $\beta$ ) do sensor anemométrico, conforme o estabelecido nas Figuras 3.27 e 3.28, para capturar os dados de velocidade efetiva de resfriamento dos fios. A primeira série de medições foi realizada com o ângulo de giro  $\beta = 0$  e a segunda série foi realizada com  $\beta = 90^\circ$ . Observa-se, nos detalhes das figuras, que a participação do escoamento axial no processo de resfriamento efetivo dos fios independe do posicionamento ( $\beta ; r/D$ ) do sensor no campo de medições.

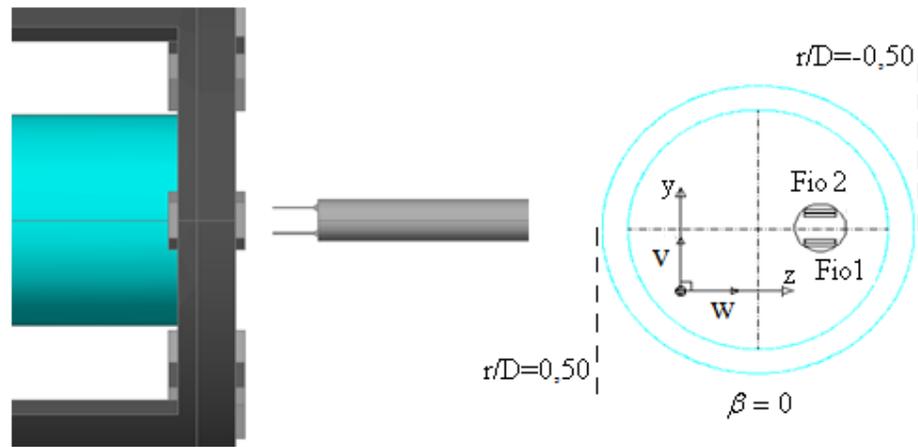


Figura 3.27 – Sensor anemométrico posicionado à saída da câmara de pré-mistura com o ângulo de giro  $\beta = 0$ , com ênfase à disposição dos fios sensores dos anemômetros.

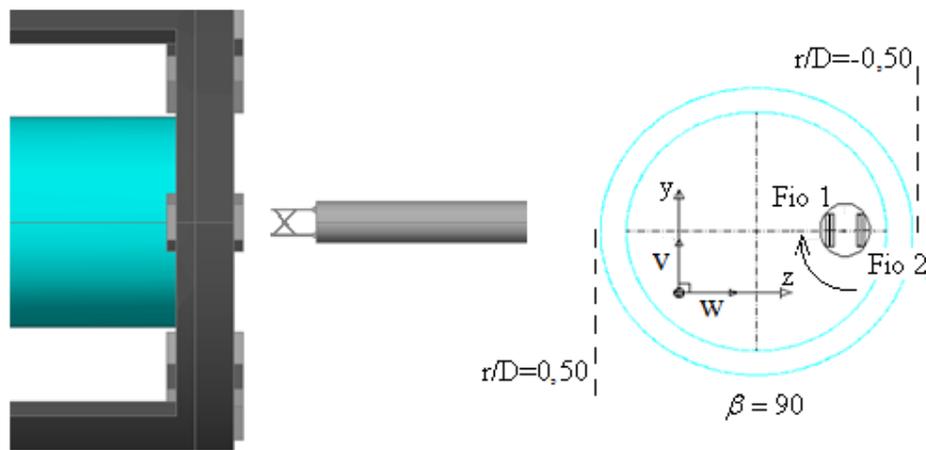


Figura 3.28 – Sensor anemométrico posicionado à saída da câmara de pré-mistura com o ângulo de giro  $\beta = 90^\circ$ , com ênfase à disposição dos fios sensores dos anemômetros.

Conforme mencionado anteriormente, as medições foram realizadas com  $S' = 0,88$ ; 1,02 e 1,26. A frequência e o tempo para aquisição dos valores de tensão foram os mesmos utilizados no processo de calibração, 10 kHz e 10 s respectivamente, gerando um total de 100000 dados por ponto medido, para assegurar a captura das estruturas de interesse do escoamento.

### 3.3.2.2.1 – Caracterização do campo de velocidades

Como mencionado, a obtenção do campo de velocidades do escoamento em questão parte de uma análise dos dados de velocidade efetiva de resfriamento dos fios sensores do ATC, tal como proposto por Fitouri et al. (1995). Para tanto, considera-se um conjunto de parâmetros que influenciam, significativamente, o processo de medição destes dados, sendo eles: as características geométricas do sensor, às direções e sentidos de desenvolvimento aerodinâmico do escoamento e o posicionamento ( $\beta$  ;  $r/D$ ) do sensor no campo de medições (ver Figuras 3.29 e 3.30).

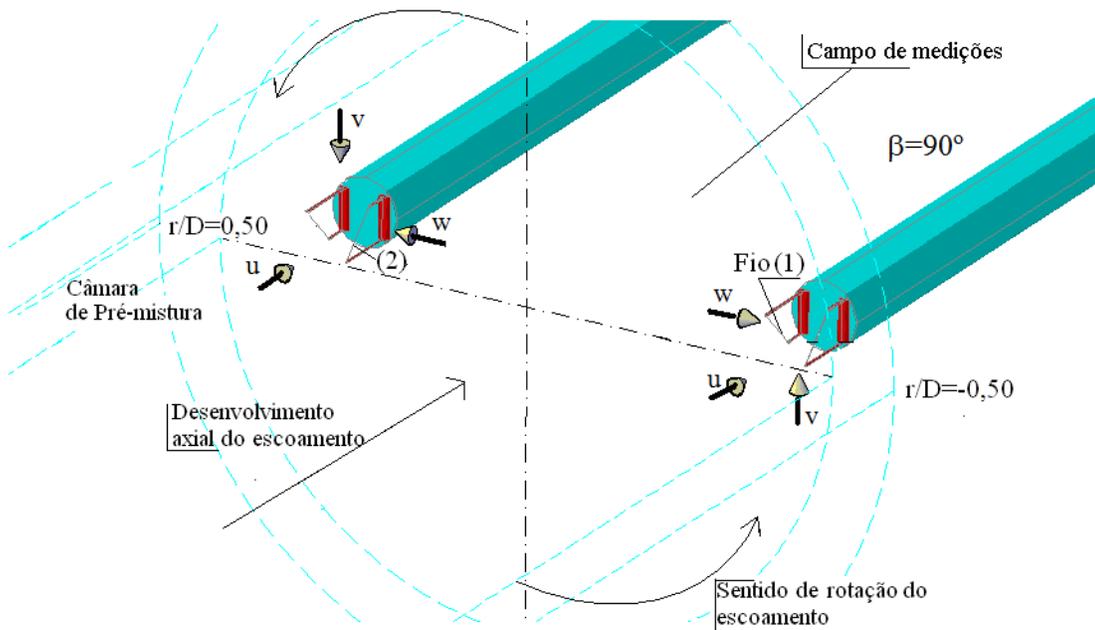


Figura 3.29 – Processo de medição dos valores de velocidade efetiva de resfriamento dos fios sensores em função do ângulo de giro  $\beta = 90^\circ$ . Detalhes do desenvolvimento espacial do escoamento rotativo.

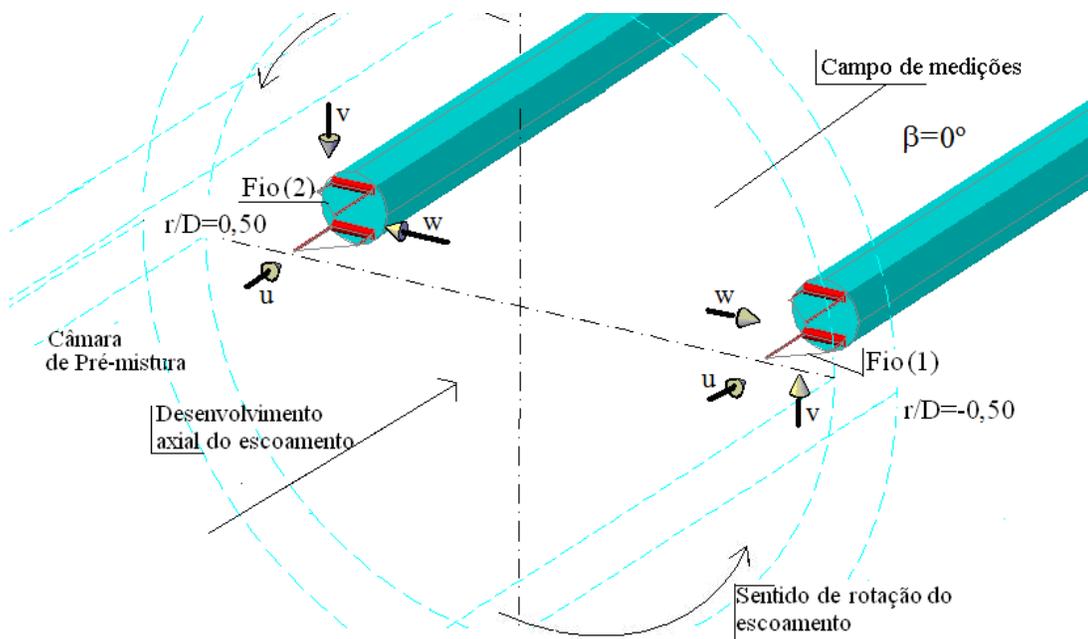


Figura 3.30 – Processo de medição dos valores de velocidade efetiva de resfriamento dos fios sensores em função do ângulo de giro  $\beta = 0^\circ$ . Detalhes do desenvolvimento espacial do escoamento rotativo.

Iniciando-se o processo de medição para uma dada rotação de referência,  $S'$ , e para os respectivos ângulos de giro  $\beta = 90^\circ$  e  $0^\circ$ , obtêm-se as curvas relativas à velocidade efetiva de resfriamento dos fios sensores ( $Verf$ ), tal como apresentadas nas Figuras 3.31 e 3.32. Observa-se uma modificação no desenho das respectivas curvas ao cruzarem o centro do campo de medições ( $r/D = 0,0$ ). Na Figura 3.31, por exemplo, constatam-se que os valores de velocidade efetiva de resfriamento do fio 1 decrescem, expressivamente, ao longo de todo o percurso ( $r/D = -0,5$  à  $r/D = 0,5$ ), para  $\beta = 90^\circ$ . Mesmo em um escoamento predominantemente rotativo às extremidades do campo de medições.

Se tomarmos o escoamento rotativo como um corpo sólido, conclui-se que a geração dos valores que compõem as curvas ocorre em função, apenas, do posicionamento ( $\beta ; r/D$ ) do sensor anemométrico no campo de medições para um  $S'$  fixo. Já que ao longo deste campo consideram-se constantes as características de desenvolvimento aerodinâmico do escoamento nos respectivos pontos  $r/D = -r/D$  (escoamento simétrico).

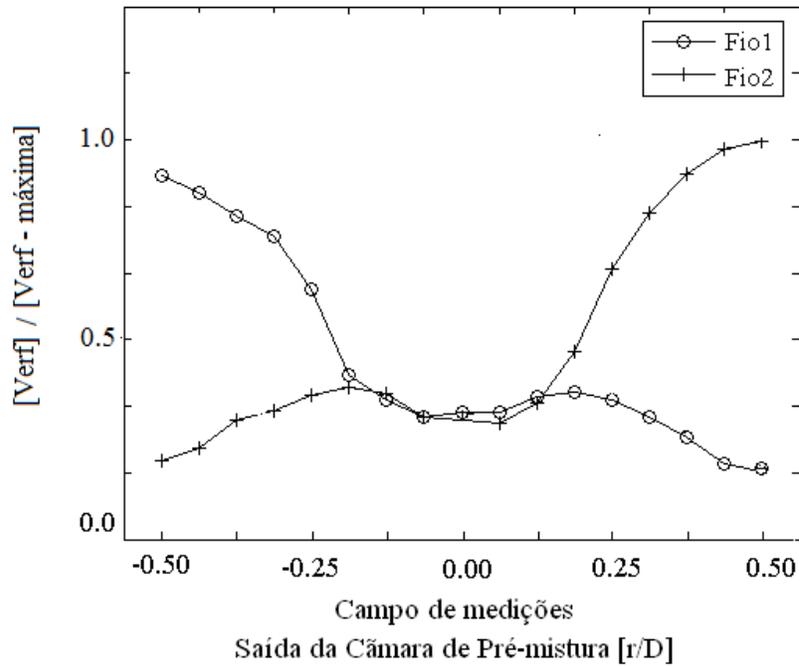


Figura 3.31 – Campo médio de velocidades efetivas de resfriamento dos fios a saída da câmara de pré-mistura da LPP para a condição de  $\beta = 90^\circ$  e  $S'$  de referência.

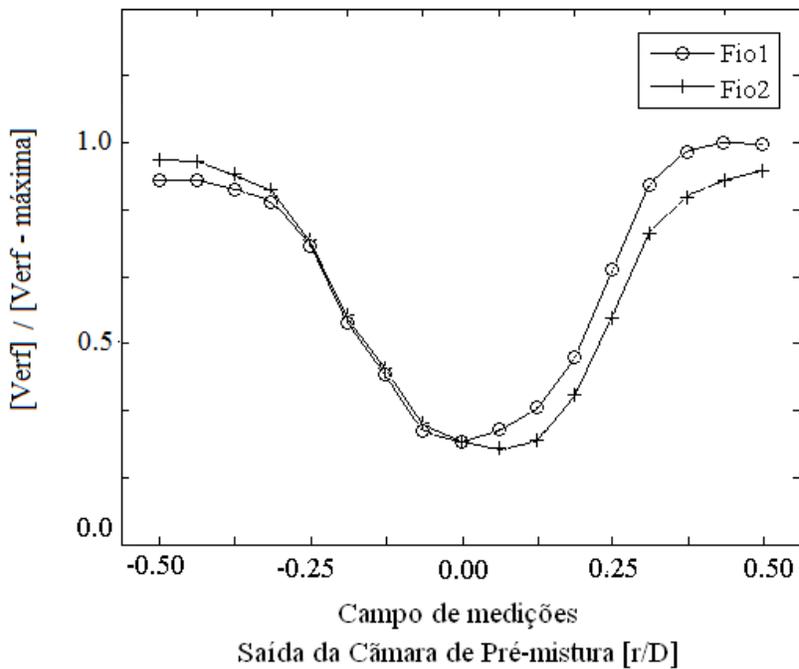


Figura 3.32 - Campo médio de velocidades efetivas de resfriamento dos fios a saída da câmara de pré-mistura da LPP para a condição de  $\beta = 0^\circ$  e  $S'$  de referência.

Portanto, os escoamentos de ar desenvolvidos nas direções u, v e w possuirão maior, ou menor, efetividade no processo de resfriamento por causa das características geométricas do sensor.

Baseado nesta afirmação, propõem-se alinhar as curvas de resfriamento efetivo dos fios sensores geradas no intervalo:  $r/D = -0,5$  a  $0,0$ , com as curvas geradas no intervalo:  $r/D = 0,0$  a  $+0,5$ , com base em suas características geométricas. Desta forma, é possível conectar os dados de acordo com o nível de efetividade dos escoamentos u, v e w no processo de resfriamento dos fios, tal como mostrado na Figura 3.33. O que permite dizer, qualitativamente, em quais direções (u, v ou w) o escoamento se desenvolve com maior ênfase.

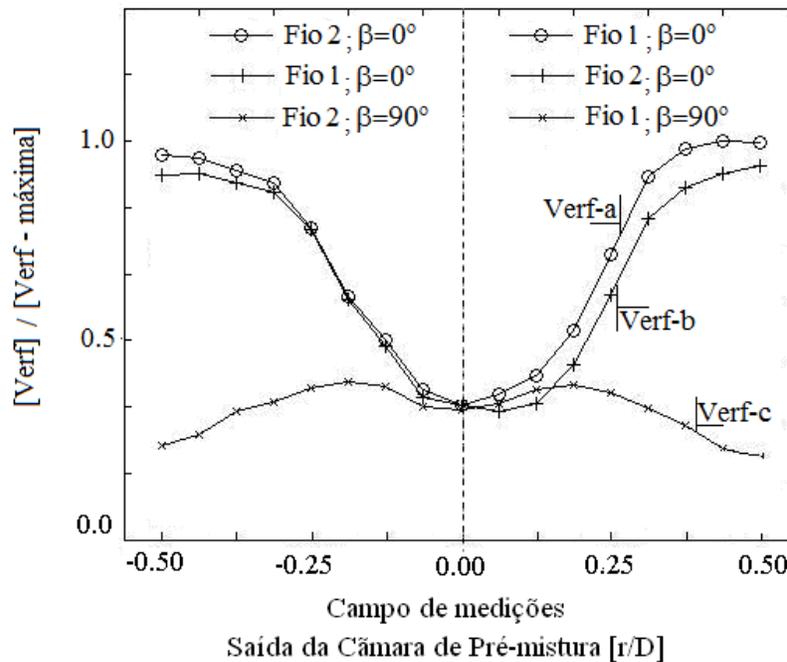


Figura 3.33 - Campo médio de velocidades efetivas de resfriamento dos fios sensores à saída da câmara de pré-mistura da LPP.

Para efeito de análises, as terminologias; Verf-a, Verf-b e Verf-c, (ver Figura 3.33), caracterizam as curvas que são resultados da proposta de alinhamento.

### 3.3.2.2 – Tratamento estatístico do escoamento turbulento

As variáveis utilizadas para se quantificar as propriedades de um escoamento turbulento são baseadas, fundamentalmente, em momentos de primeira e segunda ordens, ambos em função do tempo e do espaço. Para o caso da velocidade, por exemplo, também se calculam a correlação entre as componentes de velocidades (momentos entre dois pontos), as dimensões dos turbilhões e a taxa de dissipação de energia (Cruz, 2003). Estas variáveis e suas aplicações estão descritas a seguir.

Em se tratando de momento de primeira ordem, uma análise padrão em turbulência separa as propriedades flutuantes de seu valor médio temporal. Considerando que  $u$  é a velocidade instantânea do escoamento, cuja amostra é suficientemente longa para capturar todas as estruturas do escoamento, calcula-se, então a sua média temporal, conforme definido na equação 3.9.

$$\bar{u} = \frac{1}{t} \int_{t_0}^{t_0+t} u dt \quad (3.9)$$

A flutuação acerca da média temporal é definida conforme o especificado na equação 3.10:

$$u' = u - \bar{u} \quad (3.10)$$

Se a integral da equação 3.9 é independente do valor inicial  $t_0$ , o escoamento é dito estacionário.

Os momentos de segunda ordem trazem informações de uma ou mais variáveis aleatórias para um ponto qualquer  $x = x_0$ . Pela definição de  $u'$ , seu valor médio é nulo, portanto, para se definir a sua magnitude calcula-se o seu valor quadrático médio.

$$\overline{u'^2}(\vec{x}) = \frac{1}{t} \int_{t_0}^{t_0+t} u'^2(\vec{x}, t) dt \quad (3.11)$$

A raiz quadrada da soma dos valores quadráticos médios das componentes de velocidade do escoamento é conhecida como a intensidade de turbulência, que pode ser expressa em porcentagem do valor médio da velocidade, conforme descrito na equação 3.12.

$$\delta = \frac{u'}{u} \quad (3.12)$$

Os momentos entre dois pontos fornecem informações estatísticas relativas à distribuição espacial ou temporal do escoamento. Com relação à distribuição temporal a função de autocorrelação fornece a correlação entre as componentes de velocidades medidas entre dois tempos diferentes. O coeficiente de autocorrelação é definido como a razão entre o produto das velocidades médias observadas em dois pontos distintos (caracterizados por um delta de tempo) pelo produto das médias quadráticas das respectivas flutuações de velocidade, conforme descrito na equação 3.13.

$$R(\tau) = \frac{\overline{u'(t)u'(t+\tau)}}{u'^2(t)} \quad (3.13)$$

O coeficiente de auto-correlação é freqüentemente utilizado para definir uma escala integral de turbulência,  $T_i$ , que fornece uma estimativa do intervalo de tempo onde a componente de velocidade  $u$  está correlacionada (OLIVEIRA et al., 2006).

Outra função central para as análises estatísticas é a densidade espectral da flutuação da velocidade. De acordo com Oliveira, et. al. (2006), a variância do processo  $u'^2$  corresponde à potência média dissipada no intervalo  $(-T, T)$ . Então:

$$\overline{u'^2} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E(w)dw \quad (3.14)$$

Onde  $E(w)$  é o espectro de potencia de  $u'(t)$ . Assim,  $E(w)dw/2\pi$  corresponde à energia média dissipada com freqüências entre  $w$  e  $w + dw$ . Segundo Oliveira, et. al. (2006), a função autocorrelação da flutuação da velocidade e a densidade espectral são conectadas pelo teorema de Wiener-Khinntchine, portanto:

$$R(\tau) = \overline{u'(t+\tau)u'(t)} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \quad (3.15)$$

e

$$E(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) \tau^{-i\omega\tau} d\tau \quad (3.16)$$

Assim, de acordo com o teorema acima, a função autocorrelação e a densidade espectral são simplesmente as transformadas de Fourier de cada um.

## **4 - RESULTADOS E ANÁLISES**

O capítulo apresenta os resultados da caracterização do escoamento rotativo à saída da câmara de pré-mistura, para a verificação da ocorrência do vórtice colapsado. Para tanto serão realizadas as seguintes análises: identificação dos característicos perfis de velocidade observados à base do escoamento, a detecção do PVC e da condição de regularidade do vórtice.

### **4.1 - ANÁLISES DO CAMPO DE VELOCIDADES À BASE DO ESCOAMENTO COM ELEVADA ROTAÇÃO**

#### **4.1.1 – Caracterização do campo de velocidades**

As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 caracterizam o campo de velocidades do escoamento à saída da câmara de pré-mistura do combustor LPP, via análise dos dados obtidos com os ATC's. Vale ressaltar que os valores de velocidade obtidos via técnica de anemometria a temperatura constante são absolutos, ou seja, não foi levado em consideração o sentido de desenvolvimento do escoamento.

Os perfis representados por Verf-a, Verf-b e Verf-c são formados com os pontos medidos ao longo do campo de medições e caracterizam o escoamento com base nas médias das velocidades efetivas de resfriamento dos fios sensores em função da variação de  $S'$ . O fator utilizado para normalizar os valores de velocidades corresponde ao maior valor médio de velocidade efetiva de resfriamento, obtido na condição de  $S' = 1.26$ .

O campo de velocidades apresentado na Figura 4.1 mostra o desenvolvimento aerodinâmico do escoamento para a condição de  $S' = 0,88$  do processo de medições. Observam-se à região periférica valores de velocidades médias, relativamente, mais elevados (Verf-a e Verf-b), enquanto que à região central encontram-se os menores valores médios. Com base no trabalho de Dinesh et. al. (2010), (ver Figura 2.26), pode-se afirmar que estes perfis indicam uma movimentação rotativa dominante à região periférica do escoamento. Ficando, portanto, o domínio do escoamento axial à região central, que caracteriza o início da ZCR, conforme observado em Syred (2006), (ver Figura 2.25).

Fazendo-se uma análise do perfil representado por Verf-c, observa-se um escoamento de velocidades relativas reduzidas às extremidades do campo de medições. Como a participação do escoamento axial no processo de resfriamento independe do posicionamento do sensor no campo de medições, pode-se afirmar que o perfil Verf-c indica uma fraca atividade do escoamento desenvolvendo-se radialmente à região periférica, o que é esperado em um vórtice com o processo de formação finalizado.

Com a evolução de  $S'$  (ver Figuras 4.2 e 4.3), observa-se que os perfis do campo de velocidades mantêm as mesmas características observadas sob a condição de  $S'= 0,88$ , porém a magnitude dos valores de velocidade aumenta. Observa-se, também, que a região central do escoamento tem o seu volume ampliado nesta condição, evidenciando o crescimento da atividade de recirculação central, conforme descrito em Dinesh et al. (2010).

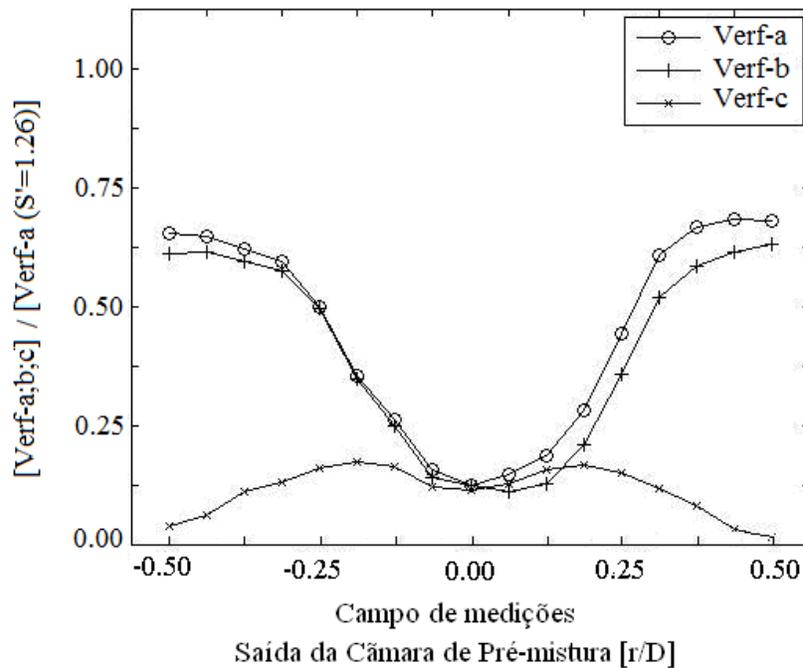


Figura 4.1 – Perfis de velocidade efetiva de resfriamento dos fios sensores observados à saída da câmara de pré-mistura da LPP na condição de  $S'= 0,88$ .

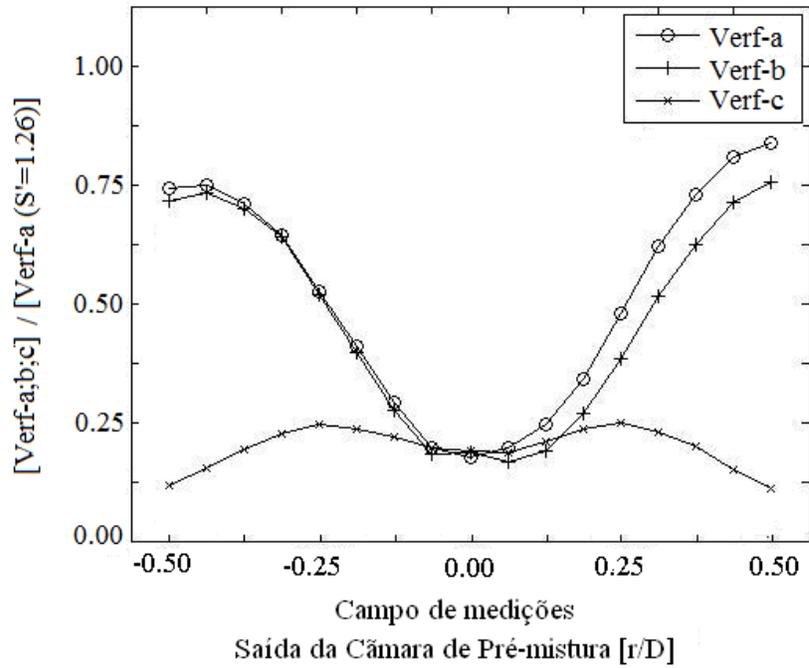


Figura 4.2 – Perfis de velocidade efetiva de resfriamento dos fios sensores observados à saída da câmara de pré-mistura da LPP na condição de  $S' = 1,05$ .

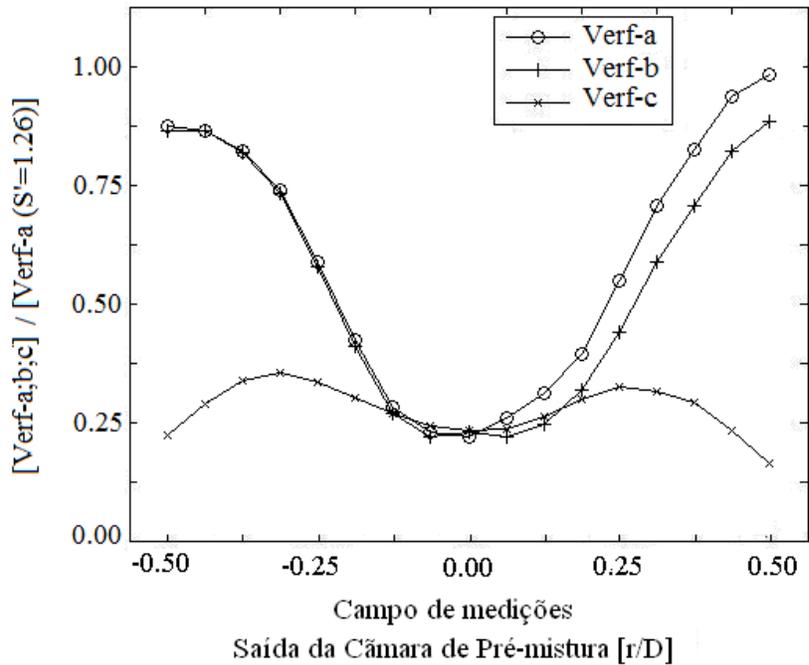


Figura 4.3 - Perfis de velocidade efetiva de resfriamento dos fios sensores observados à saída da câmara de pré-mistura da LPP na condição de  $S' = 1,26$ .

A característica rotativo do escoamento também pode ser observada por meio dos correspondentes mapas de distribuição da energia cinética do fluido, tal como apresentados nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7. Os mapas foram gerados por meio dos valores médios que compõem as curvas Verf-a, Verf-b e Verf-c, para  $S^* = 0,88$  à 1.65, no intervalo físico indicado na Figura 4.4. Para tanto, levou-se em conta o cálculo das velocidades rms, em cada ponto considerado.

Observa-se, portanto, que o desenvolvimento tangencial à região periférica do campo de medições é dominante e se torna, naturalmente, mais evidente com a evolução de  $S^*$ .

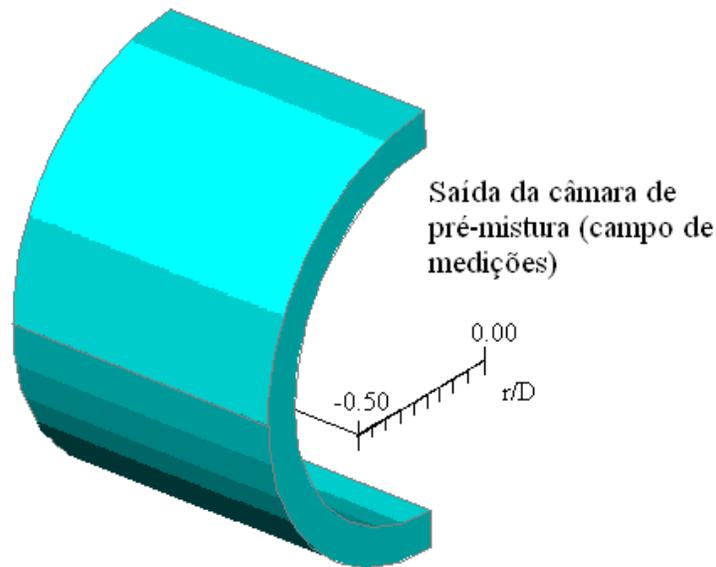


Figura 4.4 – Campo de medições observado de  $r/D = 0.00$  a  $r/D = -0.5$  (saída da câmara de pré-mistura da LPP).

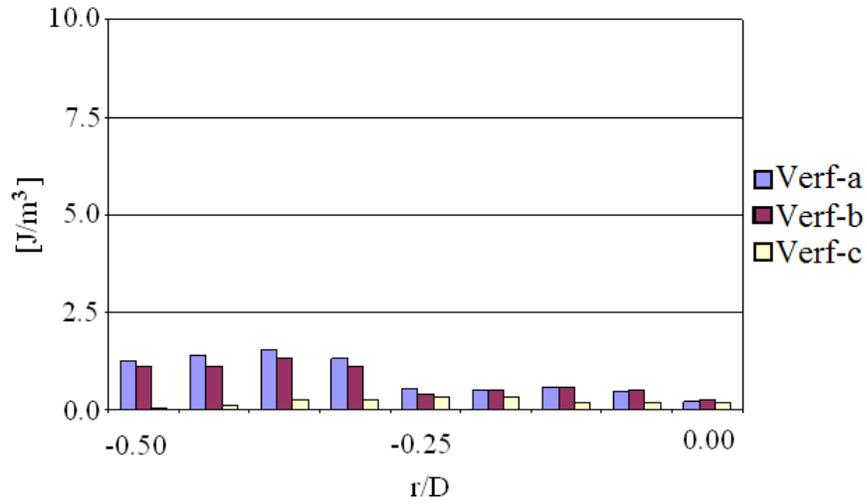


Figura 4.5 – Distribuição da energia cinética do escoamento em termos volumétricos ao longo da seção de medição na condição de  $S'=0,88$ .

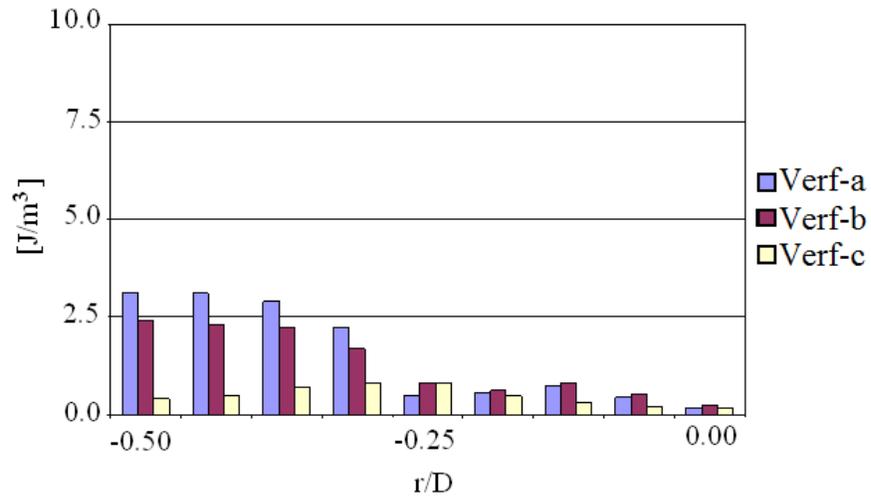


Figura 4.6 – Distribuição da energia cinética do escoamento em termos volumétricos ao longo da seção de medição na condição de  $S'=1,05$ .

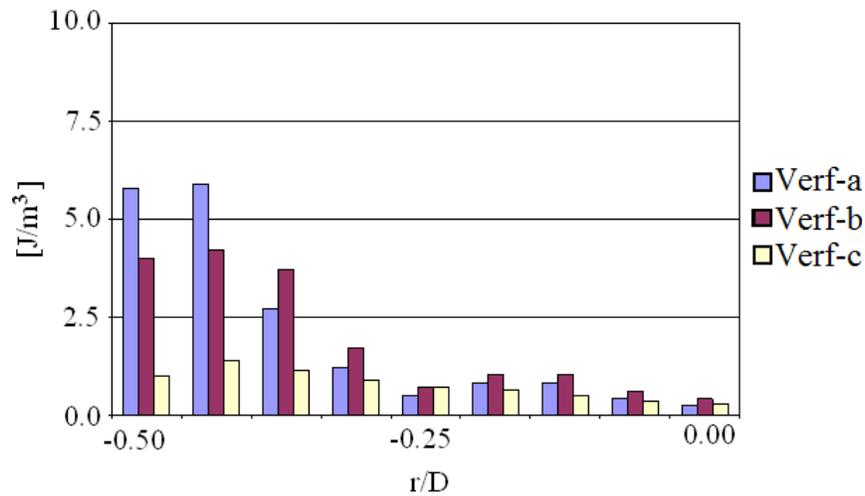


Figura 4.7 – Distribuição da energia cinética do escoamento em termos volumétricos ao longo da seção de medição na condição de  $S'=1,26$ .

#### 4.1.2 – Identificação do PVC

Neste item os valores contidos nas curvas Verf-a, Verf-b e Verf-c, para  $S'=0,88$  à  $1,65$ , serão analisados no domínio do tempo e no domínio da frequência, com o objetivo de identificar o PVC na base do escoamento rotativo.

Para reduzir o volume das análises foram selecionados três pontos ao longo do campo de medições (ver Figura 4.8), por representarem, mediamente, distintas regiões do escoamento, conforme detectado em pré-análises dos resultados (Apêndice A).

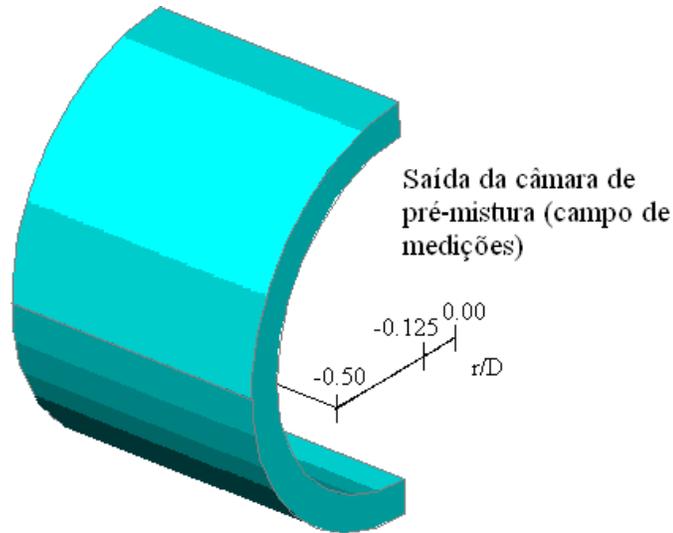


Figura 4.8 – Pontos analisados à seção de medição (saída da câmara de pré-mistura da LPP).

Os gráficos do sinal de velocidade foram gerados em uma janela de tempo de  $6 \times 10^{-2}$  segundos, ou o equivalente a 600 pontos adquiridos, para uma melhor visualização gráfica. Os respectivos gráficos da função autocorrelação e do espectro de potência do sinal foram calculados a partir dos dados contidos nas curvas Verf-a's e, portanto, caracterizam o escoamento de forma global.

As Figuras 4.9; 4.10 e 4.11 apresentam os gráficos dos sinais de velocidade do escoamento e os respectivos gráficos da função autocorrelação obtidos à  $r/D = -0.5$  para as condições de  $S' = 0,88$ ; 1,05 e 1,26, respectivamente. Observa-se nas figuras 4.9-a; 4.10-a e 4.11-a que os sinais do escoamento apresentam uma forte pulsação com característica periódica cujas médias de velocidade e as amplitudes evoluem com o crescimento de  $S'$ , sem a perda do comportamento periódico.

A característica periódica do sinal de velocidades do escoamento é averiguada pelos correspondentes gráficos da função autocorrelação (ver figuras 4.9-b; 4.10-b e 4.11-b), com picos sempre próximos da unidade, indicando uma região formada por um escoamento coerente que não apresenta a tendência de se descorrelacionar ao longo do tempo. Observa-se, também que a periodicidade do escoamento se mantém com a evolução de  $S'$ .

Os correspondentes espectros de potência do sinal de velocidades (ver Figura 4.12) apresentam um harmônico dominante nesta região, sugerindo uma movimentação extra à rotação primária do escoamento, que pode ser interpretada como o movimento de

precessão, conforme observado em Jochmann et al. (2006), (ver Figura 2.28). O valor da frequência do harmônico varia discretamente com a evolução de  $S'$  e, praticamente, não se percebe uma variação da potência destes harmônicos nos três níveis de rotação analisados.

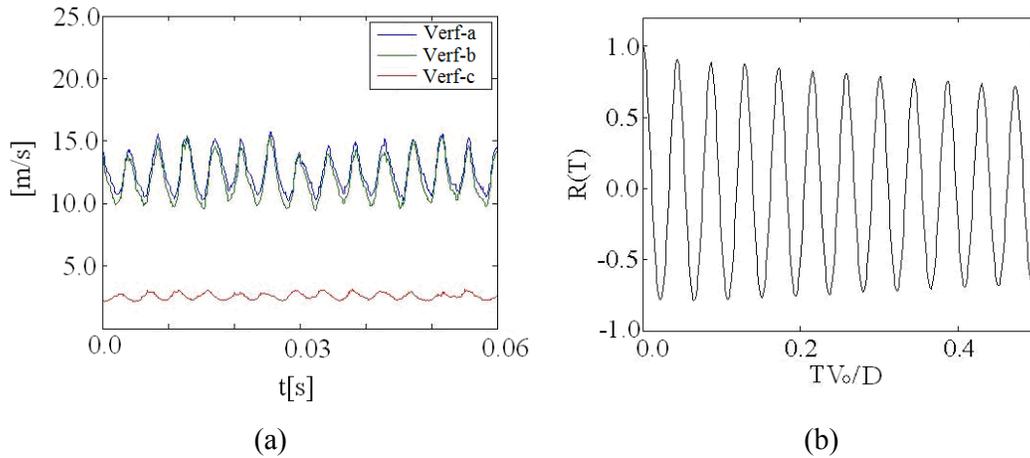


Figura 4.9 – Sinais de velocidade do escoamento observados no domínio do tempo a  $r/D = -0.5$  para a condição de  $S' = 0,88$ . (a) Sinais de Velocidade obtidos nas curvas Verf-a, Verf-b e Verf-c e (b) Função Autocorrelação do Sinal de Velocidade obtido na curva Verf-a.

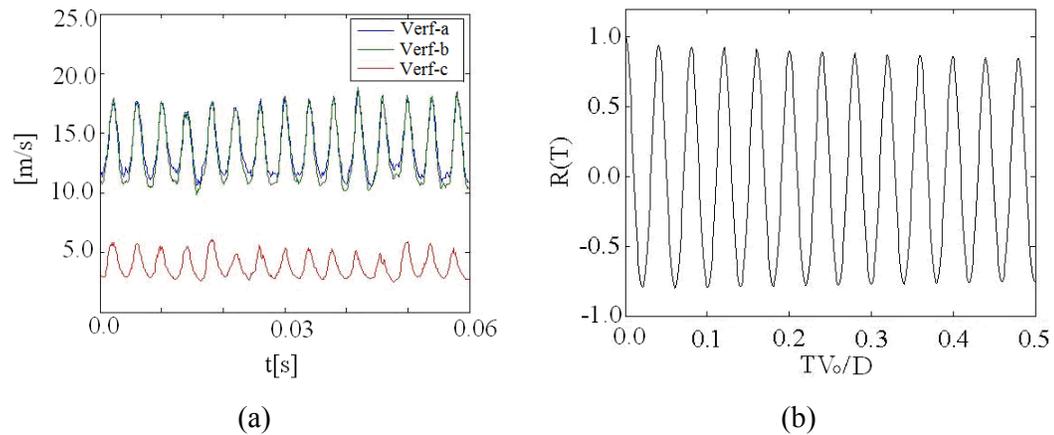


Figura 4.10 – Sinais de velocidade do escoamento observados no domínio do tempo a  $r/D = -0.5$  para a condição de  $S' = 1,05$ . (a) Sinais de Velocidade obtidos nas curvas Verf-a, Verf-b e Verf-c e (b) Função Autocorrelação do Sinal de Velocidade obtido na curva Verf-a.

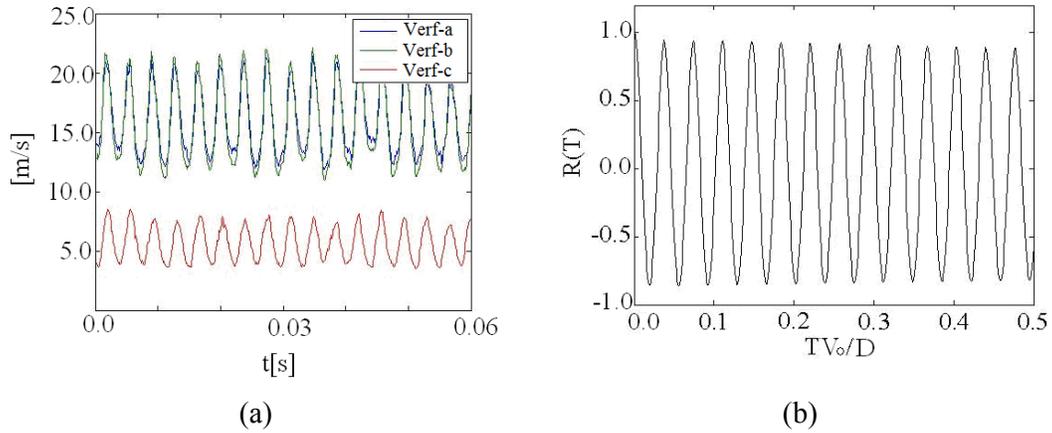


Figura 4.11 – Sinais de velocidade do escoamento observados no domínio do tempo a  $r/D = -0.5$  para a condição de  $S^* = 1,26$ . (a) Sinais de Velocidade obtidos nas curvas Verf-a, Verf-b e Verf-c e (b) Função Autocorrelação do Sinal de Velocidade obtido na curva Verf-a.

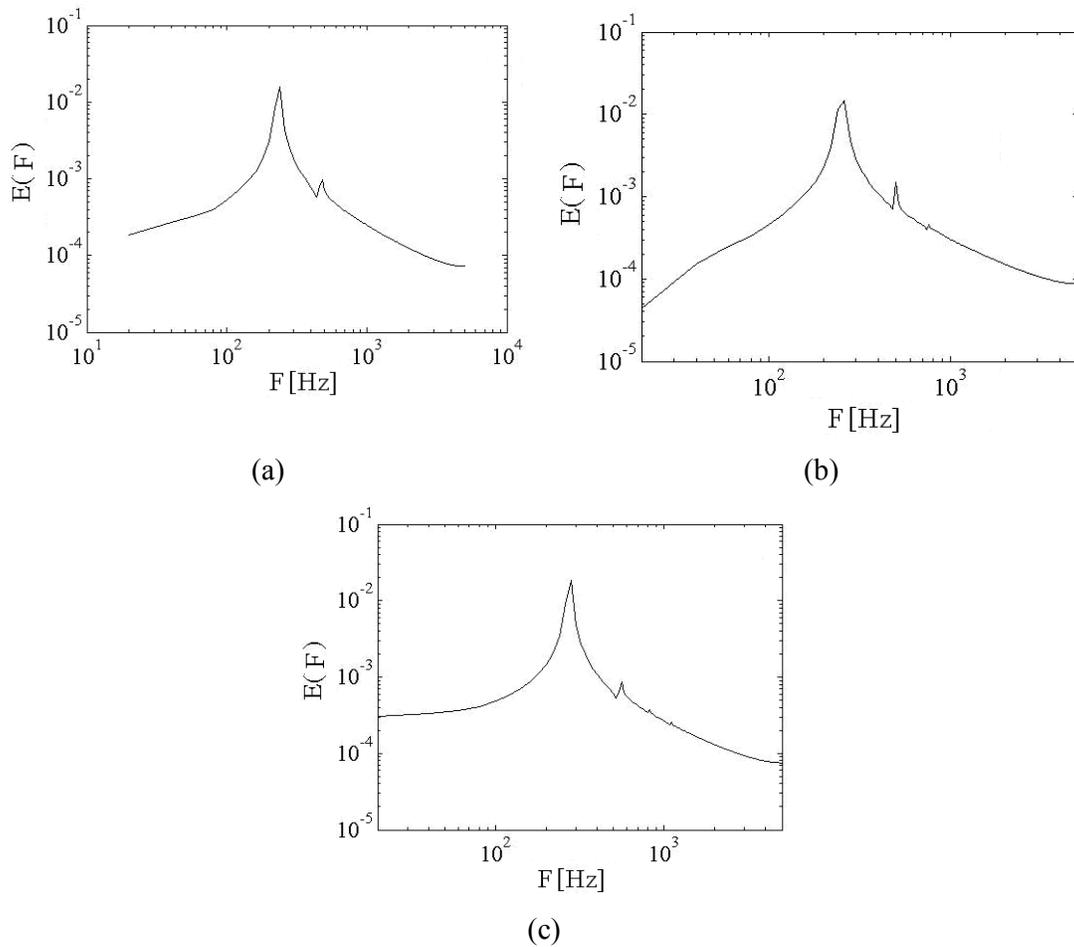


Figura 4.12 - Sinais de velocidade do escoamento observados no domínio da frequência a  $r/D = -0.5$  obtidos nas curvas Verf-a. (a) para a condição de  $S^* = 0,88$ ; (b)  $S^* = 1,05$  e (c)  $S^* = 1,26$ .

Em  $r/D = -0.125$  (ver Figuras 4.13-a; 4.14-a e 4.15-a), os sinais de velocidades obtidos via Verf-a e Verf-b são, praticamente, coincidentes, caracterizam um escoamento com fortes pulsações e acusam uma região com baixo valor médio da velocidade rotativa, conforme observado nas Figuras 4.1; 4.2 e 4.3. Observa-se que os sinais do escoamento mantêm uma periodicidade, porém, com características de uma turbulência homogênea (OLIVEIRA, 2002), cujas intensidades variam de 20% a 22.5% em função do aumento da rotação. Com a evolução de  $S'$  percebe-se, também, uma convergência dos valores médios de velocidade e das características dos sinais obtidos via Verf-a, Verf-b e Verf-c.

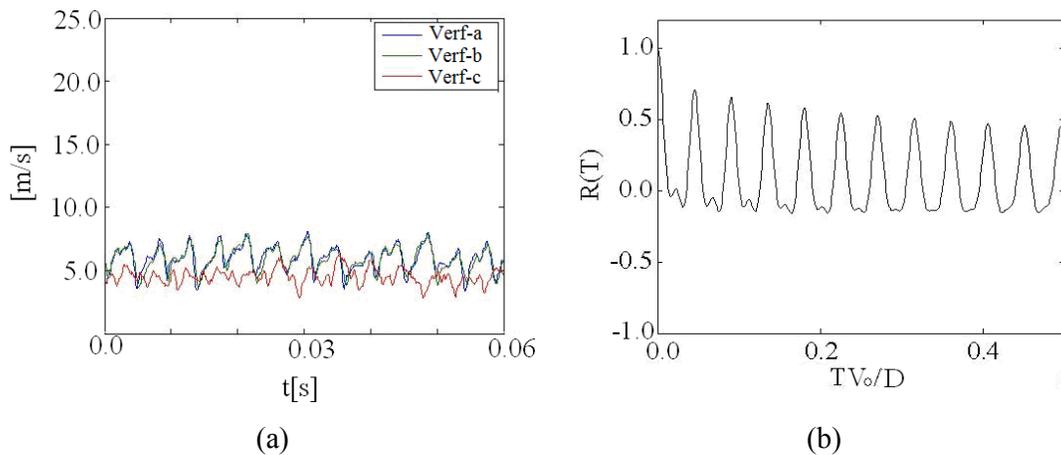


Figura 4.13 – Sinais de velocidade do escoamento observados no domínio do tempo a  $r/D = -0.125$  para a condição de  $S' = 0,88$ . (a) Sinais de Velocidade obtidos nas curvas Verf-a; Verf-b e Verf-c e (b) Função Autocorrelação do Sinal de Velocidade obtido na curva Verf-a.

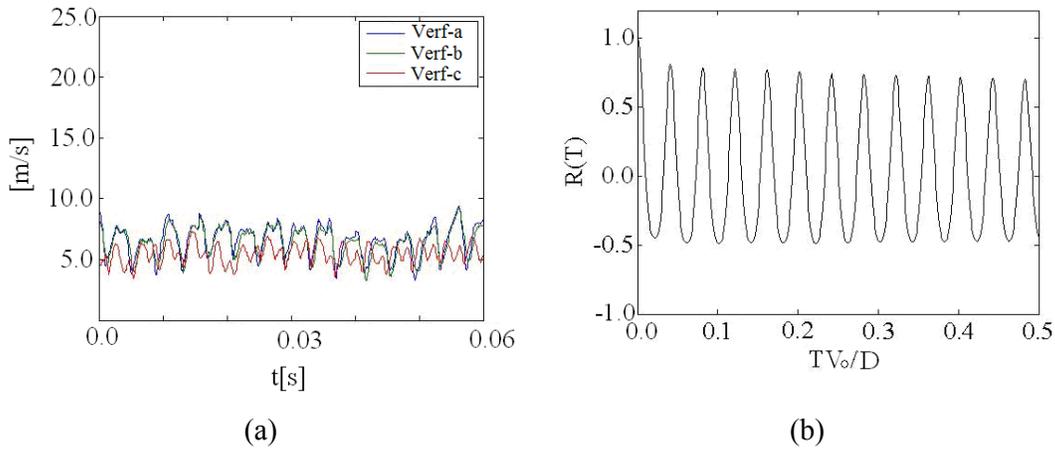


Figura 4.14 – Sinais de velocidade do escoamento observados no domínio do tempo a  $r/D = -0.125$  para a condição de  $S^* = 1.05$ . (a) Sinais de Velocidade obtidos nas curvas Verf-a; Verf-b e Verf-c e (b) Função Autocorrelação do Sinal de Velocidade obtido na curva Verf-a.

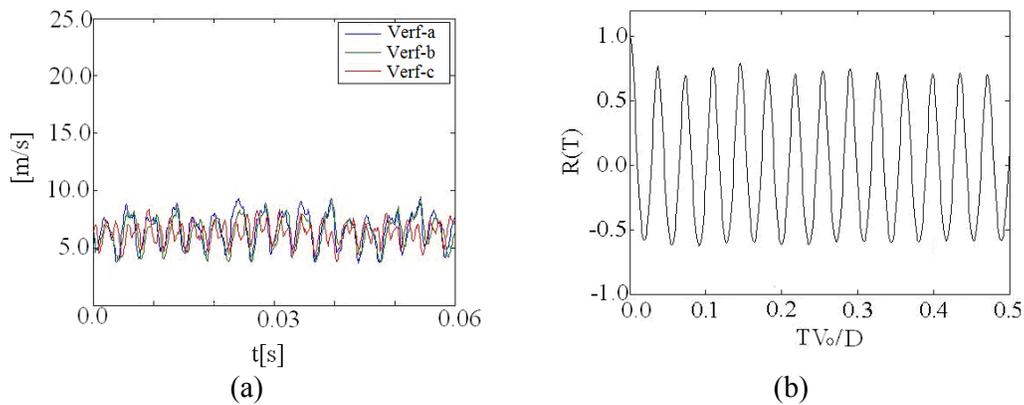


Figura 4.15 – Sinais de velocidade do escoamento observados no domínio do tempo a  $r/D = -0.125$  para a condição de  $S^* = 1.26$ . (a) Sinais de Velocidade obtidos nas curvas Verf-a; Verf-b e Verf-c e (b) Função Autocorrelação do Sinal de Velocidade obtido na curva Verf-a.

As correspondentes funções de autocorrelação, Figuras 4.13-b; 4.14-b e 4.15-b, e os correspondentes espectros de potência dos sinais, Figura 4.16, apresentam, respectivamente, a perda da proximidade com a unidade e uma emergente cascata de energia (evidência de dissipação energética por meio de estruturas de menores escalas do escoamento). Observa-se nos espectros de potência mais um harmônico dominante, cuja frequência é superior às frequências dos harmônicos encontrados à  $r/D = -0.5$ , o que pode indicar a ocorrência de mais uma movimentação extra à rotação do escoamento, evidenciando um fenômeno de precessão mais atuante nesta região.

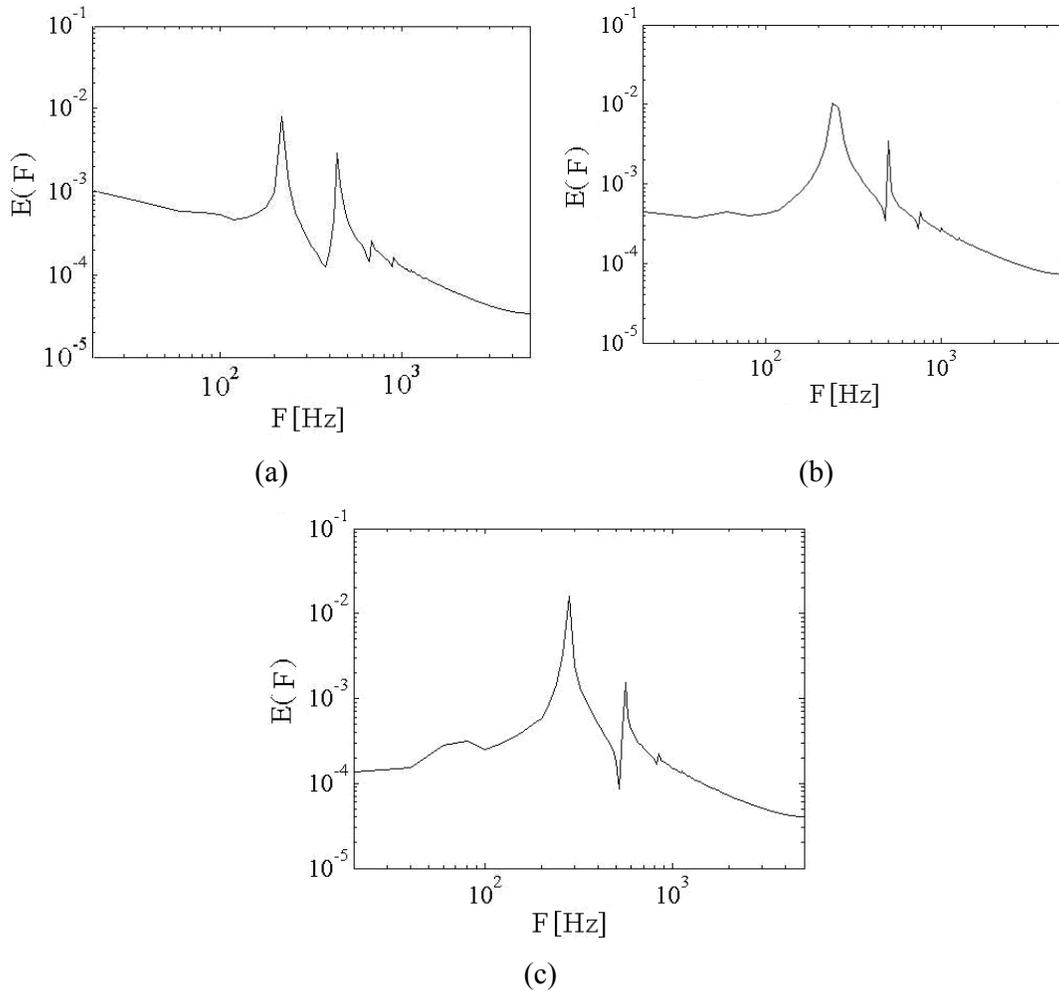


Figura 4.16 - Sinais de velocidade do escoamento observados no domínio da frequência a  $r/D = -0.125$  obtidos nas curvas Verf-a. (a) para a condição de  $S' = 0,88$ ; (b)  $S' = 1,05$  e (c)  $S' = 1,26$ .

Ao centro da seção de medição ( $r/D = 0.00$ ) os sinais de velocidade mantêm o nível de pulsação, praticamente convergem para uma média numérica, caracterizando uma região de baixas velocidades, e apresentarem uma configuração similar para as três condições de  $S'$  consideradas (ver Figuras 4.17-a; 4.18-a e 4.19-a). Observa-se nos gráficos das Figuras 4.17-b; 4.18-b e 4.19-b que as funções autocorrelação mantêm a perda da proximidade com a unidade, indicando uma tendência de o escoamento se decorrelacionar com o tempo, e os espectros de potência (ver Figura 4.20) permanecem com o delta na cascata de energia.

Conforme se observou ao ponto  $r/D = -0.125$ , ao centro da seção de medição ocorrem dois harmônicos em diferentes frequências e potências, reforçando a presença do fenômeno de precessão com maior evidência.

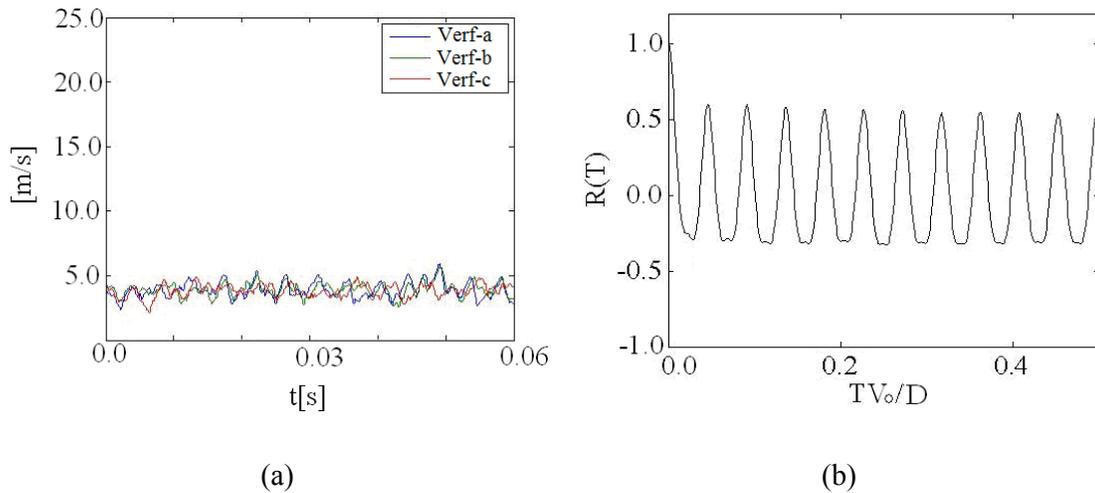


Figura 4.17 – Sinais de velocidade do escoamento observados no domínio do tempo a  $r/D = 0$  para a condição de  $S^* = 0,88$ . (a) Sinais de Velocidade obtidos nas curvas Verf-a, Verf-b e Verf-c e (b) Função Autocorrelação do Sinal de Velocidade obtido na curva Verf-a.

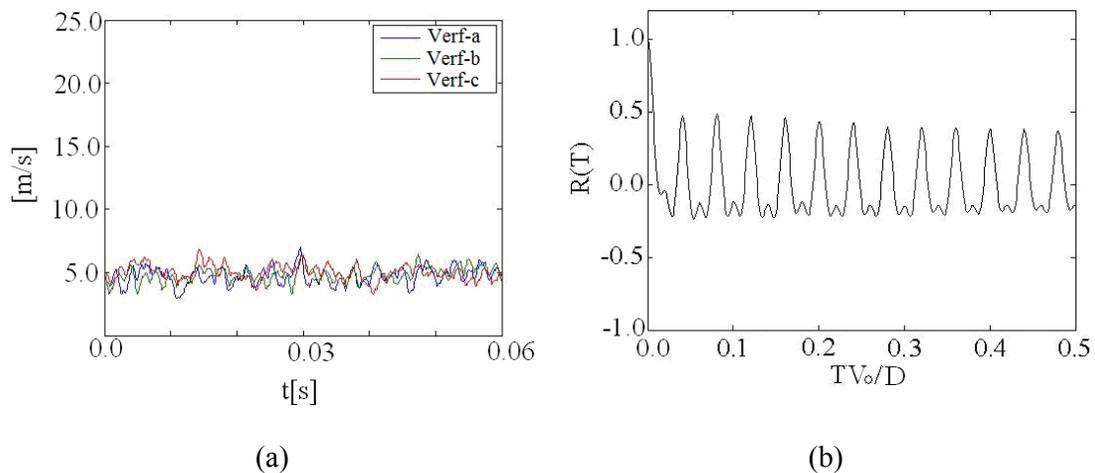


Figura 4.18 – Sinais de velocidade do escoamento observados no domínio do tempo a  $r/D = 0$  para a condição de  $S^* = 1,05$ . (a) Sinais de Velocidade obtidos nas curvas Verf-a, Verf-b e Verf-c e (b) Função Autocorrelação do Sinal de Velocidade obtido na curva Verf-a.

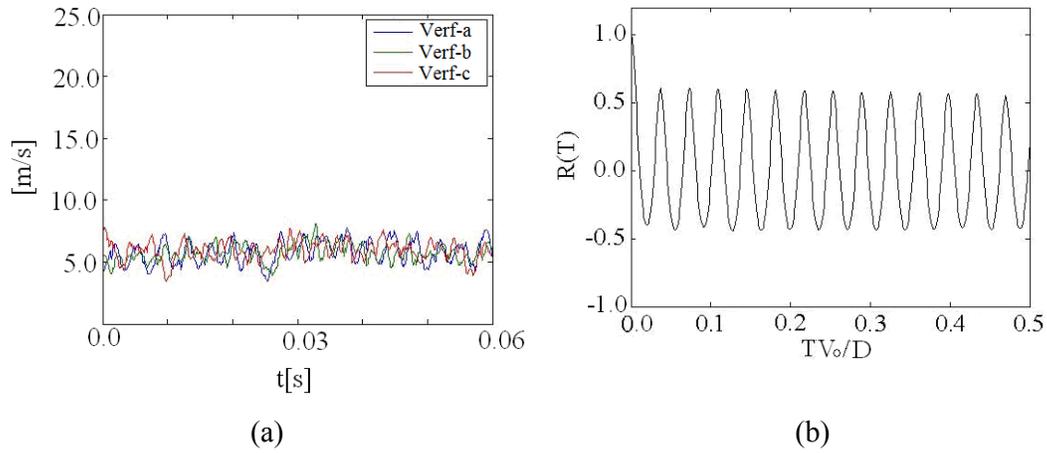


Figura 4.19 – Sinais de velocidade do escoamento observados no domínio do tempo a  $r/D = 0$  para a condição de  $S' = 1,26$ . (a) Sinais de Velocidade obtidos nas curvas Verf-a, Verf-b e Verf-c e (b) Função Autocorrelação do Sinal de Velocidade obtido na curva Verf-a.

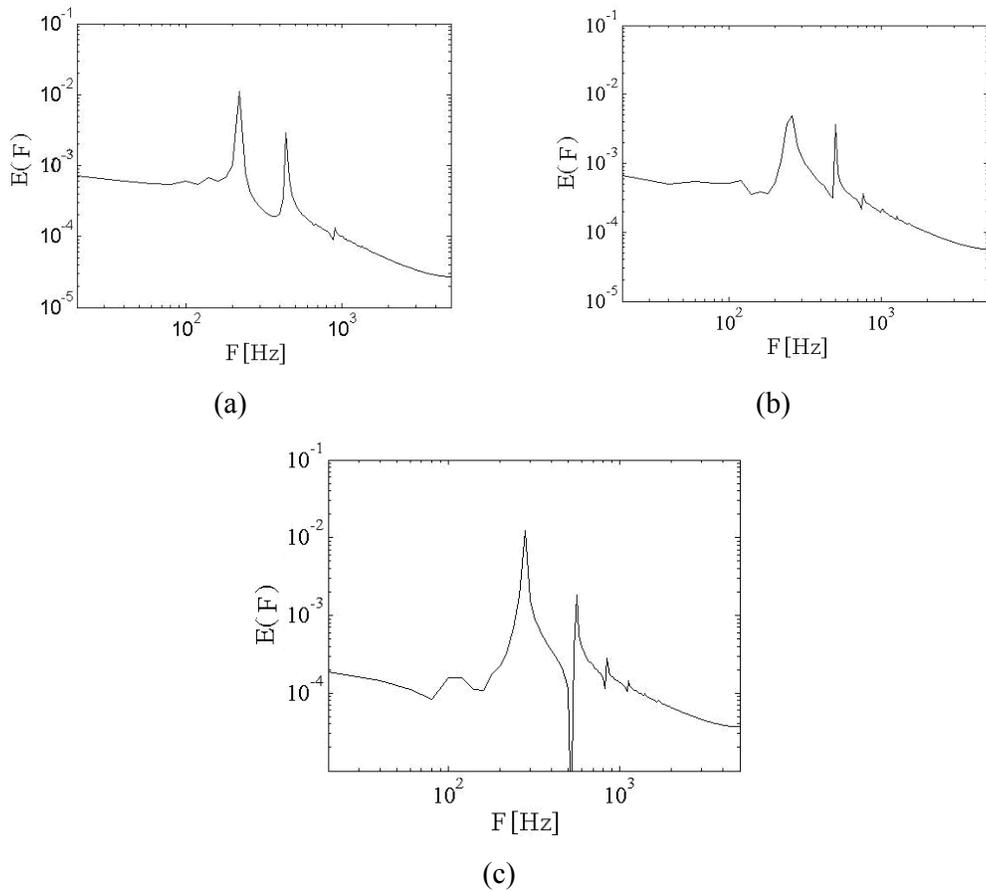


Figura 4.20 - Sinais de velocidade do escoamento observados no domínio da frequência a  $r/D = 0$  obtidos nas curvas Verf-a. (a) para a condição de  $S' = 0,88$ ; (b)  $S' = 1,05$  e (c)  $S' = 1,26$ .

Segundo Anacleto et al. (2003), as características pulsações do escoamento e a eminente presença de mais de um harmônico dominante indicam a presença de um típico PVC localizado, aproximadamente, na região compreendida entre os pontos  $r/D = -0.125$  e  $0.00$ , onde os sinais de velocidade caracterizam uma região de baixas velocidades. As pulsações de característica periódica e a presença do único harmônico dominante ao ponto  $r/D = -0.5$  podem indicar a influência da dinâmica do PVC sob a região mais periférica da base do escoamento, formada por um escoamento altamente rotativo.

#### **4.1.3 – Caracterização visual do campo de velocidades do escoamento com elevado número de swirl**

As Figuras 4.21; 4.22 e 4.23 apresentam as visualizações, via PIV, da seção transversal da base do escoamento rotativo em um tempo  $t$  qualquer para  $S' = 0,88, 1,05$  e  $1,26$ , respectivamente. As visualizações caracterizam o campo de velocidades tangencial, decomposto nas direções horizontal e vertical, com destaque ao núcleo do escoamento.

Conforme detectado nas análises do campo de velocidades, observa-se o característico escoamento rotativo ocorrendo, somente, à região periférica do campo de medições para os três números de *swirl* geométricos considerados. De acordo com as observações feitas em Syred (2006), Anacleto et al. (2003), Jochmann et al. (2006), (ver Figuras 2.28, 2.29 e 2.30, respectivamente) e de acordo com os resultados via ATC, a evolução de  $S'$  causa uma concentração do desenvolvimento tangencial à região periférica do campo de medições, permitindo um maior desenvolvimento reverso à região central. Além disto, observou-se que o aumento no nível da rotação provoca uma evidente descentralização do núcleo do vórtice, o que caracteriza a presença de um PVC no escoamento.

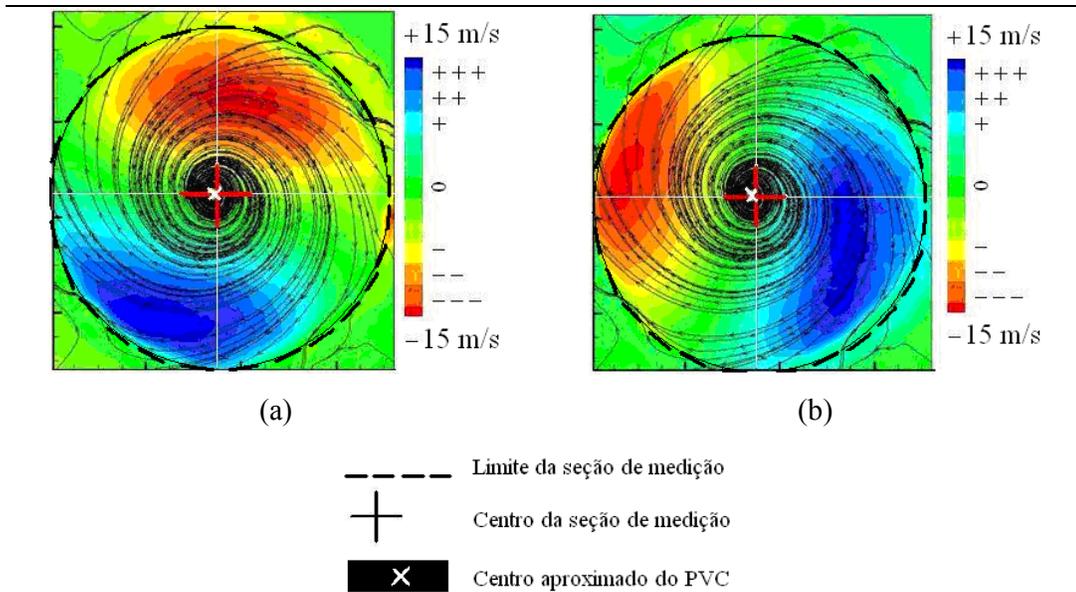


Figura 4.21 – Visualização transversal da base do escoamento rotativo à saída da câmara de pré-mistura do combustível LPP para a condição de  $S' = 0,88$ . (a) decomposição horizontal do campo de velocidades e (b) decomposição vertical do campo de velocidades.

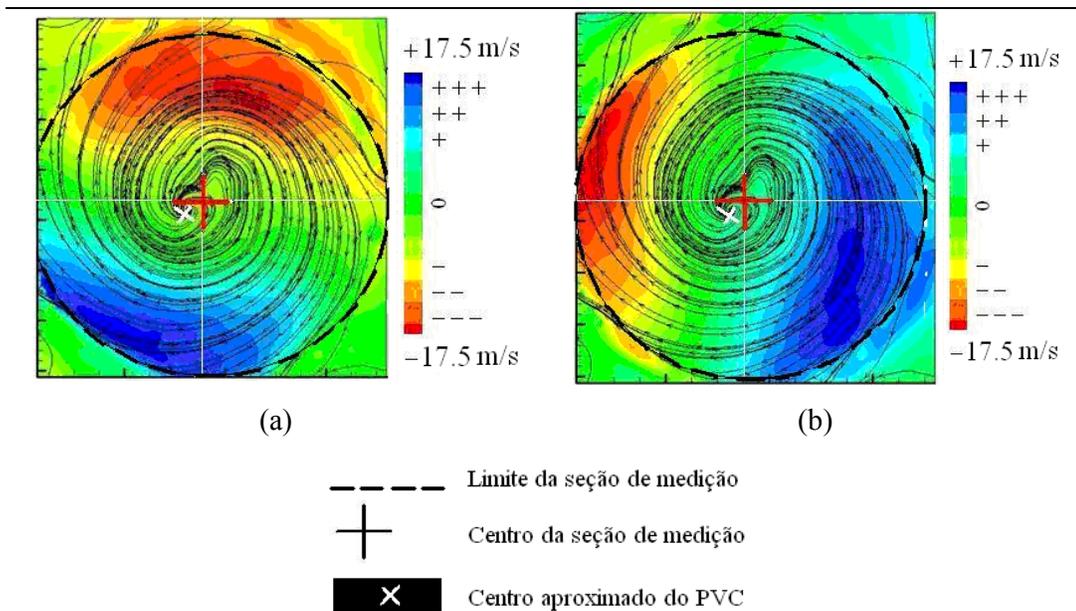


Figura 4.22 – Visualização transversal da base do escoamento rotativo à saída da câmara de pré-mistura do combustível LPP para a condição de  $S' = 1,05$ . (a) decomposição horizontal do campo de velocidades e (b) decomposição vertical do campo de velocidades.

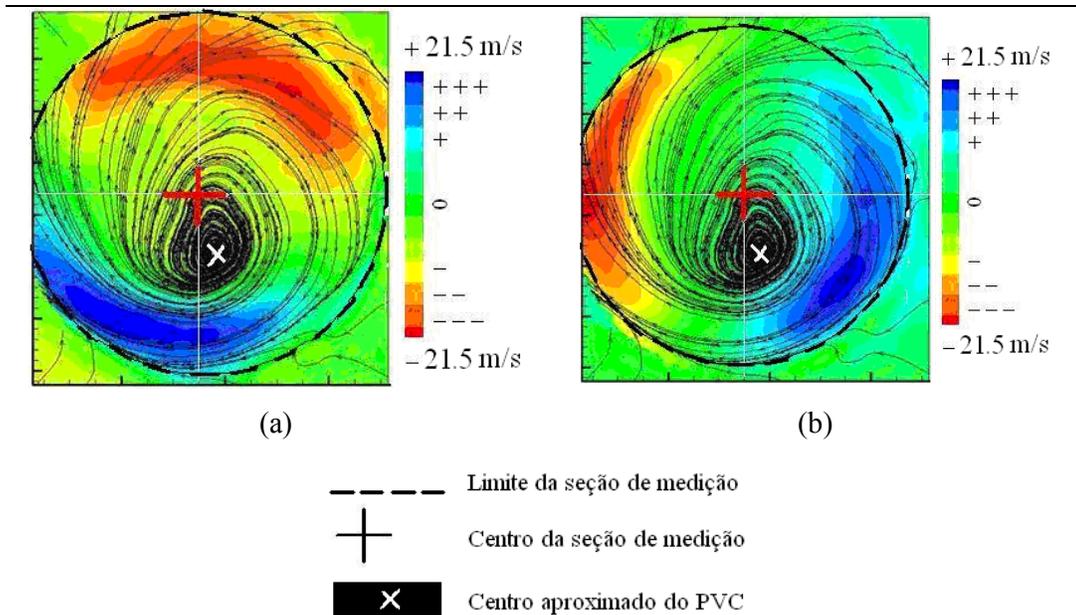


Figura 4.23 - Visualização transversal da base do escoamento rotativo à saída da câmara de pré-mistura do combustor LPP para a condição de  $S' = 1,26$ . (a) decomposição horizontal do campo de velocidades e (b) decomposição vertical do campo de velocidades.

## 4.2 – COMPILAÇÃO DOS RESULTADOS E ANÁLISE DA CONDIÇÃO DE REGULARIDADE DO ESCOAMENTO

Os resultados e análises dos sinais do escoamento e das visualizações indicam um campo de velocidades estratificado em duas regiões bem definidas: à região periférica ocorre um fluxo rotativo, coerente, de alta energia cinética e com a presença de um harmônico dominante, e à região central ( $r/D = -0.125$  e  $0.00$ ) o escoamento apresenta um típico PVC, baixas médias de velocidades e a base da zona central de recirculação. Observou-se, também, que o aumento da recirculação do escoamento e a elevação do movimento de precessão do PVC são induzidos pela evolução de  $S'$ , conforme averiguado na Tabela 1.

Tabela 4.1 - Frequências dos Harmônicos Dominantes [Hz] à base do vórtice colapsado em função de  $S'$  e da região analisada.

$S'$	$[r/D]=-0.5$	$[r/D]=-0.125$	Centro do Campo de Medições
0,88	220	480	440
1,05	255	520	500
1,26	290	580	560

A Figura 4.24 sintetiza as informações apresentadas nesta tabela por meio dos valores das frequências normalizadas pelo número de Strouhal-Sh em função da variação do número de *swirl* geométrico. Observa-se que, à região nuclear ( $r/D=-0.125$  e  $0.0$ ) as frequências dominantes do escoamento evoluem com o aumento de  $S'$  sem uma interrupção, ou parada, que caracterize o colapso no escoamento em elevadas rotações. Esta situação demonstra que a partir de  $S'=0,88$  o vórtice desenvolvido pelo gerador de fluxo não apresenta a tendência de se colapsar novamente o que caracteriza uma condição regular do escoamento, conforme o observado nos estudos de Anacleto et al., 2003.

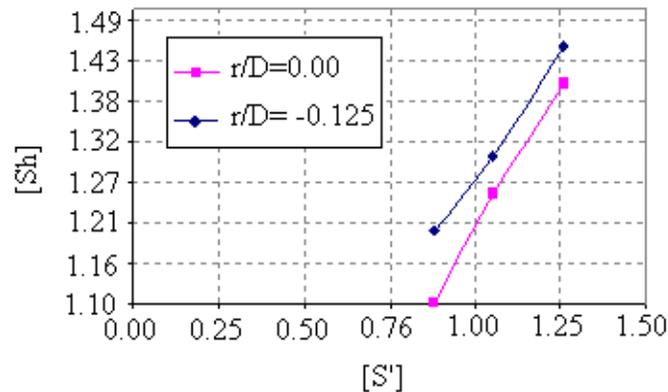


Figura 4.24 - Evolução das frequências dos harmônicos dominantes aos pontos  $r/D = -0.125$  e  $r/D = 0.0$  em função de  $S'$ , normalizadas pelo número de Strouhal-Sh e obtidas à base do escoamento.

Tendo-se detectado o característico campo de velocidades a base do escoamento, o típico PVC, anexado ao escoamento reverso, e a ausência de novos colapsos à região central, pode-se afirmar que o escoamento como um todo corresponde a um vórtice colapsado regular e aplicável aos processos de queima em um combustor de baixo  $NO_x$ ,

conforme observado em Anacleto et al, 2003. Portanto, o conjunto experimental, formado pelo *swirler* e pela câmara de pré-mistura, é capaz de gerar o escoamento rotativo com as qualidades necessárias às experimentações com o combustor LPP, instalado no laboratório de combustão do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB.

## 5 – CONCLUSÕES

Neste trabalho foi analisado o escoamento isotérmico com elevada rotação considerado regular aos processos de queima em um combustor de baixo NOx. O escoamento foi gerado à saída da câmara de pré-mistura do combustor LPP (ver Figura 1.7) e caracterizado experimentalmente para analisar a funcionalidade do sistema experimental responsável pela geração do fluxo reativo (*swirler* axial e pela câmara de pré-mistura). O escoamento, como um todo, é conhecido como o vórtice colapsado e o seu processo de caracterização ocorreu por meio da identificação do PVC, do característico campo de velocidades ocorrente a sua base e por meio da observação da condição de regularidade. Para tanto, foram analisados os correspondentes parâmetros integrais, sendo eles: os perfis do campo de velocidades, os sinais de velocidade caracterizados no domínio do tempo e da frequência e as visualizações do escoamento nesta região. As análises foram realizadas em função da variação do número de *swirl* geométrico do escoamento.

A caracterização do escoamento ocorreu em um ambiente não confinado, sob os correspondentes números de *swirl* geométricos;  $S' = 0,88; 1,05$  e  $1,26$ , e os dados para as análises foram obtidos por meio das técnicas de Anemometria a Temperatura Constante – ATC e de Velocimetria por Imagem de Partículas – PIV, por serem técnicas já consolidadas em processos de medições em fluidos.

O vórtice colapsado é gerado a partir da expansão abrupta da sua base à entrada do combustor LPP sob a condição de elevado número de *swirl*. O fenômeno da expansão é o resultado do colapso da estrutura do escoamento rotativo em função da ação centrífuga sobre ele. O fenômeno do colapso causa o decaimento das velocidades axial e tangencial e promove um gradiente adverso de pressão axial ao longo do eixo longitudinal do combustor, induzindo o escoamento reverso nesta região e, conseqüentemente, a formação de uma zona central de recirculação-ZCR. À base do escoamento a distribuição da velocidade tangencial é da forma Rankine e, portanto, o núcleo do vórtice pode se tornar instável e adquirir o movimento de precessão, resultando no conhecido PVC.

Os resultados apresentaram um escoamento ocorrendo de forma segmentada à base do vórtice: uma região periférica rotativo, com um alto nível de correlação do sinal de velocidades indicando um escoamento coerente e de grande escala, e uma região central com o desenvolvimento axial caracterizado por baixas médias de velocidades (início da Zona Central de Recirculação – ZCR), e presentes pulsações do escoamento. Observou-se,

também, uma movimentação extra à dinâmica rotativo da base do escoamento, definida por mais de um harmônico dominante, que indica um forte desenvolvimento da precessão nesta região.

Com a evolução do número de *swirl* os resultados demonstraram um escoamento rotativo concentrado à região periférica do campo de medições, com alta tendência de manter a correlação ao longo do tempo, permitindo espaço ao desenvolvimento da ZRC. À região central observou-se um baixo nível de correlação e um aumento da intensidade de turbulência. Observou-se, também, que o núcleo do escoamento ocorre descentralizado, indicando uma maior atividade do movimento de precessão nesta região, indicando a presença do PVC.

A evolução de  $S'$ , também permitiu detectar a condição de regularidade do escoamento, conforme observado em Anacleto et al. (2003), em que a partir de  $S' = 0,88$  (ver figura 4.24) as frequências dos harmônicos dominantes do PVC evoluíram sem a presença de uma parada abrupta, ou queda nos valores das frequências, em função do crescimento de  $S'$ .

Portanto, a análise dos resultados demonstrou a ocorrência do PVC e a condição de regularidade do escoamento, conforme o observado nos estudos de referência, comprovando a existência do vórtice colapsado regular e respondendo ao objetivo do trabalho. Desta forma, pode-se afirmar que o sistema experimental formado pelo *Swirler* e pela câmara de pré-mistura do combustor LPP é capaz de gerar o escoamento rotativo com as qualidades necessárias às experimentações com a tecnologia de turbinas de baixo NOx.

As tecnologias de medições do escoamento, bem como as metodologias experimentais aplicadas neste estudo, permitiram caracterizar com qualidade o escoamento, em vista aos propósitos do trabalho. Os parâmetros; tempo e a frequência de aquisição do sinal de velocidade aplicados (10s e 10kHz), adotados nos processos de medição via ATC, surgiram como dúvidas a princípio, uma vez que a sua correta definição pode ser baseada na medição da ergodicidade do escoamento, conforme Oliveira Taygoara (2002). Mesmo assim, optou-se por aquisitar os dados com os parâmetros de tempo e frequência de aquisição pré-definidos para, então, conferir se as estruturas de interesse do escoamento haviam sido observadas.

De fato, os espectros de potência apresentados no capítulo anterior mostram que as frequências de interesse para a caracterização do escoamento ocorrem dentro da faixa de  $10^2$  a  $10^3$  Hz e que acima destes valores as correspondentes frequências estão relacionadas às pequenas escalas dissipadoras de energia do escoamento. Portanto, os o tempo e a

freqüência de aquisição dos sinais de velocidade via ATC foram mais que o suficiente para se observar as estruturas de interesse do escoamento.

Durante o processo de aquisição dos sinais de velocidade dos anemômetros observou-se que seria possível aquisitar os sinais do escoamento nas três direções utilizando uma sonda simples encoberta por um tipo de isolamento. A técnica sugerida corresponde a isolar uma sonda simples de forma que o contato do fio sensor com o fluido seja unidirecional. Assim, é possível medir a velocidade do fluxo posicionando o sensor semi-enclausurado em qualquer direção e sentido. Ou seja, os valores de velocidade seriam aquisitados em função da posição do sensor no espaço de medição e em função do nível de enclausuramento. O nível de enclausuramento definiria as escalas do escoamento o qual se deseja medir.

As freqüências dos harmônicos dominantes apresentados neste trabalho foram obtidas por meio de um escoamento isotérmico. Portanto, para se avaliar o grau exato de importância destes resultados em um projeto de combustor do tipo LPP é interessante que sejam levantadas as freqüências dos harmônicos dominantes do escoamento com combustão para comparar com os resultados apresentados neste trabalho e avaliar o quanto a reação exotérmica no escoamento rotativo é significativa aos valores de freqüências dos harmônicos dominantes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADRIAN, R. J. **Particle-Imaging Techniques For Experimental Fluid Mechanics**, Annu. Rev. Fluid Mech, Vol. 23, pp. 261 – 304, 1991.

ANACLETO, P. M.; et al. **Characterization of a Strong Swirling Flow with Precessing Vortex Core based on Measurements of Velocity and Local Pressures Fluctuations**, 2003.

ANDRAUS, C. A. M. **Investigação da Formação do Poluente NO<sub>x</sub> em Chamas Turbulentas sem Pré-mistura**, Tese para a obtenção do título de Doutor em Ciência no curso de Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica na Área de Aerodinâmica, Propulsão e Energia, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2003.

BEER, J. M.; CHIGIER, N. A. **Combustion Aerodynamics**, Applied Science, London, 1972

CALA, C. E.; FERNANDES, E. C.; HEITOR, M. V. **Coherent Structures in Unsteady Swirling Jet Flow**, Experiments in Fluids 40: 267 – 276, 2006.

CALDEIRA-PIRES, A. **Metodologias Avançadas para Estudos em Câmaras de Combustão de Turbinas Estacionárias**, Apresentação do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Eletronorte, 2003.

CHANG, R. K.; LEVINSKY, H. **Lean Premixed Burners**, Lean Combustion-Technology and Control 30: 161 – 191, 2008

CRUZ, P. T. A. **Avaliação da Intensidade de Turbulência em Motores do Ciclo OTTO**, Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Universidade de Brasília, 2005.

CRUZ, T. V. G. **Identificação Experimental de um Modelo Dinâmico de uma Microturbina a Gás com Câmara de Combustão com Baixa Emissão de NO<sub>x</sub>**, Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Universidade de Brasília, 2006.

DINESH, K. K. J. R.; KIRKPATRICK, M. P. **Study of Jet Precession, Recirculation and Vortex Breakdown in Turbulent Swirling Jets using LES**, Computers & Fluids 38: 1232 – 1242, 2009.

DINESH, K. K. J. R.; KIRKPATRICK, M. P.; JENKINS, K. W. **Investigation of the Influence of Swirl on a Confined Coannular Swirl Jet**, Computers & Fluids, 2010.

FERNANDES, E. C.; HEITOR, M. V.; SHTORK, S. I. **An Analysis of Unsteady Highly Turbulent Swirling Flow in a Model Vortex Combustor**, Experiments in Fluids 40: 177 – 187, 2006.

FERREIRA, M. C. **Desenvolvimento e Caracterização de uma Câmara de Combustão DLN – Dry Low NOx com Tecnologia LPP – Lean Premix Prevaporize**, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 2007.

FICK W.; GRIFFITHS, A. J.; O'DOHERTY, T. **Visualization of the Precessing Vortex Core in an Unconfined Swirling Flow**, Optical Diagnostics in Engineering, Vol. 2(1), 19 – 31, 1997.

FITOURI, A., KHAN, M. K., BRUNN, H. H. **A Multiposition Hot-Wire Technique for the Study of Swirling Flows in Vortex Chambers**, Experimental Thermal and Fluid Science, 10:142 – 151, 1995.

GUPTA, A. K. **Gas Turbine Combustion: Prospects and Challenges**, Energy Convers. Mgmt Vol. 38, No. 10- 13, pp. 1311 – 1318, Elsevier Science Ltd, 1997.

IKEDA, M.; KOZAI, Y.; MAKINO, H. **Emission Characteristics of NOx and Unburned Carbon in Fly Ash of Sub-Bituminous Coal Combustion**, JSME International Journal, Series B, Vol. 45, No. 3, 2002.

IKEDA, M.; MAKINO, H.; MORIGANA, H.; HIGASHIYAMA, K. **Influence of Two-stage Air Injection Conditions on NOx and Unburned Carbon of Sub-Bituminous Coal Combustion**, JSME International Journal, Series B, Vol. 47, No. 2, 2004.

JEONG, S.; MINEMURA, Y.; OBAYASHI, S. **Optimization of Combustion Chamber for Diesel Engine Using Kriging Model**, Journal of Fluid Science Technology, Vol. 1, No. 2, 2006.

JOCHMANN, P.; et al. **Numerical Simulation of a Precessing Vortex Breakdown**, International Journal of Heat and Fluid Flow 27 192 – 203, 2006.

KIMOTO, M.; SHIRAI, H.; YAMAMOTO, H.; OTANI, Y. **CFD Simulation of Flow Patterns Pulverized Coal Particle Motions in a Variable Load Burner**, Earozoru Kenkyu, 22 (3), 244 – 249, 2007.

LARAMEE, S. R.; WEISKOPF, D.; SCHNEIDER, J.; HAUSER, H. **Investigating Swirl and Tumble Flow with a Comparison of Visualization Techniques**, Eurographics Associations, 2004.

LAVISION COMPANY. **PIV Techniques**, Página de Prospectos de Produtos e de Técnicas de Medições em Fluidos. Disponível em: <<http://www.lavision.de/en/techniques/piv.php>>. Acessado em outubro de 2010.

LEFEBVRE, A.R. **Gas Turbine Combustion 2nd ed**, Aerodynamics, 101 – 132, Estados Unidos da América, 1998.

LULA, F. A. C. M. **Estudo de um Misturador tipo “T” com as Técnicas de PIV e PLIV**, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 2006.

MARTINS, C. A. **Emissões de Nox em combustor Pulsante do Tubo de RJKE Operando com Combustível Gasoso**, Dissertação de Mestrado em Ciência Espacial/Combustão e Propulsão, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1998.

MATSUZAKI, K.; KUDO, Y.; MUNEKATA, M.; OHBA, H. **A Study of Swirling Flows in a Cyclone Separator Using a Large Eddy Simulation**, Journal of Environment and Engineering, Vol. 2, No. 3, 2007.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (BRASIL). **Balço Energético Nacional, 2010**, Brasília, 2010.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (BRASIL). **Plano Decenal de Expansão de Energia, 2019**, Brasília, 2010.

NEIVA, R. **Análise do Escoamento Turbulento na Saída de uma Câmara de Mistura de um Combustor Tipo LPP**, Pesquisa de extensão de curso, Universidade de Brasília, 2007.

OLIVEIRA, T. F. **Tratamento Estatístico e Simulação Numérica de Grandes Escalas de Escoamentos Turbulentos**, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 2002.

OLIVEIRA, T. F.; CUNHA, F. R.; BOBENRIETH, R. F. M. **A Stochastic Analysis of a Nonlinear Flow Response**, Probabilistic Engineering Mechanics 21 377 – 383, 2006.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. RESOLUÇÃO CONAMA N°003 de 28 de Junho de 1990.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. RESOLUÇÃO CONAMA N°005 de 15 de Junho de 1989.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. RESOLUÇÃO CONAMA N°008 de 06 de Dezembro de 1990.

RIU, K.; KIM, J.; CHOI, I. **Experimental Investigation on Dust Separation Characteristics of a Vortex Tube**, JSME International Journal, Series B, Vol. 47, No. 1, 2004.

SANTOS, M. F. M. **A Importância da Complementaridade Térmica**, Artigo Publicado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2005.

SILVA, L. I. C. **Desenvolvimento de um Sistema de Rotação do Escoamento (Swiler) à Entrada de uma Câmara de Combustão LPP**, Projeto de Graduação, Universidade de Brasília, 2003.

STOPPER, U.; et al. **PIV, 2D LIF and 1D-Raman Measurements of Flow Field, Composition and Temperature in Premixed Gas Turbines Flames**, Experimental Thermal and Fluid Science, 34: 396 – 403, 2010.

SUSAN-RESIGA, R.; et al. **Jet Control of the Draft Tube Vortex Pipe in Francis Turbines at Partial Discharge**, 23<sup>rd</sup> IAHR Symposium, Yokohama, 2006.

SYRED, N. **A Review of Oscillation Mechanism and the Role of the Precessing Vortex Core (PVC) in Swirl Combustion Systems**, Progress in Energy and Combustion Science 32: 93 – 161, 2006.

EPA. Environmental Protection Agency. United States – **National Air Pollution Emission Estimates: 1940 – 1984**. Research Triangle Park, NC: EPA 1986.

VOGADO, J. **PIV Particle Image Velocimetry**, Apresentação Publicada pelo Instituto Superior Técnico-IST, Portugal, Disponível em: <<http://in3.dem.ist.utl.pt/laboratories/03slides/apres7.pps>>. Acessado em outubro de 2010.

WATANABE, H.; KUROSE, R.; KOMORI, S. **Large-Eddy Simulation of Swirling Flows in a Pulverized Coal Combustion Furnace with a Complex Burner**, Journal of Environment and Engineering, Vol. 4, No. 1, 2009.

WEIGAND, P.; MEIER, W.; DUAN, X. R.; STRICKER, W.; AIGNER, M. **Investigations of Swirl Flame in Gas Turbine model Combustor**, Combustion and Flame, 144: 205 – 224, 2006.

WILLERT, C. E., GHARIB, M. **Digital Particle Image Velocimetry**, Experiments in Fluids, Vol. 10, N° 4, pp. 181 – 193, 1991.

## APÊNDICE A – ARQUIVOS NO CD

Devido à quantidade de gráficos, fotos e arquivos de programa optou-se por agrupar todos estes dados no CD, que contém as seguintes pastas:

- Planilha utilizada para o ajuste do fator de superaquecimento dos anemômetros.
- Fotos – Fotos do *Swirler* e do Laboratório de Combustão - ENM UnB.
- Resultados – Programas em MatLab® e gráficos referentes aos resultados de todos os ensaios (sinal de velocidade, função autocorrelação e espectro de potência).