



Gabriela Senra Pessanha Rios Nobrega

**Estudo da influência do número de *swirl*
sobre a estabilidade da combustão em um
queimador pré-misturado**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Luís Fernando Figueira da Silva

Rio de Janeiro
Dezembro de 2018

Agradecimentos

Agradeço à PUC-Rio e ao CNPq, pelo auxílio e incentivo à pesquisa.

Agradeço ao meu orientador, professor Luís Fernando Figueira da Silva, pelo conhecimento, aprendizado, apoio, confiança depositada em mim e paciência.

Aos meus pais, Yvone Senra e Henrique Nobrega, pelo suporte, incentivo e amor incondicional durante toda minha trajetória. Sem eles nada seria possível.

Aos meus colegas de laboratório e amigos, Suzane Pereira, Louise Ramos, Letícia, Ricardo, Alain, pela ajuda, apoio, companheirismo e amizade.

Aos Drs. Philippe Scoufflaire e Nasser Darabiha, por terem cedido o material para o projeto.

À todos os meus amigos e familiares, pelo apoio.

Resumo

Estudo da influência do número de *swirl* sobre a estabilidade da combustão em um queimador pré-misturado

A combustão tem grande importância na indústria, setores de transporte e de geração de energia elétrica. Porém, é um desafio conciliar os processos de combustão com a diminuição dos impactos ambientais. Novas tecnologias estão sendo desenvolvidas com este propósito. A combustão turbulenta pré-misturada com baixa riqueza é uma alternativa para reduzir a emissão de gases poluentes em turbinas e queimadores industriais. A técnica de combustão em presença de *swirl* é uma forma de estabilizar estes equipamentos. O objetivo deste trabalho é o estudo da influência do número de *swirl* na estabilidade da combustão pré-misturada em um queimador laboratorial desenvolvido para queimar hidrocarbonetos e ar em presença de *swirl*. Diferentes *swirlers* foram desenvolvidos e analisados. Os regimes de combustão observados foram classificados e mapeados em um diagrama, identificando as fronteiras e estabilidades dos regimes. A técnica de fluorescência induzida por laser do radical OH foi empregada com objetivo de observar a estrutura das chamas.

Palavras-chave

Combustão; Turbulência; Swirl; Chamas pré-misturadas; Número de *swirl*; Estudo experimental.

Abstract

Study of the influence of the swirl number on the stability of the combustion in a premixed burner

Combustion has great importance in the industry, transportation sectors and electric power generation. However, it is a challenge to reconcile combustion processes with the reduction of environmental impacts. New technologies are being developed for this purpose. Pre-mixed turbulent combustion with lean equivalence ratio is an alternative to reduce the emission of polluting gases in industrial turbines and burners. The combustion technique in the presence of swirl is capable of stabilizing these equipments. The purpose of this work is the study of the influence of the swirl number on the stability of the premixed combustion in a laboratory burner developed to burn hydrocarbons and air in the presence of swirl. Different types of swirlers were developed and analyzed. The observed combustion regimes were classified and mapped in a diagram, identifying the boundaries and stability of the regimes. The laser induced fluorescence technique of the OH radical was used to observe the structure of the flames.

Keywords

Combustion; Turbulence; Swirl; Premixed flames; Swirl Number; Experimental study.

Sumário

1	Introdução	8
2	Objetivo	11
2.1	Objetivos específicos	11
3	Fundamentos Teóricos	12
3.1	Conceitos Fundamentais da Combustão	12
3.2	Fluorescência induzida por laser planar (PLIF)	14
3.3	Número de <i>swirl</i> (<i>S</i>)	16
4	Metodologia	19
4.1	Montagem Experimental	19
4.2	Câmara de Combustão	20
4.3	<i>Swirlers</i> radiais	20
4.4	Laser	22
4.5	Câmera Intensificadora	23
4.6	Procedimento Experimental	24
4.7	Tratamento das imagens experimentais	25
5	Resultados e discussão	26
5.1	Diagrama de regime de combustão	26
5.2	Topologia de chama: PLIF-OH	27
5.3	Desvio padrão do radical OH	34
6	Conclusões e perspectivas	35

Lista de figuras

2.1	Foto da chama em três diferentes regimes. Riquezas: $\phi = 1,12$ (esquerda), $\phi = 0,95$ (centro), $\phi = 0,84$ (direita).	11
3.1	Temperatura de combustão adiabática como função da riqueza e da riqueza normalizada para diferentes combustíveis [2].	14
3.2	Diagrama de Jablonski [16].	15
3.3	Imagem de LIF OH.	16
3.4	Planos de entrada (esquerda) e saída (direita) do <i>swirler</i>	17
4.1	Foto da montagem experimental: 1 - Queimador; 2 - Câmera intensificadora; 3 - Medidores de vazão; 4 - Laser de corante (Sirah); 5 - Laser de bombeio (Brilliant B).	19
4.2	Câmara de combustão: 1 - <i>swirler</i> , 2 - base, 3 - cantoneiras, 4 - janelas de quartzo.	20
4.3	<i>Swirler</i> : 1 - Orifícios de entrada da mistura, 2 - Área de saída da mistura, 3 - Cone invertido (<i>bluff-body</i>).	21
4.4	Áreas de entrada (esquerda) e saída (direita) da mistura metano/ar no <i>swirler</i>	21
4.5	Laser de corante Sirah: esquema do caminho do feixe do laser no interior do Sirah [5].	23
4.6	Imagem média da chama sem filtro (à esquerda) e imagem média da chama com filtro e binarizada.	25
5.1	Diagrama de regime de combustão para <i>swirler</i> SW06I. $S=0,4$	27
5.2	Diagrama de regime de combustão para <i>swirler</i> SW06II. $S=1,3$	28
5.3	Imagens instantâneas binarizadas do radical OH na região I. $\phi=0,57$ e $\dot{V}=1427,4 \text{ cm}^3/\text{s}$	29
5.4	Média das imagens binarizadas do radical OH na região I. $\phi=0,57$ e $\dot{V}=1427,4 \text{ cm}^3/\text{s}$	29
5.5	Imagens instantâneas binarizadas do radical OH na região III. $\phi=0,70$ e $\dot{V}=1443,8 \text{ cm}^3/\text{s}$	30
5.6	Média das imagens binarizadas do radical OH na região III. $\phi=0,70$ e $\dot{V}=1443,8 \text{ cm}^3/\text{s}$	31
5.7	Imagens instantâneas binarizadas do radical OH na região IV. $\phi=0,73$ e $\dot{V}=1448,1 \text{ cm}^3/\text{s}$	31
5.8	Média das imagens binarizadas do radical OH na região IV. $\phi=0,73$ e $\dot{V}=1448,1 \text{ cm}^3/\text{s}$	32
5.9	Imagens instantâneas binarizadas do radical OH na região II. $\phi=0,62$ e $\dot{V}=1434,4 \text{ cm}^3/\text{s}$	33
5.10	Média das imagens binarizadas do radical OH na região II. $\phi=0,62$ e $\dot{V}=1434,4 \text{ cm}^3/\text{s}$	33
5.11	Desvio padrão da região II (à esquerda) e da região III (à direita).	34

Lista de tabelas

4.1 Dimensões dos *swirlers* e número de *swirl*. 22

1

Introdução

A combustão está presente em quase todos os setores da sociedade. É um segmento da ciência que afeta todos os aspectos das atividades humanas. O processo de combustão é utilizado principalmente para gerar calor e energia. Alguns exemplos de aplicação são o aquecimento doméstico, fornos industriais, motores automotivos e turbinas a gás. Apesar da variedade de fontes de energia disponíveis, como a nuclear, solar, eólica e geotérmica, a energia derivada da queima de combustíveis fósseis fornece uma grande parcela das necessidades energéticas mundiais. No Brasil, a energia gerada a partir da combustão de derivados do petróleo, gás natural, lenha, carvão vegetal, carvão mineral e derivados da cana de açúcar representa aproximadamente 80 % da energia utilizada, de acordo com o Boletim Mensal de Energia elaborado pela Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético do Ministério de Minas e Energia (MME) [1].

A combustão é também fonte de eventos destrutivos, como explosões e incêndios florestais, podendo causar contaminação do ar e da água. Com o uso de combustíveis fósseis, o equilíbrio ecológico global está sendo alterado através da contaminação e aquecimento global. Os principais poluentes gerados pela combustão são a fuligem, SO_x , NO_x , hidrocarbonetos não queimados (UHC) e monóxido de carbono (CO) [2]. Esses materiais particulados, presentes no ar poluído, aumentam os riscos de doenças cardiovasculares [3].

O aumento da eficiência energética e a redução do impacto ambiental é um desafio nos processos de combustão. A necessidade de diminuir os danos causados ao meio ambiente promove o desenvolvimento de novas tecnologias nesta área. Muitas destas tecnologias envolvem a estabilização da combustão por *swirl*. A combustão turbulenta pré-misturada em presença de *swirl* é capaz de reduzir significativamente as emissões de poluentes quando comparada com a não misturada.

A utilização de biocombustíveis, tais como o etanol e o biodiesel, é também uma alternativa para a diminuição do consumo de combustíveis fósseis, podendo substituí-los parcial ou integralmente na geração de energia. Estas substâncias derivadas de biomassa renovável são biodegradáveis e praticamente livres de enxofre e compostos aromáticos, assim, não causam impactos elevados ao meio ambiente.

A combustão turbulenta pré-misturada com baixa riqueza reduz a emissão de materiais particulados quando comparada com a combustão não pré-

misturada. Estas chamas frequentemente são consideradas em configurações de câmaras de combustão em presença de *swirl*, onde a influência do número de *swirl* tem se mostrado significativa nas topologias de chama, nos limites de *blow-off* e *flashback* e nas propriedades de estabilidade acústica (Huang and Yang [6]; Candel et al. [4]; Chterev et al. [9]). Os estudos de Huang and Yang [6] abordam o acoplamento entre a dinâmica do escoamento e a excitação das instabilidades de combustão. Candel et al. [4] revisaram o estado da arte em escoamentos com *swirl*, com foco na influência do número de *swirl* na estrutura do escoamento e no início das instabilidades. Estes trabalhos mostram que a geometria do *swirler* e da câmara de combustão influenciam o comportamento de chamas turbulentas com *swirl*. Assim, a caracterização da influência do número de *swirl* é essencial para comparar os diferentes regimes operacionais de combustão.

Utilizando LES, Bourgouin et al. [8] determinaram como a modificação da palheta de um *swirler* radial impacta tanto a distribuição de velocidade média e as estruturas do escoamento instável, quanto o núcleo de vórtice de precessão clássico encontrado nestas configurações de *swirl*. A estrutura do campo de escoamento instável e as topologias de chama correspondentes são influenciadas pela temperatura da parede da câmara de combustão, [20], trabalho que também considerara *swirlers* radiais.

Chterev et al. [9] estudaram a combustão turbulenta pré-misturada com presença de *swirl* axial, comparando os campos de velocidade e as topologias de chama obtidos com LES àquelas medidas experimentalmente. Um modelo de subfiltro dinâmico foi usado para descrever o transporte de quantidade de movimento, enquanto a combustão foi modelada seguindo uma aproximação de chama artificialmente engrossada e um mecanismo de química reduzida.

Medidas do número de *swirl* em fluidos mostraram discrepâncias significativas em relação ao número de *swirl* [19] que pode ser determinado com base em uma análise formal de ordem de grandeza a partir das características geométricas relevantes [18]. Amato et al. [10] desenvolveram um modelo de *blow-off* para combustores baseado na temperatura de combustão adiabática e no efeito associado à taxa de deformação de extinção de chamas pré-misturadas laminares. Mesmo que a escala de tempo da dinâmica de fluidos seja considerada invariante, a evolução da velocidade do *blow-off* com a riqueza da mistura é capturada por este modelo.

Usando uma combinação de um *swirler* axial e um *bluff-body* semelhante ao desenvolvido no presente trabalho, Cavaliere et al. [11] demonstraram que um número de Damköhler de *blow-off* poderia ser expresso para as diferentes chamas estudadas como uma função da potência do combustor. O número de

Damköhler é definido como a raiz quadrada da razão entre o vazão de massa e a escalas de tempo de chama pré-misturadas laminadas não esticadas. Tong et al. [12] verificaram que a geometria da câmara de combustão altera o limite de *blow-off* da mistura metano/ar. Para uma determinada vazão mássica e número de *swirl*, um combustor de seção transversal circular apresenta *blow-off* a uma menor riqueza, quando comparado com um combustor de seção retangular.

Jourdain et al. [23] compararam chamas pré-misturadas em presença de *swirl* com diferentes quantidades de O_2 / N_2 / CO_2 e CH_4 , evidenciando que o número de *swirl*, a temperatura da combustão adiabática e a razão entre a velocidade média do escoamento exercem um efeito controlador na forma e posição da chama. Para as riquezas e diluições de CO_2 estudadas, a transição de forma da chama ocorreu sempre no mesmo valor do número de *swirl*. Watanabe et al. [27]; Taamallah et al. [25] determinaram que os mecanismos que controlam algumas das transições de forma de chama estão associados à razão entre a frequência característica de uma zona de recirculação e a taxa de deformação de extinção de chama pré-misturada. Além disso, esta frequência tem mostrado ser independente do número de Reynolds e ser uma função linear da velocidade média do escoamento de entrada, levando a um número de Strouhal constante.

O presente trabalho é dedicado à caracterização experimental de novos formatos de *swirlers* para a análise da estabilidade da combustão em um queimador pré-misturado. Neste estudo foi desenvolvido, em parceria com o laboratório EM2C/CNRS, CentraleSupélec, um queimador laboratorial capaz de estabilizar chamas turbulentas, o (*BEST Flame*) (*Bioethanol Swirl Turbulent*), que tem como objetivo a queima do etanol. A combustão do etanol é vantajosa não somente por emitir menos poluentes em comparação a combustíveis fósseis mas também por ser uma fonte renovável. O queimador foi projetado para receber, primeiramente, ar e metano pré-misturados, para futuramente ser realizado o estudo com etanol. Os resultados desse projeto podem ser aplicados em turbinas a gás e em queimadores industriais.

Neste trabalho foi realizado o estudo de chamas turbulentas pré-misturadas de hidrocarbonetos e de ar em presença de *swirl*. Para isso foram realizados diversos ensaios, com variadas vazões e composições de misturas e também com *swirlers* de diferentes geometrias. Foi utilizada a técnica de fluorescência induzida por laser do radical OH para evidenciar a estrutura das chamas.

Com isso foi possível identificar os regimes de combustão e analisar sua influência no número de *swirl*.

2

Objetivo

O principal objetivo deste projeto é investigar a estabilidade do processo de combustão, analisando a influência do número de *swirl* sobre os diferentes regimes encontrados. A figura 2.1 mostra a estrutura da chama observada nos três regimes estáveis. À esquerda, a chama ocupa toda a região da câmara de combustão, estando presente na zona de recirculação e acoplada à superfície do *bluff-body*. A chama representada no centro possui formato em V e ainda está acoplada à superfície. À direita a chama possui o formato de tornado e está descolada do *swirler*.

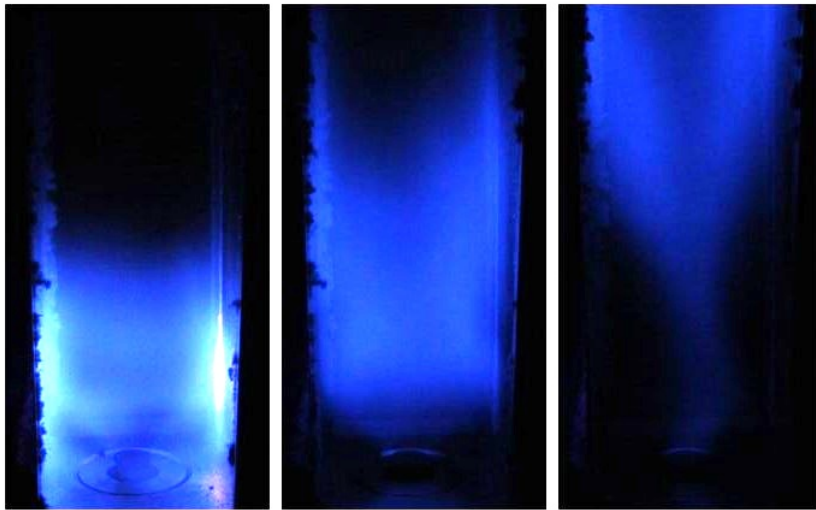


Figura 2.1: Foto da chama em três diferentes regimes. Riquezas: $\phi = 1,12$ (esquerda), $\phi = 0,95$ (centro), $\phi = 0,84$ (direita).

2.1

Objetivos específicos

- Compreender os fundamentos dos processos de combustão
- Compreender a influência do número de *swirl* nos regimes de combustão
- Evidenciar a estrutura das chamas turbulentas pré-misturadas de metano e ar, mediante a utilização da técnica de fluorescência induzida por laser do radical OH

3

Fundamentos Teóricos

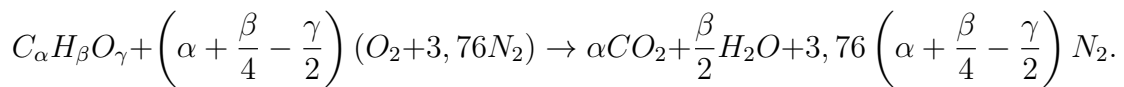
Este capítulo apresenta a teoria estudada para realização deste trabalho. Primeiramente serão abordados conceitos sobre os processos de combustão. Em seguida, será discutida a técnica de fluorescência induzida por laser e por fim o número de *swirl* será explicado.

3.1

Conceitos Fundamentais da Combustão

Combustível e oxidante são essenciais nos processos de combustão. Para uma aplicação prática de um combustível é ideal que ele seja abundante, barato e seu uso deve estar em conformidade com as regulamentações ambientais de emissão. O ar é utilizado como oxidante em grande parte dos processos de combustão, pois além de ser gratuito, possui grande disponibilidade em quase todo o planeta [7].

Em um dispositivo que realiza combustão, existe uma quantidade de ar e combustível que devem ser utilizados para que ambos sejam completamente queimados. Balanceando a equação da reação da combustão para um dado combustível é possível obter esta relação. Uma mistura estequiométrica contém a quantidade exata de combustível e oxidante, que após a combustão, são completamente consumidos e transformados em produtos. A combustão estequiométrica de um hidrocarboneto genérico, $C_\alpha H_\beta O_\gamma$, com o ar é expressa como



Na prática, os combustíveis são consumidos em quantidades de ar diferente da estequiométrica. Se há menos ar do que a quantidade estequiométrica, a mistura é descrita como rica. Em caso de excesso de ar, a mistura é chamada de pobre. Para quantificar a mistura determina-se a razão combustível-ar e a riqueza (razão de equivalência).

A razão combustível-ar, f é a razão da massa de combustível pela massa de ar da mistura dada por:

$$f = \frac{m_f}{m_a}, \quad (3-1)$$

onde m_f e m_a são a massa de combustível e de ar, respectivamente. Para a mistura estequiométrica, a razão combustível-ar f_s se torna:

$$f_s = \frac{M_f}{\left(\alpha + \frac{\beta}{4} - \frac{\gamma}{2}\right) \cdot 4,76 \cdot M_{ar}}, \quad (3-2)$$

onde M_f e M_{ar} são, respectivamente, as massas médias por mol de combustível e ar.

A riqueza, ϕ , é a razão combustível-ar normalizada pela razão combustível-ar estequiométrica.

$$\phi = \frac{f}{f_s}. \quad (3-3)$$

É possível classificar a mistura conforme a sua riqueza. Se $\phi < 1$ a mistura é considerada pobre, se $\phi = 1$ a mistura é estequiométrica e se $\phi > 1$ é considerada uma mistura rica. Operar com condições de mistura pobre é benéfico pois utiliza-se menos combustível, emitindo menor quantidade de poluentes como CO, NO_x e fuligem.

A potência do queimador é calculada como

$$P = \dot{m} \cdot PCI, \quad (3-4)$$

e neste estudo varia entre 0,5 e 3,1 kW.

Outro conceito importante é a temperatura de combustão adiabática. Para uma mistura uniforme com temperatura e composição iniciais é realizada uma aproximação do equilíbrio químico por um processo isobárico e adiabático a pressão p . A temperatura ao final deste equilíbrio será a temperatura de combustão adiabática, T_{ad} . Este fator é importante não somente por indicar a exotermicidade e a temperatura máxima da mistura quando o equilíbrio é atingido, mas também por afetar diretamente a reatividade de processos químicos, incluindo processos que formam poluição. Vale ressaltar que o máximo da temperatura não ocorre para a grandeza unitária devido ao efeito da dissociação. O deslocamento deste máximo é uma consequência da redução da liberação de calor na presença da dissociação do produto. A figura 3.1 mostra como a temperatura de combustão adiabática varia em função da riqueza para diferentes combustíveis [2]. Observa-se que, para todas misturas combustível/ar estudadas a máxima temperatura é obtida na vizinhança da estequiometria. Esta temperatura máxima varia entre 2800 e 2600 K para as misturas consideradas.

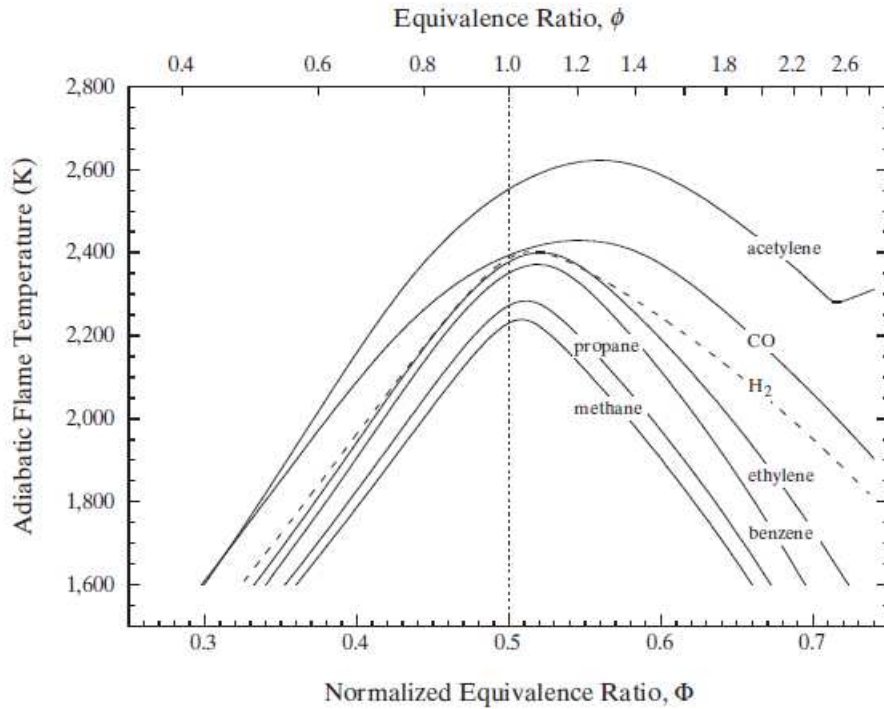


Figura 3.1: Temperatura de combustão adiabática como função da riqueza e da riqueza normalizada para diferentes combustíveis [2].

3.2

Fluorescência induzida por laser planar (PLIF)

Um laser é basicamente composto por três elementos principais: o meio ativo, a fonte de bombeamento e a cavidade ressonante, que é formada geralmente por um par de espelhos paralelos. A fonte de bombeamento excita o meio ativo de forma que haja inversão entre dois níveis de energia do meio. O meio ativo emite fótons por emissão espontânea, porém grande parte dos fótons emitidos é perdida. A fração que incide sobre os espelhos da cavidade é refletida de volta para o meio ativo, assim o feixe refletido atravessa o meio ativo e é amplificado devido a emissões estimuladas. O feixe reflete no segundo espelho, atravessando o meio ativo e sendo amplificado novamente. O feixe de luz é refletido de um espelho para outro e a cada passagem pelo meio é amplificado.

A fluorescência induzida por laser (LIF) é a emissão espontânea de radiação por átomos ou moléculas que foram excitados por radiação laser e é aplicada em processos de combustão para medir concentração de espécies e obter temperatura.

No caso da técnica de PLIF, fluorescência induzida por laser planar, é utilizada a radiação laser em forma de um plano fino, com dimensões

típicas de dezenas de milímetros e espessura de dezenas de micrometros, tornando possível obter o mapeamento bidimensional e tridimensional de espécies presentes na chama.

As fontes de luz laser fornecem radiação intensa com largura estreita e baixa divergência, possibilitando o mapeamento pontual de átomos e moléculas do sistema. Uma fonte de excitação de laser permite estudos de fenômenos que ocorrem em escala de tempo inferiores à nanosegundos.

As técnicas de LIF podem ser utilizadas para determinar concentração de espécies e temperatura, determinar pressão e velocidade, estudar a eficiência dos injetores e estudar a transferência de energia pela observação dos estados estacionários e transientes com relação à excitação laser.

Nesta técnica, moléculas ou átomos são excitados eletronicamente a partir do nível eletrônico fundamental por absorção de radiação laser. Após excitadas, as espécies podem decair para o nível eletrônico fundamental por vários processos, um deles é a emissão espontânea de fótons. A fluorescência é proporcional ao número de espécies que absorvem a radiação.

Ao se excitar uma linha de absorção eletrônica particular da molécula, esta energia é distribuída entre os vários níveis rotacionais dentro do nível excitado antes da emissão de fluorescência. Assim, o sinal de fluorescência detectado é devido à soma de todas as emissões após a excitação. Os estados energéticos de uma molécula e as suas transições foram ilustrados por Aleksander Jablonski e estão representados na figura 3.2. S_1 representa o estado excitado singlete e S_0 o estado fundamental. O estado S_1 é aquele de interesse para o presente trabalho. Outros estados excitados são possíveis como o tripleto (T_1), associado ao fenômeno fosforescência, mas não considerados aqui.

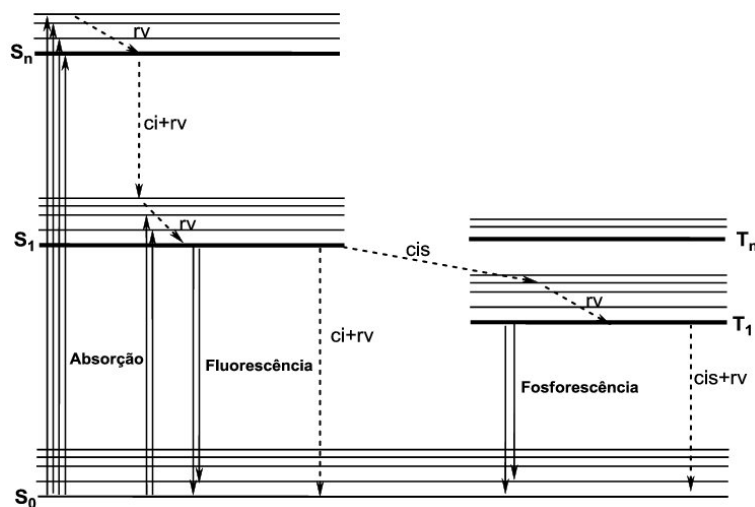


Figura 3.2: Diagrama de Jablonski [16].

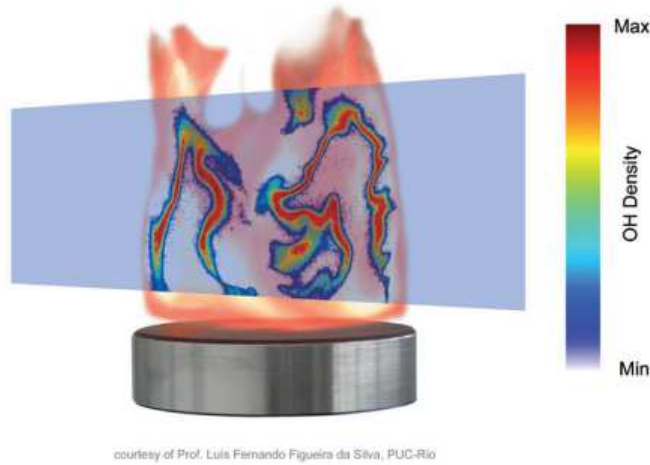


Figura 3.3: Imagem de LIF OH.

A fluorescência é composta de radiação em vários comprimentos de onda e a detecção é realizada a 90° para minimizar a influência da alta intensidade da radiação. Um filtro que deixa passar somente uma faixa de comprimentos de onda da fluorescência é utilizado, evitando a região de excitação ou possíveis fontes de radiação laser espalhadas pelo ambiente que podem ser mais intensas que a fluorescência a ser detectada.

A vantagem da utilização de diagnóstico de combustão com a técnica de fluorescência por laser planar é sua capacidade de fornecer informação instantânea e não intrusiva.

Um exemplo da técnica de LIF OH realizada em uma chama para determinação da densidade do radical OH é observado na figura 3.3. Esta técnica vem sendo empregada em diversos estudos da combustão no laboratório de combustão e turbulência da PUC-Rio, como nos trabalhos de Caetano [28] e Villanueva [29].

3.3

Número de *swirl* (S)

O número de *swirl*, que caracteriza a intensidade do *swirl*, é definido como a razão entre o fluxo axial do momento tangencial, G_θ , e o fluxo do momento axial, G_z . Para o cálculo, foi assumido que o fluido apresenta uma rotação de corpo sólido no swirler, $u_\theta(r) = \omega r$ [19], que a velocidade axial, u_z é uniforme e os efeitos de pressão foram ignorados.

$$S = \frac{G_\theta}{RG_z} = \frac{\int_0^R u_z u_\theta r^2 dr}{R \int_0^R u_z^2 r dr} = \frac{1}{2} \frac{u_\theta(R)}{u_z}, \quad (3-5)$$

onde R é o raio do *swirler*.

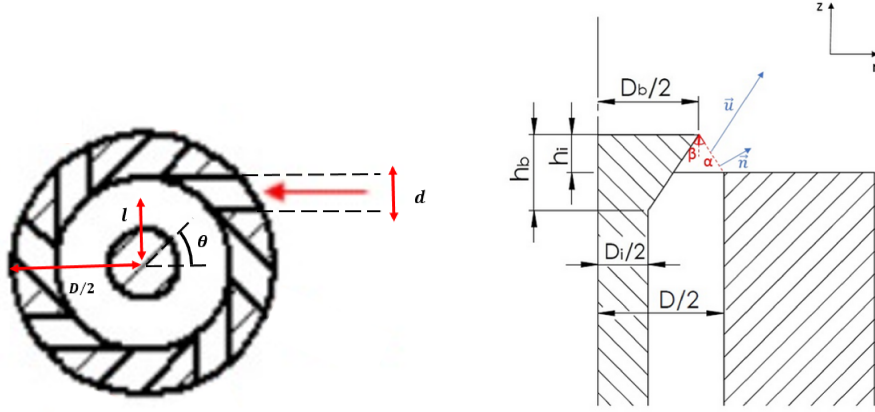


Figura 3.4: Planos de entrada (esquerda) e saída (direita) do *swirler*

A geometria do *swirl* utilizada para definir a equação do número de *swirl* pode ser observada na figura 3.4. Considerando a conservação da massa e a geometria da seção de saída apresentada é possível determinar $u_\theta(R)$.

$$u_\theta = \dot{V} \frac{4}{\pi n d^2} \sin \theta, \quad (3-6)$$

sendo $\sin \theta = \frac{l}{D/2}$ e d o diâmetro dos orifícios.

Ao assumir que o componente velocidade é paralelo à superfície do cone invertido, a vazão volumétrica permite deduzir:

$$\dot{V} = u_z A_z \left(1 + \frac{\tan \beta}{\tan \alpha} \right). \quad (3-7)$$

$$\tan \beta = \frac{D_b - D_i}{2h_b}; \quad \tan \alpha = \frac{D - D_b}{2h_i}, \quad (3-8)$$

onde D é o diâmetro interno do *swirler*, D_b o diâmetro do cone invertido, D_i o diâmetro do cilindro interno, h_b é a altura do cone invertido e h_i é o espaçamento entre a superfície do *swirler* e do topo do cone.

Assim, $1/u_z$ pode ser expresso:

$$\frac{1}{u_z} = \frac{\pi D^2}{4\dot{V}} \left[1 - \frac{D_b^2}{D^2} \right] \left[1 + \frac{D_b - D_i}{D - D_b} \frac{h_i}{h_b} \right]. \quad (3-9)$$

O número de *swirl* pode então ser definido:

$$S = \underbrace{\frac{lD}{nd^2}}_{(a)} \underbrace{\left[1 - \left(\frac{D_b}{D} \right)^2 \right]}_{(b)} \underbrace{\left[1 + \frac{D_b - D_i}{D - D_b} \frac{h_i}{h_b} \right]}_{(c)}, \quad (3-10)$$

sendo l a distância do centro a entrada da mistura e n o número de orifícios.

A equação 3-10 representa a combinação dos seguintes fatores:

- (a) representa o número de *swirl* usual,
- (b) é a influência do cilindro central,
- (c) indica o efeito combinado do ângulo e altura do cone invertido.

Assim, observa-se como a geometria influencia o número de *swirl*, que neste estudo varia na faixa de 0,4 a 1,4. Com a equação é possível analisar quais variáveis possuem maior influência em S . Observa-se que o número de *swirl* aumenta com alturas do cone invertido, h_i maiores. O número de orifícios também é um parametro significativo, pois um *swirler* com mais furos apresenta menor S . O diametro d destes orifícios também causa uma diminuição do número de *swirl*.

Neste estudo a combustão turbulenta prémisturada com *swirl* é caracterizada. Esta caracterização é realizada para diferentes riquezas da mistura combustível/ar e quatro valores do número de *swirl*. A estrutura das chamas é colocada em evidência mediante a utilização da técnica de fluorescência induzida por laser do radical OH. No capítulo seguinte a montagem experimental empregada é descrita.

4

Metodologia

Este capítulo apresenta os materiais utilizados e os métodos experimentais seguidos nos ensaios. O queimador utilizado, denominado *BEST Flame* (*Bioethanol Swirl Turbulent*), foi desenvolvido em parceria com o laboratório EM2C/CNRS, CentraleSupélec (França), assim como os *swirlers*.

4.1

Montagem Experimental

Os ensaios foram realizados numa bancada experimental que está representada na figura 4.1. Esta bancada foi projetada de maneira a que fosse possível realizar as imagens das chamas, controlar a vazão da mistura e manter o plano laser perpendicular à câmera intensificadora. A configuração experimental é composta pelo queimador, a câmara de combustão, um medidor de vazão para o metano e um para o ar, um controlador de vazão, uma câmera CCD com intensificador, um laser de corante e um laser Nd:YAG.

O medidor de vazão utilizado para o metano é da marca Bronkhorst (series F-201AC), com um fundo de escala de $0,5 \text{ Nm}^3/h$ e 0,1% de incerteza. Para o ar foi utilizado um medidor de vazão também da marca Bronkhorst (series F-202AV), com fundo de escala $5 \text{ Nm}^3/h$ e 0,1% de incerteza. O controle dos gases é realizado através de um aparelho eletrônico que ajusta o percentual da vazão do escoamento. Nesse trabalho, vazão volumétrica total da mistura varia de $397,2 \text{ cm}^3/s$ a $1448,1 \text{ cm}^3/s$.

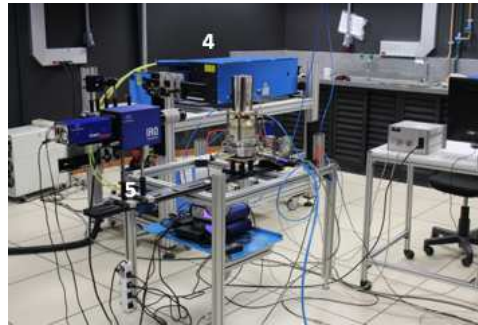
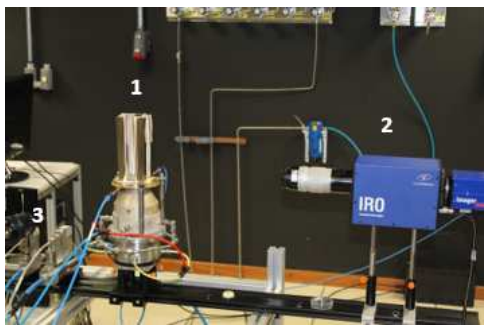


Figura 4.1: Foto da montagem experimental: 1 - Queimador; 2 - Câmera intensificadora; 3 - Medidores de vazão; 4 - Laser de corante (Sirah); 5 - Laser de bombeio (Brilliant B).

4.2

Câmara de Combustão

A figura 4.2 mostra a câmara de combustão desenvolvida. A mistura de metano e ar é introduzida pelo *swirler*, representado na figura pelo número 1. O confinamento da chama, isto é, a câmara de combustão, consiste em uma base de aço, (2), quatro cantoneiras (3) e quatro janelas de quartzo (4). A base está em contato com gases a altas temperaturas, logo foi desenvolvida de modo que pudesse ser resfriada por água a temperatura ambiente. A temperatura da água de resfriamento não é medida. As cantoneiras estão espaçadas em 40 mm e possuem 170 mm de altura e foram projetadas para que não fiquem em contato com as chamas. As janelas de quartzo, de 10 mm de espessura, são transparentes, assim permitem a visualização da região de combustão, e resistem a altas temperaturas. Utiliza-se um material isolante para evitar que as peças se fundam entre si e reduzir o risco do quartzo trincar. A base foi usinada em latão e as cantoneiras em aço inox.

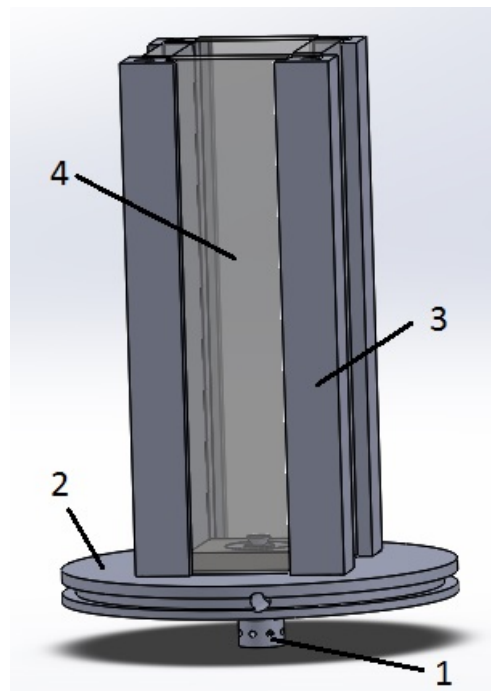


Figura 4.2: Câmara de combustão: 1 - *swirler*, 2 - base, 3 - cantoneiras, 4 - janelas de quartzo.

4.3

Swirlers radiais

A figura 4.3 mostra um exemplo do *swirler* utilizado. Os *swirlers* projetados são radiais. Tal como o ilustrado na figura 4.3, a mistura é injetada na câmara através dos orifícios na base no *swirler*, que são inclinados em relação

com o eixo principal. Estes furos são tangentes à parede de 10 mm do *swirler*, que possui 33 mm de altura. Existe um cilindro de 4 mm na parte central com um cone invertido na base superior de 8 mm. Esse cone funciona como um *bluff-body*, sendo onde a chama se ancora e se estabiliza. Foram construídos *swirlers* com 8, 6 e 5 furos. Foram construídos também cilindros centrais com alturas distintas para que houvesse variação na altura do *bluff-body*. As áreas de entrada e saída da mistura de metano/ar pelo *swirler* estão representadas na figura 4.4. Assim é possível observar que o escoamento entra pelos orifícios radialmente. A tabela 4.1 mostra as dimensões dos diferentes *swirlers* utilizados. Os dois primeiros *swirlers* foram objeto de estudo anterior [30], no qual a instalação experimental dispunha de rotâmetros de maior incerteza. Neste trabalho optou-se por ensaiar apenas os *swirlers* SW06I e SW06II, que abrangem uma maior faixa de S.

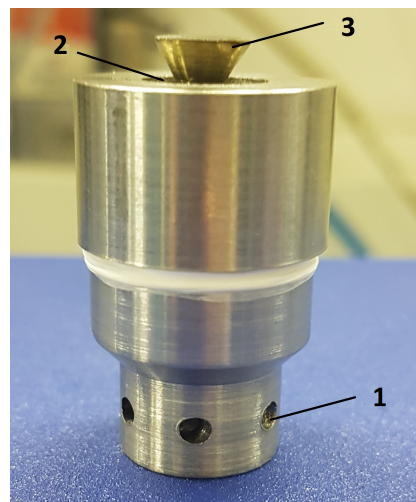


Figura 4.3: *Swirler*: 1 - Orifícios de entrada da mistura, 2 - Área de saída da mistura, 3 - Cone invertido (*bluff-body*).

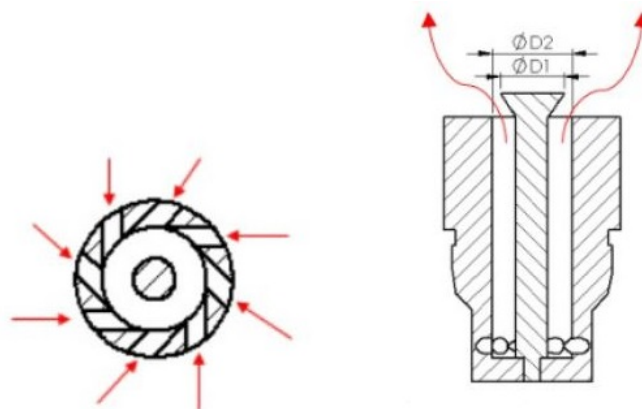


Figura 4.4: Áreas de entrada (esquerda) e saída (direita) da mistura metano/ar no *swirler*.

Tabela 4.1: Dimensões dos *swirlers* e número de *swirl*.

	SW08	SW08II	SW05	SW06I	SW06II
n (mm)	8	8	5	6	6
d (mm)	2	2	2,5	2,3	2,3
D (mm)	10	10	10	10	10
D_i (mm)	4	4	4	4	4
D_b (mm)	8	8	8	8	8
h_i (mm)	3	0	3	0	3
h_b (mm)	3	3	3	3	3
S	1,4	0,9	1,3	0,4	1,3

4.4

Laser

Para realizar a técnica de fluorescência induzida por laser utiliza-se um laser de corante e um laser de bombeio, que serão especificados nesta seção. O laser deve estar alinhado com a câmera, de modo que fiquem perpendiculares entre si para evitar a distorção geométrica do plano.

4.4.1

Laser de bombeio

O laser de neodímio (Nd) é um laser de estado sólido que permite diversos regimes de operação e produz vários comprimentos de onda com auxílio de cristais não lineares.

O meio ativo é composto por uma matriz sólida dopada com Nd, geralmente YAG (*Yttrium Aluminum Garnet*). O bombeamento do laser é feito com fontes de luz ressonantes com as transições em $0,73 \mu\text{m}$ e $0,8 \mu\text{m}$. Os elétrons excitados para as bandas 3 decaem rapidamente para o nível 2 sem emissão de fótons. A ação laser ($1,064 \mu\text{m}$) ocorre entre os níveis 2 e 1. Por último os elétrons no nível 1 relaxam rapidamente para o estado fundamental, sem emissão de fótons novamente.

O laser é equipada com geradores de harmônicos integrados. Estes dispositivos são baseados em cristais não-lineares e permitem transformar n fótons em um único e multiplicar a frequência de operação do laser por fatores inteiros.

O laser utilizado é da marca Quantel, Brilliant b, cujo o terceiro harmônico, de 355 nm, possui duração de pulso de 4 ns. Ele possui alta energia de pulso e comprimento de onda que permite a excitação do laser de corante. Nos experimentos realizados, o laser operou a uma potência variando entre 1,2 W a 1,57 W.

4.4.2

Laser de corante

O laser de corante utilizado foi o Sirah, CSTR-G-3000, mostrado na figura 4.5. Esta figura ilustra a situação na qual dois lasers de corante são usados em paralelo. No presente trabalho, apenas um laser de corante foi empregado. O meio ativo deste laser é uma solução de corante orgânico em um solvente. Este laser permite a observação de determinadas faixas de comprimentos de onda, nas quais as espécies químicas são excitadas. Para estudar o OH foi utilizado o corante Coumarino-153.

O laser de corante é formado por um sistema óptico, onde o feixe passa por múltiplas reflexões na cavidade do laser. Com a cavidade ressonante, o espectro de emissão se estreita e o perfil de linha se torna mais estreito que o de emissão espontânea.

Neste trabalho, o laser operou a uma potência que variou entre 10 mW a 16 mW.

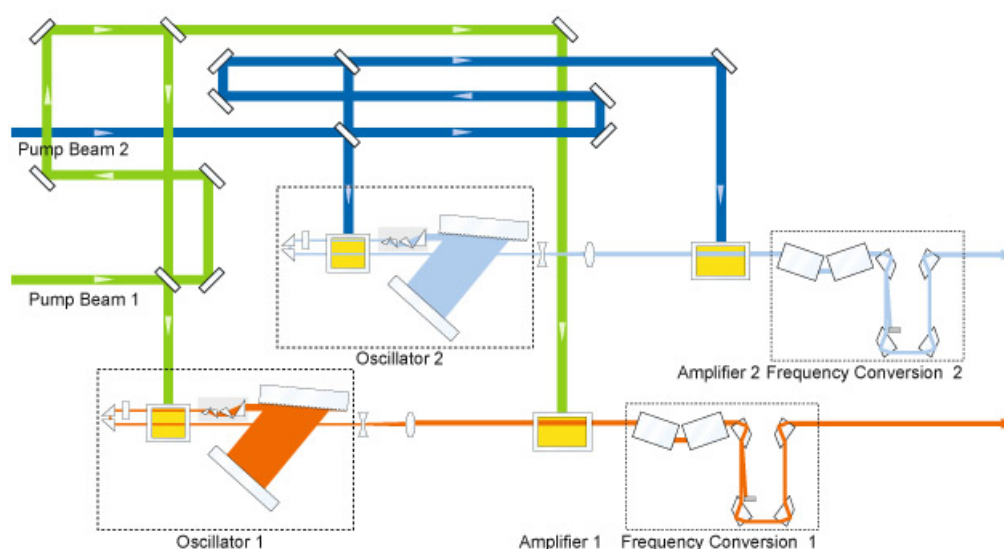


Figura 4.5: Laser de corante Sirah: esquema do caminho do feixe do laser no interior do Sirah [5].

4.5

Câmera Intensificadora

É necessário utilizar um intensificador de imagens pois a intensidade do sinal de fluorescência do OH não é suficiente para ser captado pela câmera CCD. Assim, foi utilizado um intensificador IRO (*Intensified relay-optics*) da marca LaVision acoplado a câmera CCD modelo Image Intense (*Charge Coupled Device*), da mesma marca. A fluorescência do OH possui comprimento

de onda de 310 nm, logo foi utilizado um filtro passa banda neste comprimento de onda.

O intensificador é um dispositivo de obturador eletrônico com tempo de exposição variável, que permite que a câmera CCD seja modulada e tenha o tempo de exposição reduzido.

A ICCD é controlada pelo computador durante a aquisição de imagens, ajustando o tempo de aquisição de dados desejado. Nos experimentos realizados o tempo de abertura, "gate", foi de 100 ns e o foi utilizado um ganho de 70%. A aquisição dos dados foi realizada pelo software DaVis 8 da LaVision.

4.6

Procedimento Experimental

Foram realizados experimentos com *swirlers* com variações no número de furos e na altura do cilindro central. A variação nas áreas de entrada e saída foi realizada para observar a influência da geometria no número de *swirl*. Os testes realizados para *swirlers* de 8 furos com diferentes alturas de *bluff-body* foram aprofundados em trabalhos anteriores. (citar encit) Os *swirlers* utilizados possuem as seguintes variações: um *swirler* denominado SW05 com 5 furos, um SW06 com 6 furos e um SW08 com 8 furos, tal como indicado na tabela 4.1. Neste trabalho são discutidos os resultados dos *swirlers* SW06I e SW06II, ambos com 6 orifícios porém com alturas de *bluff-body* diferentes.

Para identificar os regimes de combustão, o procedimento teve início com a maior vazão de ar e metano possível. A vazão do metano foi diminuída, passando por todos os regimes de combustão que foram anotados, até chegar no limite de *blow-off*, ou seja, quando a chama apaga. A quantidade de ar foi diminuída em 10% e o mapeamento das regiões encontradas foi repetido para cada mudança da porcentagem de ar. Os regimes foram identificados visual e acusticamente. A chama é dita estável quando há pouca variação da sua forma e instável quando há muita pulsação, ocorrendo entre as transições de um formato de chama para outro.

Ao utilizar a técnica de fluorescência por laser é preciso alinhar o laser de forma que o feixe luminoso fique centralizado na base da câmara de combustão. A câmera intensificadora é posicionada perpendicularmente ao plano laser e equipada com um filtro passa banda de 310 nm, possibilitando obter imagens do radical OH presente na chama. As imagens foram captadas para cada regime estável encontrado e também para um instável. Para a captura de imagens foi realizada a calibração dimensional da câmera com auxílio de uma placa de calibração projetada e confeccionada na PUC-Rio. Mais detalhes podem ser encontrados nos trabalhos

4.7

Tratamento das imagens experimentais

As imagens obtidas pela técnica de PLIF-OH foram tratadas para obter melhor qualidade. Primeiramente um filtro gaussiano foi aplicado com o objetivo de diminuir o ruído da imagem. Em seguida, as imagens foram binarizadas com nível 8, indicando ou não a presença do radical OH. Por último, foram calculadas a média e o desvio padrão da amostra de 4000 imagens para cada regime observado. A figura 4.6 compara a imagem obtida sem o tratamento com a imagem tratada. A imagem sem nenhum tratamento está à esquerda e a imagem tratada com um filtro gaussiano e binarizada à direita. Pode-se observar que o sinal da imagem à esquerda apresenta mais ruídos.

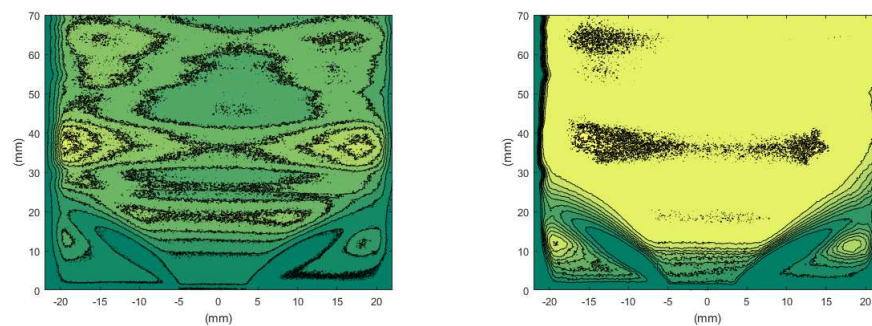


Figura 4.6: Imagem média da chama sem filtro (à esquerda) e imagem média da chama com filtro e binarizada.

5

Resultados e discussão

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com os experimentos. Primeiramente, são discutidos os diagramas de regime de combustão e em seguida apresentada a topologia da chama através das imagens obtidas com a técnica de fluorescência por laser. O mapeamento dos regimes de combustão obtidos para *swirlers* diferentes são comparados levando em consideração seu respectivo número de *swirl*.

5.1

Diagrama de regime de combustão

Os regimes de combustão observados nos experimentos foram classificados de acordo com sua estabilidade, que foi identificada visualmente e acusticamente. Assim, foram definidas três regiões estáveis, duas instáveis e o limite de *blow-off*, ou seja, quando a chama é extinta. Com esta classificação foi possível obter diagramas de regime de combustão. A vazão volumétrica total e a riqueza foram os parâmetros escolhidos para representar os regimes de combustão. Foram feitos ensaios com um *swirler* de 6 furos e foi variada a altura do cilindro central. As figuras 5.1 e 5.2 mostram, respectivamente, o diagrama para o *swirler* SW06I com o *bluff-body* rente à superfície do *swirler* e para o SW06II, com o *bluff-body* com altura superior à esta superfície. Em ambos os casos foram consideradas as mesmas condições de operação e foram observados os mesmos cinco regimes de combustão.

Os regimes observados foram classificados de acordo com estudos realizados previamente [22]. A chama observada na região IV se estabiliza na zona de recirculação e é chamada de chama M devido ao formato apresentado. Ao diminuir a riqueza, é alcançada uma primeira zona de instabilidade, IVf, na qual a chama oscila. Em uma riqueza menor, chega-se a uma nova região estável, III, onde a chama apresenta o formato em V. Em seguida, ocorre uma nova instabilidade, II. Diminuindo a riqueza, observa-se a última região de estabilidade, I, na qual a chama apresenta um formato de tornado. Ao reduzir novamente a riqueza, ocorre o *blow-off*, ou seja, a chama se apaga.

Os símbolos representam as fronteiras de cada regime. O símbolo \bullet marca o limite entre os regimes IV e IVf. O símbolo $+$ marca o limite entre os regimes IVf e III. O símbolo $*$ é o limite entre os regimes III e II. O símbolo \square marca a fronteira entre os limites II e I. Por fim, o símbolo \triangle delimita o regime I do *blow-off*.

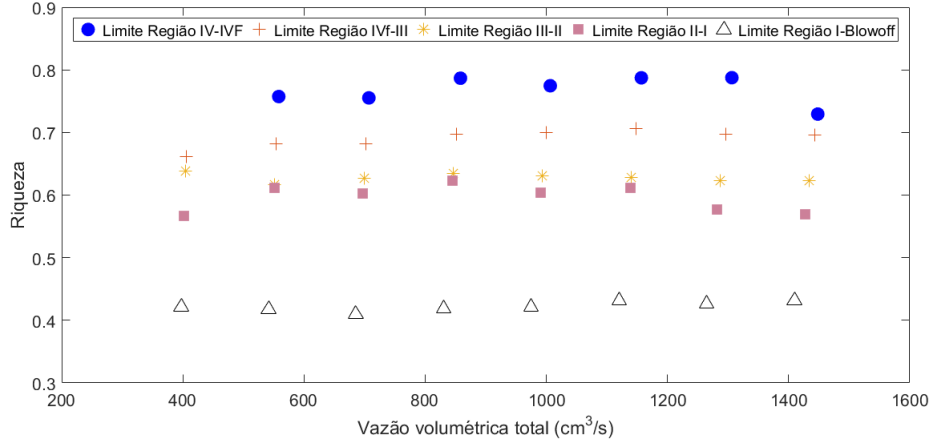


Figura 5.1: Diagrama de regime de combustão para *swirler* SW06I. $S=0,4$.

Pelo diagrama de regime do SW06I, na figura 5.1, é possível observar que a fronteira entre os regimes IV e IVf corresponde à uma máxima riqueza de 0,87 e à uma riqueza mínima de *blow-off* de 0,4. A região de estabilidade I ocorre numa faixa de riqueza que varia de 0,4 a 0,6 e a região III apresenta uma faixa de riqueza mais estreita, variando de 0,62 a 0,7. Assim, a estabilidade da região I pode ser mantida mais facilmente e apresenta menor riqueza, melhorando as condições de operação neste regime.

O diagrama de regime de combustão do SW06II, figura 5.2, mostra que a riqueza máxima é 0,7 e a mínima é 0,35. Neste regime a região de estabilidade I e III ocorrem em faixas mais estreitas. A região I varia entre a riqueza 0,35 a 0,5, enquanto a região III varia na faixa de riqueza de 0,6 a 0,68. A região de instabilidade II para uma extensão maior de riqueza, entre 0,45 e 0,63. Isto indica que a chama no *swirler* SW06II apresenta mais dificuldade para se manter estável. Neste caso, não foi possível estabilizar a chama para as menores vazões e riquezas. A chama se apagava antes de alcançar o último regime.

É possível observar que o SW06II opera a riquezas mais baixas, porém suas zonas de instabilidade são maiores que no SW06I. Para o *swirler* SW06I, o número de *swirl* calculado é 0,4. Já para o SW06II o S calculado foi 1,3.

5.2

Topologia de chama: PLIF-OH

Para caracterizar a topologia de chama, foi realizada a técnica de fluorescência induzida por laser. As imagens foram obtidas utilizando o *swirler* SW06 com *bluff-body* rente à superfície (SW06I) para a maior vazão de ar possível. A vazão do metano foi variada de forma que os diferentes regimes fossem observados. Primeiramente serão apresentadas as chamas estáveis, em seguida

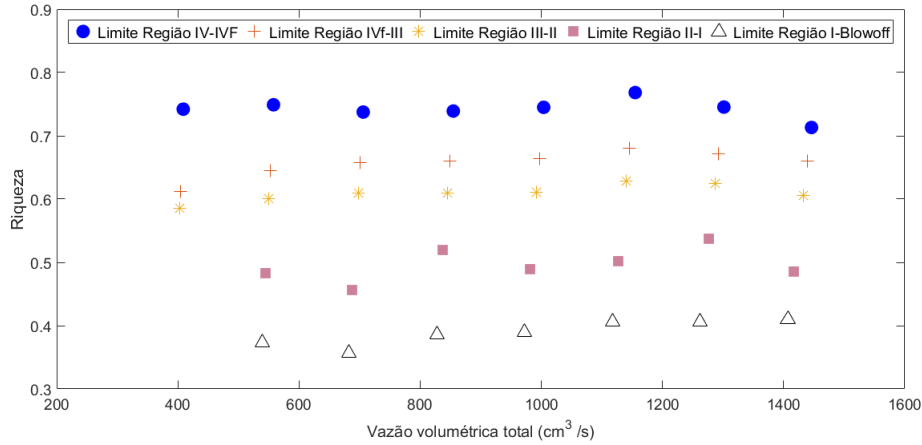


Figura 5.2: Diagrama de regime de combustão para *swirler* SW06II. $S=1,3$.

as instáveis.

5.2.1 Região estável I

A região I é uma região de estabilidade na qual a chama apresenta o formato de tornado. A figura 5.3 representa as imagens instantâneas do radical OH neste regime. Já a figura 5.4 apresenta a média das 4000 imagens instantâneas binarizadas obtidas. A binarização resulta no valor 1 quando houver o radical OH presente em determinado ponto e 0 caso contrário. Assim, a média das imagens binarizadas indica a probabilidade de se observar o radical OH ao longo da câmara de combustão.

Pela figura 5.4, observa-se que a chama está predominantemente na região superior do queimador, não estando presente nas proximidades do *swirler*. As imagens instantâneas, figura 5.3, mostram que há uma descontinuidade na frente de chama. Esta chama, descolada da superfície do *swirler*, é caracterizada, também, pela presença de bolsões de OH. Isto sugere tanto que a chama pode ser fortemente corrugada pelo escoamento quanto a possibilidade da formação de bolsões de OH rodeados de gases frescos. A técnica PLIF não permite discriminar entre estas duas possibilidades.

5.2.2 Região estável III

Na região estável III a chama apresenta o formato V. A figura 5.5 mostra as imagens instantâneas do radical OH, enquanto a figura 5.6 apresenta a média das 4000 imagens binarizadas. A figura 5.5 mostra que a chama instantânea apresenta estrutura mais semelhante neste regime, indicando maior

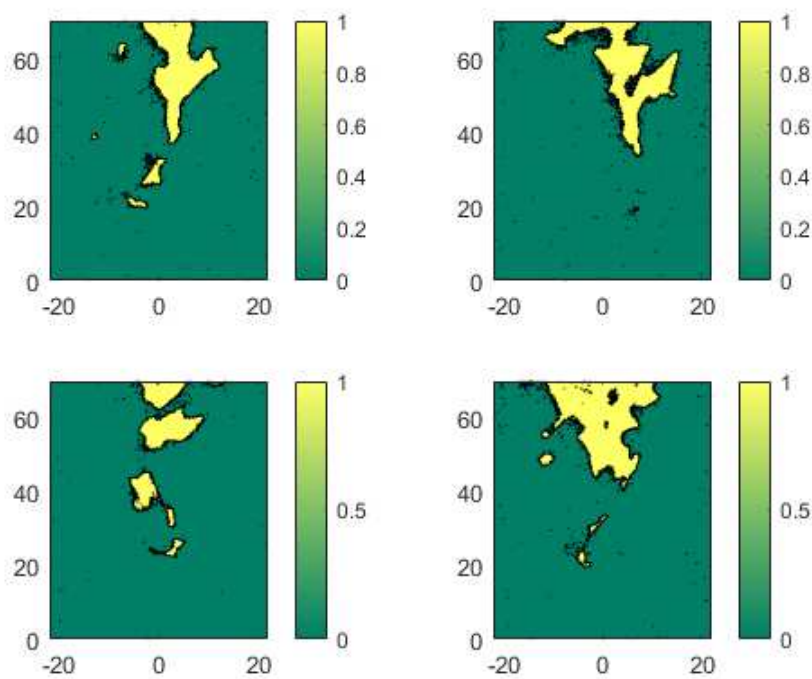


Figura 5.3: Imagens instantâneas binarizadas do radical OH na região I. $\phi=0,57$ e $\dot{V}=1427,4 \text{ cm}^3/\text{s}$.

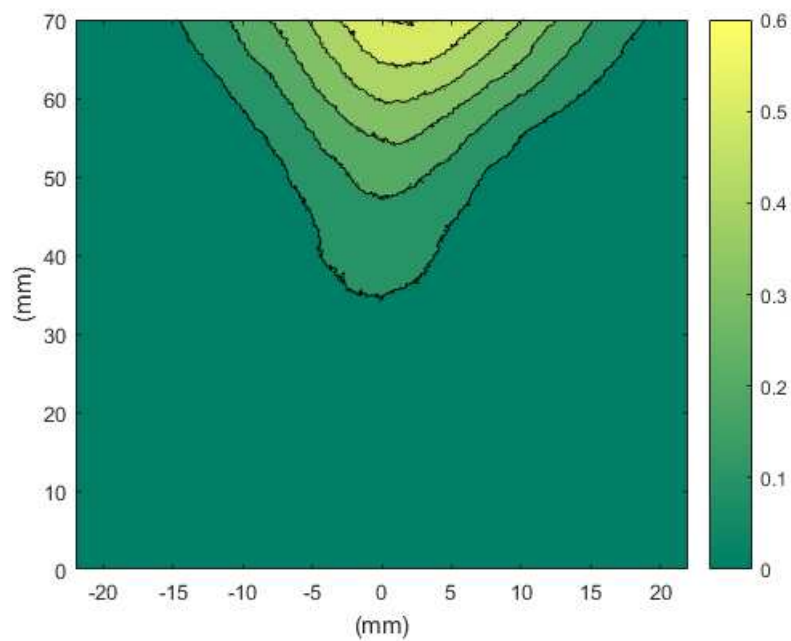


Figura 5.4: Média das imagens binarizadas do radical OH na região I. $\phi=0,57$ e $\dot{V}=1427,4 \text{ cm}^3/\text{s}$.

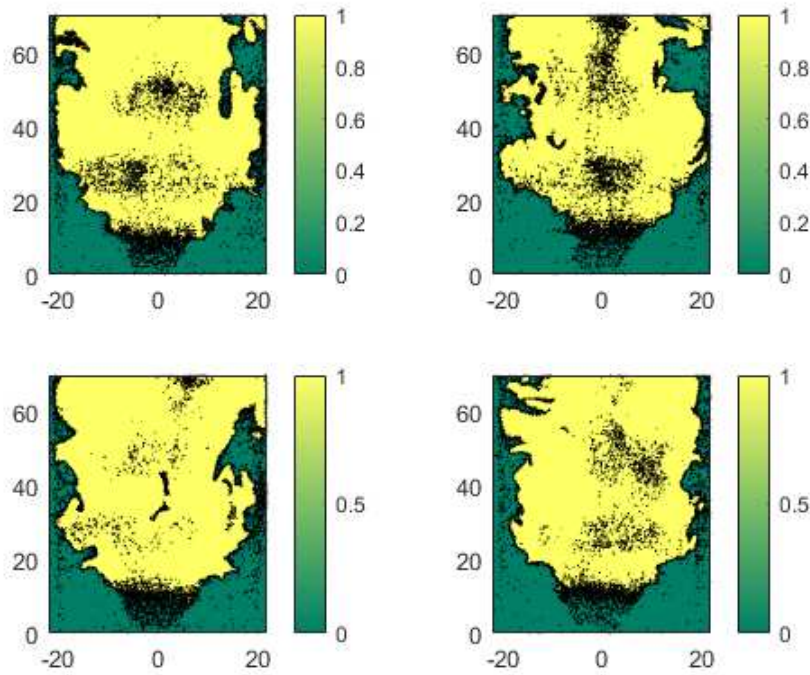


Figura 5.5: Imagens instantâneas binarizadas do radical OH na região III. $\phi=0,70$ e $\dot{V}=1443,8 \text{ cm}^3/\text{s}$.

estabilidade. É possível observar que o radical OH não está presente em nenhum momento na zona de recirculação. A chama instantânea se mantém ancorada à superfície do *swirl* e é corrugada pela turbulência. A presença de OH a jusante da frente de chama acontece devido à sua existência nos gases queimados. Com a média das imagens, é possível observar que a frente de chama tem espessura de aproximadamente 5 mm, sendo maior que a da chama laminar. A média indica também que a probabilidade de haver OH na zona de recirculação é zero.

5.2.3

Região estável IV

Na figura 5.7 é possível observar que a chama apresenta a mesma estrutura em instantes diferentes durante o regime estável IV, o OH está presente na zona de recirculação em todas as imagens instantâneas. A existência de chama na região de recirculação também foi observada por Shanbhogue et al [15] e Guiberti et al. [21]. A figura 5.8 representa a média das imagens instantâneas binarizadas e confirma que o radical OH está presente na zona de recirculação. A chama possuiu formato M e se mantém acoplada ao *swirler*. Esta é a região que possui a maior vazão de metano e, logo, riqueza da mistura combustível/ar.

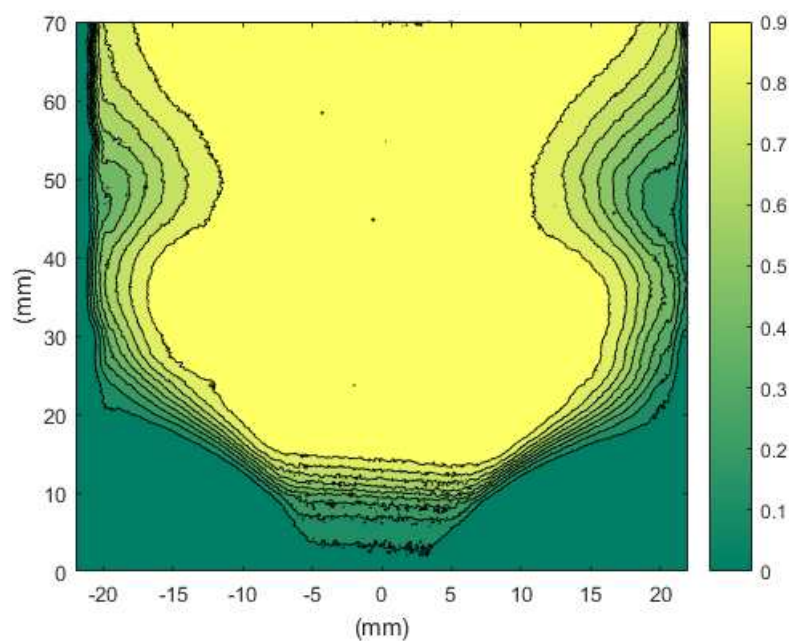


Figura 5.6: Média das imagens binarizadas do radical OH na região III. $\phi=0,70$ e $\dot{V}=1443,8 \text{ cm}^3/\text{s}$.

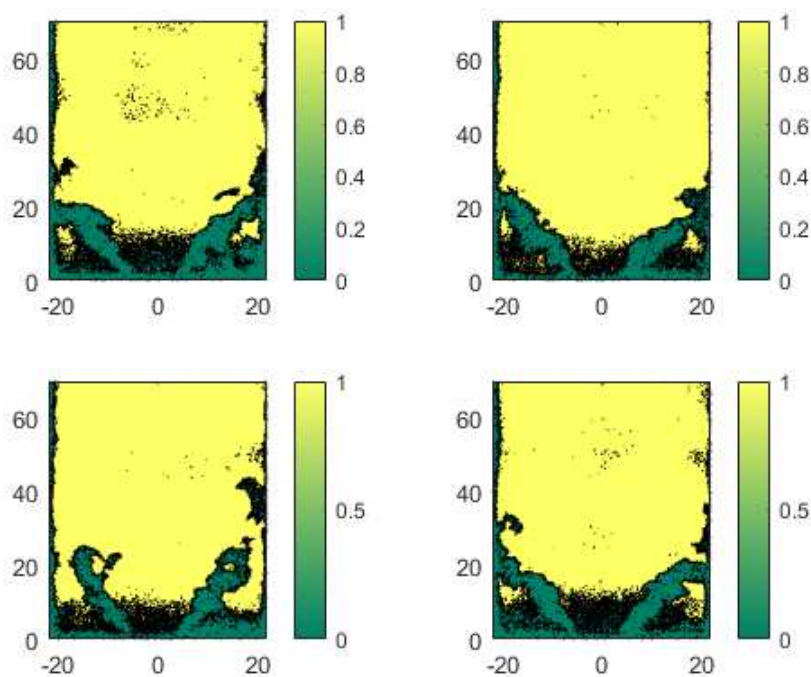


Figura 5.7: Imagens instantâneas binarizadas do radical OH na região IV. $\phi=0,73$ e $\dot{V} = 1448,1 \text{ cm}^3/\text{s}$.

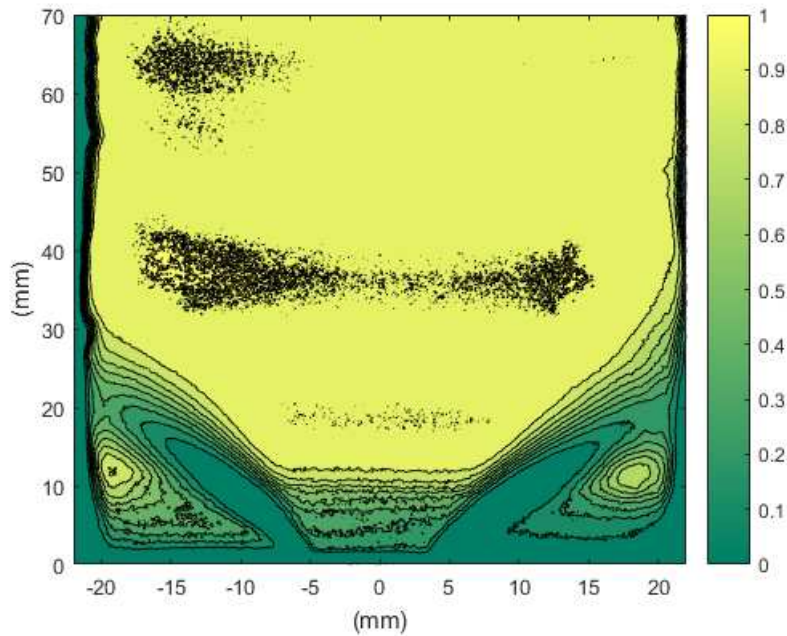


Figura 5.8: Média das imagens binarizadas do radical OH na região IV. $\phi=0,73$ e $\dot{V}=1448,1 \text{ cm}^3/\text{s}$.

5.2.4

Região instável II

A região II é uma região de instabilidade onde ocorre a pulsação da chama na câmara de combustão. A figura 5.9 mostra que a posição do radical OH varia significativamente ao longo deste regime, confirmando a instabilidade. O formato da chama não se mantém em um determinado padrão como ocorre nos outros três regimes apresentados acima. Esta região apresenta maior fragmentação da distribuição instantânea de OH, com maior número de bolsões e frente de chama mais corrugada. Isto pode estar relacionado à extinções observadas para baixas vazões e potências.

A média das imagens, figura 5.10, mostra como o radical OH se distribui neste regime, variando entre o formato da chama tornado e o da chama V, o que indica que esta região é uma transição de regimes. A figura 5.10, a média, indica que existe um duplo máximo de presença de OH, confirmando a oscilação que é observada nas imagens instantâneas.

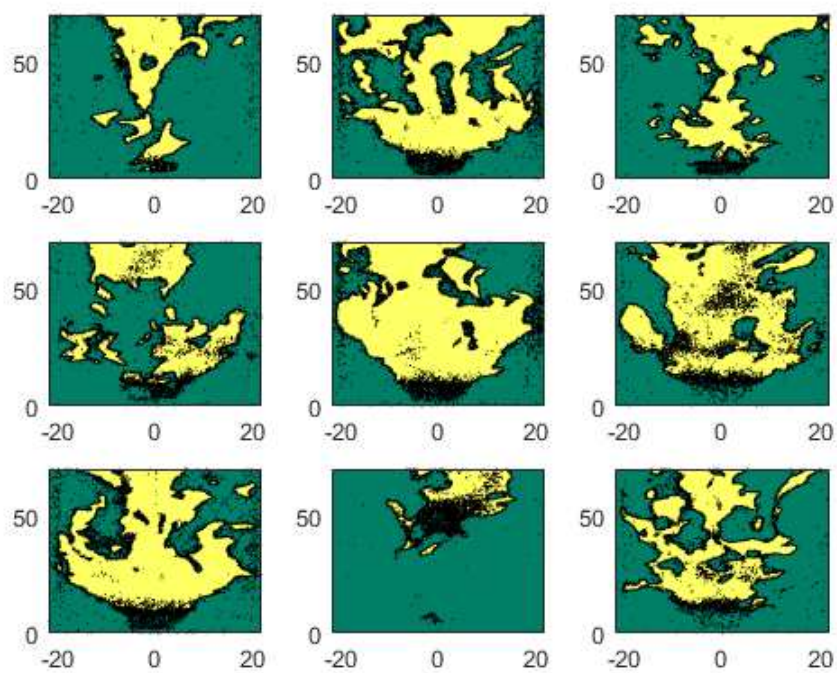


Figura 5.9: Imagens instantâneas binarizadas do radical OH na região II. $\phi=0,62$ e $\dot{V}=1434,4 \text{ cm}^3/\text{s}$.

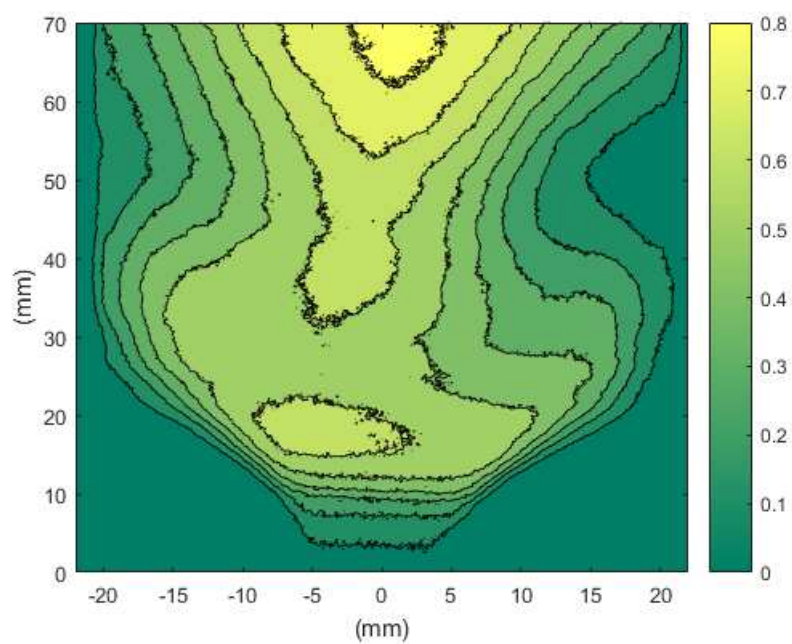


Figura 5.10: Média das imagens binarizadas do radical OH na região II. $\phi=0,62$ e $\dot{V}=1434,4 \text{ cm}^3/\text{s}$.

5.3

Desvio padrão do radical OH

O desvio padrão é uma medida que expressa a dispersão de um conjunto de dados, indicando o quanto ele é uniforme. O desvio padrão das quatro mil imagens binarizadas para cada regime indica a sua uniformidade. A figura 5.11 mostra a comparação entre o desvio padrão do regime instável II e o do regime estável III. Percebe-se que para o regime instável a variação é grande em toda a região ocupada pela chama. Isto é uma caracterização suplementar da instabilidade deste regime e demonstra que a oscilação da chama é significativa em todo volume da câmara de combustão. No regime estável, a variação é maior na região da frente de chama média. Esta frente de chama tem origem no cone invertido do *swirler* e interage com a parede da câmara de combustão. Entretanto, a região central de OH é desprovida de flutuações de OH, o que confirma que apenas gases queimados estão presentes.

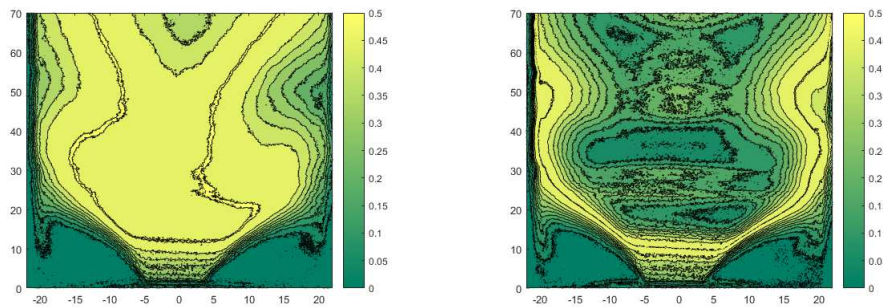


Figura 5.11: Desvio padrão da região II (à esquerda) e da região III (à direita).

Conclusões e perspectivas

A combustão é um processo fundamental para a indústria, meios de transporte e geração de energia elétrica. Porém emite poluentes nocivos ao meio ambiente e ao ser humano. O desenvolvimento de novas tecnologias, como o queimador *BEST Flame*, busca conciliar o aumento da eficiência energética com a diminuição do impacto ambiental. O presente estudo permitiu mapear o comportamento do queimador, analisar a estrutura das chamas turbulentas pré-misturadas e verificar a influência do número de *swirl*. Permitiu também a redação de um artigo apresentado oralmente em congresso.

Foi possível identificar e caracterizar os regimes de combustão. Verificou-se que a estrutura da chama se repete para os variados *swirlers* testados. Todos os ensaios apresentaram seis diferentes regimes, sendo três estáveis, dois instáveis e o limite de *blow-off*. Concluiu-se que o *swirler* SW06II, que possui *bluff-body* com altura superior à superfície, opera a riquezas menores. Entretanto a estabilidade é mais difícil de ser alcançada, pois apresenta uma faixa de riqueza onde o regime estável Tipo I é menor do que o do outro *swirler* estudado, SW06I.

A fluorescência induzida por laser planar do radical OH permitiu observar a estrutura da chama pela concentração de OH. Foi possível identificar as regiões de gases queimados. Nos regimes estáveis foi confirmada a estrutura das chamas. Observou-se a presença de OH na zona de recirculação em todas as imagens instantâneas do regime IV, enquanto para o regime III confirmou-se que não há chama nesta mesma zona. O regime II foi identificado como uma zona de transição entre os regimes I e III, apresentando os dois formatos das chamas nas imagens instantâneas.

O número de *swirl* foi calculado e, assim, foi possível verificar sua influência na estabilidade do queimador. Observou-se que com variações apenas no número de orifícios do *swirler*, ou seja, variando somente a área de entrada do fluido, há pouca mudança no número de *swirl*. Entretanto, quando a altura do *bluff-body* é variada, a mudança no número de *swirl* é significativa. Diminuindo a altura do *bluff-body*, ou seja, diminuindo a área de saída da mistura metano/ar, o número de *swirl* é menor. Assim, para altura $h_i = 3$ mm, $S=1,3$ e para $h_i = 0$ mm, $S=0,4$, provando que há uma grande variação de S quando a área de saída é alterada. Assim, pode-se afirmar que a geometria do *swirler* exerce grande influência no número de *swirl*.

No futuro, será realizada a medição do campo de velocidade com a

técnica de velocimetria por imagem de partícula. As frequências da chama também serão caracterizadas, permitindo relacionar instabilidades acústicas à vazão volumétrica e à riqueza. Por fim, será realizada a combustão da mistura etanol/ar e seus regimes de combustão serão mapeados. Para isto, será necessário pré-vaporizar o etanol para realizar os ensaios.

Referências Bibliográficas

- [1] Balanço energético Nacional: Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <<https://ben.epe.goc.br/>>. Acesso em agosto 2018.
- [2] LAW, C. K. **Combustion Physics**, Cambridge University Press, Cambridge, 2006.
- [3] BOURDREL, T. et al. Cardiovascular effects of air pollution. **Archives of Cardiovascular Diseases**, v. 110, Issue 11, pages 634-642, 2017.
- [4] CANDEL, S. et al. Dynamics of swirling flames. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 46, p. 147-173, 2014.
- [5] Manual Sirah <<http://www.sirah.com/laser/pulsed-lasers/double-dye>>. Acesso em 08 de novembro de 2018.
- [6] HUANG, Y.; YANG, V. Dynamics and stability of lean-premixed swirl-stabilized combustion. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 35, n. 4. p. 293-364, 2009.
- [7] MCALLISTER S. et al. **Fundamentals of Combustion Processes**, USA, Springer, 2011. 327 p.
- [8] BOURGOUIN, J. et al. Sensitivity of swirling flows to small changes in the swirler geometry. **Comptes Rendus Mecanique**, v. 341, p. 211?219, 2013.
- [9] CHTEREV, I. et al. Flame and flow topologies in an annular swirling flow. **Combustion Science and Technology**, v. 186, p. 1041?1074, 2014.
- [10] AMATO, A. et al. Methane oxycombustion for low CO2 cycles: Blowoff measurements and analysis. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, v. 133, p. 1?9, 2011.
- [11] CAVALIERE, D.E. et al. A comparison of the blow-off behaviour of swirl-stabilized premixed, non-premixed and spray flames. **Flow, Turbulence and Combustion**, v. 91, p. 347?372, 2013.
- [12] TONG, Y. et al. Influence of combustor geometry on swirl stabilized premixed methane-air flame. In **Proceedings of ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition**. p. 1?10, 2016.

- [13] PRETZIER, G. A new method for numerical Abel-inversion. **Zeitschrift für Naturforschung**, v. 46, p. 639-641, 1991.
- [14] PRETZIER, G. et al. Comparison of Different Methods of Abel Inversion Using Computer Simulated and Experimental Side-On Data. **Zeitschrift für Naturforschung**, V. 47a, p. 955-970, 1992.
- [15] SHANBHOGUE, S. J et al. Flame macrostructures, combustion instability and extinction strain scaling in swirl-stabilized premixed CH₄/H₂ combustion. **Combustion and Flame**, v. 163, p. 494-507, 2016.
- [16] Síntese de meso-porfirinas mistas: estudos fotofísicos e térmicos - Scientific Figure on ResearchGate. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/Figura-218-Diagrama-de-Jablonski-indicando-os-processos-fotofísicos-fluorescenciafig15277808164>> Acesso em novembro, 2018.
- [17] LEWIS, B.; VON ELBE, G. **Combustion, flames, and explosions of gases**, 3.ed. London: Academic Press, 2012. 764 p.
- [18] GALLEY, D. et al. Mixing and stabilization study of a partially premixed swirling flame using laser induced fluorescence. **Combustion and Flame**, v. 158, n. 1, p. 155-171, 2011.
- [19] DUROX, D. et al. Flame dynamics of a variable swirl number system and instability control. **Combustion and Flame**, v. 160, p.1729 - 1742, 2013.
- [20] NOGENMYR, K. et al. Effects of confinement on premixed turbulent swirling flame using large Eddy simulation. **Combustion Theory and Modeling**, v. 17, n. 6, p. 1003-1019, 2013.
- [21] GUIBERTI, T.F. et al. Analysis of topology transitions of swirl flames interacting with the combustor side wall. **Combustion and Flame**, v. 162, n. 11, p. 4342-4357, 2015.
- [22] MERGULHÃO, C. S., et al. Experimental study of a lean premixed turbulent swirling flame stabilization. **Cobem - 2017-0808**, ABCM, Curitiba, 2017.
- [23] JOURDAINE, P. et al. Effect of Quarl on N₂- and CO₂-Diluted Methane Oxy-Flames Stabilized by an Axial-Plus-Tangential Swirler. **Combustion, Fuels and Emissions**, v. 4A, 2016.
- [24] JOURDAINE, P. et al. A comparison between the stabilization of premixed swirling CO₂-diluted methane oxy-flames and methane/air flames. **Fuel**, v. 201, p.156 - 164, 2017.

- [25] TAAMALLAH, S. et al. On the characteristic flow and flame times for scaling oxy and air flame stabilization modes in premixed swirl combustion. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 36, p. 3799 - 7489, 2017.
- [26] TAAMALLAH, S. et al. Thermo-acoustic instabilities in lean premixed swirl-stabilized combustion and their link to acoustically coupled and decoupled flame macrostructures. **Proceedings of the Combustion Institute**, v.35, p 3273 - 3282, 2015.
- [27] WATANABE, H. et al. The structure of swirlstabilized turbulent premixed CH_4/air and $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{CO}_2$ flames and mechanisms of intense burning of oxy-flames. **Combustion and Flame**, v. 174, p. 111?119, 2016.
- [28] CAETANO, N. Estudo Experimental de Chamas Turbulentas não Pré-Misturadas Empregando Simultaneamente as Técnicas de Diagnóstico Laser PLIF e PIV. **Tese de doutorado**, 2012.
- [29] VILLANUEVA, J. Estudo Experimental da distribuição de fuligem e de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos em chamas laminares não pré-misturadas de etileno e de ar. **Tese de doutorado**, 2017.
- [30] PITON, L. Desenvolvimento de um queimador para o estudo de chamas turbulentas pré-misturadas com swirl. **Trabalho de conclusão de curso**, 2017.