



**Letícia Carneiro Piton**

**Desenvolvimento de um queimador para o  
estudo de chamas turbulentas pré-misturadas  
com *swirl***

**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 2017

## Agradecimentos

À PUC-Rio e ao CNPq, pela oportunidade de realizar esse trabalho e pela colaboração e incentivo à pesquisa.

Ao meu orientador, professor Luís Fernando Figueira da Silva, pela amizade, conhecimento, experiência, aprendizado e, sobretudo, pela paciência.

Aos colegas Carolina Mergulhão, Juan Villanueva, Suzane Pereira, Louise Ramos e Gabriela Senra pelo empenho, ajuda, paciência, sorrisos e apoio. Sem eles este trabalho não seria possível.

Aos Drs. Philippe Scoufflaire e Nasser Darabiha, por terem, gentilmente, nos cedido o material para a construção do queimador.

À minha família, pelo apoio durante esse processo de formação.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma colaboraram na realização desse trabalho.



## Resumo

### **Desenvolvimento de um queimador para o estudo de chamas turbulentas pré-misturadas com *swirl***

A ciência e a tecnologia da combustão têm um grande impacto nos setores industrial, de transporte e de geração de energia elétrica. Tecnologias de combustão turbulenta pré-misturada vêm sendo desenvolvidas como soluções efetivas para reduzir a formação de NO<sub>x</sub> e de fuligem em turbinas a gás e queimadores industriais. Estas tecnologias envolvem por vezes a utilização da combustão estabilizada por swirl. Portanto, o objetivo geral deste trabalho é desenvolver um queimador laboratorial para estudar chamas turbulentas pré-misturadas de hidrocarbonetos e de ar em presença de swirl. Utilizou-se duas geometrias diferentes de swirler, uma câmara de combustão de área de seção transversal quadrada, além de uma câmera ICCD para realizar captura de imagens de quimiluminescência. Caracterizou-se o queimador em termos de potência emitida e número de Reynolds. Como resultado, obteve-se diferentes topologias de chamas confinadas, que foram relacionadas com a composição e a riqueza da mistura. A partir da técnica de Inversão de Abel foi possível obter imagens deconvoluídas. Por fim, traçou-se diagramas de regimes de combustão identificando as fronteiras entre regimes estáveis e instáveis de combustão.

### **Palavras-chave**

Combustão; Turbulência; Swirl; Chamas pré-misturadas; Estudo experimental.

## **Abstract**

### **Development of a burner for the study of turbulent flames premixed with swirl**

Science and Combustion Technology have a major impact on the industrial, transportation and electric power generation sectors. Technologies of pre-mixed turbulent combustion have been developed as effective solutions to reduce NO<sub>x</sub> and soot formation in gas turbines and industrial burners. These technologies involve use of swirl stabilized combustion. Therefore, the general objective of this work is to develop a laboratory burner to study flames turbulent pre-mixed hydrocarbons and air in the presence of swirl. Two different swirler geometries, one combustion chamber of square cross-sectional area and an ICCD camera were used to perform chemiluminescence imaging, among other experiments. The burner was characterized in terms of emitted power and Reynolds number. As a result, different flame topologies were obtained, which were related to the composition and richness of the mixture. From the technique Abel's Inversion, it was possible to get deconvoluted images. Finally, combustion scheme diagrams were plotted by identifying the boundaries between stable and unstable combustion regimes.

## **Keywords**

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

## Sumário

1	Introdução	8
2	Objetivo	11
2.1	Objetivos específicos . . . . .	11
3	Fundamentos Teóricos	12
3.1	Conceitos Fundamentais sobre combustão . . . . .	12
3.2	Quimiluminescência . . . . .	14
3.3	Inversão de Abel . . . . .	15
4	Materiais e Métodos experimentais	18
4.1	Montagem Experimental . . . . .	18
4.2	Câmara de Combustão . . . . .	19
4.3	<i>Swirlers</i> radiais . . . . .	21
5	Resultados e discussão	24
5.1	Estudo preliminar: chamas não confinadas e influência do confinamento	24
5.2	Estudo das chamas confinadas . . . . .	28
6	Conclusões e perspectivas	41
A	Variações dos <i>swirlers</i> projetados	45

## Lista de figuras

3.1	SW08 com chama estável em formato de V - captura de OH* . . . .	16
3.2	SW08 com chama estável em formato de V deconvoluída - captura de OH* . . . . .	17
4.1	Esquema da bancada experimental: 1 - câmara de combustão, 2 - queimador, 3 - medidor de vazão de ar, 4 - medidor de vazão de metano, 5 - Controlador de vazão, 6 - tubulação de mistura, 7- câmara CCD, 8 - Intensificador, 9 - Filtro 310 nm, 10 - câmara Canon. . . . .	18
4.2	Base da câmara de combustão: 1 - peça de resfriamento, 2 - <i>swirler</i> , 3 - canal de resfriamento. . . . .	20
4.3	Câmara de combustão: 1 - <i>swirler</i> , 2 - base, 3 - cantoneiras, 4 - janelas de quartzo. . . . .	21
4.4	<i>Swirler</i> : 1 - orifícios de entrada de ar e combustível, 2 - área de saída do escoamento, 3 - corpo rombudo central ("bluff body"). . .	22
4.5	Modelo 2D do <i>swirler</i> . . . . .	23
5.1	Chamas turbulentas não confinadas. . . . .	24
5.2	Limites de <i>blow-off</i> de chamas metano/ar não confinadas para duas geometrias de <i>swirler</i> . . . . .	26
5.3	Limites de <i>blow-off</i> de chamas metano/ar para dois confinamentos e <i>swirlers</i> diferentes. . . . .	27
5.4	Áreas utilizadas para o cálculo do número de Reynolds. . . . .	29
5.5	Chamas turbulentas confinadas - SW08. . . . .	30
5.6	Chamas turbulentas confinadas - SW05. . . . .	30
5.7	SW08 com chama estável em zona de recirculação deconvoluída - quimiluminescência de OH* . . . . .	32
5.8	SW08 com chama estável em formato de V deconvoluída - quimiluminescência de OH* . . . . .	33
5.9	SW08 com chama estável em formato de tornado deconvoluída - quimiluminescência de OH** . . . . .	34
5.10	SW05 com chama estável em zona de recirculação deconvoluída - quimiluminescência de OH* . . . . .	35
5.11	SW05 com chama estável em formato de V deconvoluída - quimiluminescência de OH* . . . . .	36
5.12	SW05 com chama estável em formato de tornado deconvoluída - quimiluminescência de OH** . . . . .	37
5.13	Regimes de combustão de chamas metano/ar confinadas - SW08. .	38
5.14	Regimes de combustão de chamas metano/ar confinadas - SW05. .	40
A.1	Exemplos de variações de <i>swirlers</i> projetados. . . . .	45

## Lista de tabelas

3.1	Relação entre as variáveis $f$ , $\phi$ e %EA. . . . .	13
5.1	Número de Reynolds dos <i>swirlers</i> . . . . .	29
A.1	Nomenclatura empregada para distinguir as variações geométricas. .	46
A.2	Variação dos <i>swirlers</i> projetados. . . . .	46

# 1

## Introdução

A combustão é uma ciência que permeia quase todos os setores das sociedades, em qualquer parte do mundo, independentemente do grau de desenvolvimento da nação. O processo de combustão é responsável por mais de 85% da energia utilizada pelo homem, sendo estratégico para a economia de todos os países. A geração de energia a partir da combustão de derivados do petróleo, gás natural, carvão mineral, lenha, carvão vegetal e dos derivados da cana de açúcar corresponde a mais de 80% da energia utilizada no Brasil, de acordo com o balanço energético nacional publicado pelo Ministério de Minas e energia [1].

Para que o processo de combustão ocorra são necessários combustível e oxidante. Combustíveis podem ser classificados como substâncias que liberam calor ao reagirem com um oxidante. Suas aplicações práticas requerem que seja abundante e econômico, além de estar conforme as regulamentações do meio ambiente.

A maioria dos combustíveis utilizados atualmente são derivados de fontes não renováveis. São aquelas que se utilizam de recursos naturais esgotáveis, isto é, que terão um fim, seja em um futuro próximo, seja em um período de médio ou longo prazo. Os principais exemplos de fontes de energia não renováveis são os combustíveis nucleares e fósseis (petróleo, carvão mineral, gás natural e xisto betuminoso). O uso desses combustíveis fósseis contribui para os efeitos do aquecimento global devido à emissão de dióxido de carbono na atmosfera. Por isso, biocombustíveis ou combustíveis derivados de outras fontes renováveis representam alternativas atrativas e são objeto de pesquisas intensivas.

Biocombustíveis são qualquer tipo de combustível, sólido, líquido ou gasoso, derivado de biomassa ou até mesmo organismos vivos. Existem diversos tipos de biocombustíveis: óleo vegetal, biodiesel, biocombustíveis sólidos (madeira, carvão) e gás de síntese. Todos requerem que o processo de combustão ocorra para que possa haver produção de energia. Isso ressalta a importância do estudo contínuo da ciência da combustão.

A ciência e tecnologia da combustão têm também grande impacto nos setores industrial, de transporte e de geração de energia elétrica. Petróleo, carvão mineral e gás natural são as principais fontes de energia do mundo. Ao contrário do petróleo e do carvão mineral, o gás natural é menos poluente, embora a sua combustão ainda apresente alguns níveis de poluição que causam danos à atmosfera. Ele é utilizado como fonte de energia em indústrias,

residências (gás de cozinha) e também em alguns tipos de veículos.

As indústrias de mineração, química, siderúrgica, de cimento e de vidro destacam-se como grandes utilizadoras da combustão de hidrocarbonetos e do gás natural em seus processos de fabricação. A imensa maioria dos veículos automotores, dos navios e dos aviões utiliza a queima de derivados do petróleo ou do gás natural em seu funcionamento. Além disso, o preparo e cozimento de alimentos pela queima de combustíveis é importante no setor doméstico.

Apesar dos múltiplos benefícios que a combustão traz para o ser humano, ela possui um lado negativo, ou seja, a poluição ambiental, a qual precisa ser cuidadosamente tratada. Os principais poluentes produzidos nos processos de combustão incluem hidrocarbonetos não/parcialmente queimados, óxidos de nitrogênio (NOx), monóxido de carbono, óxidos de enxofre e material particulado (fuligem). Estes poluentes são usualmente apontados como os principais responsáveis de uma série de problemas específicos vinculados à saúde humana: formação de chuva ácida, efeito estufa e aquecimento global, entre outros. Nas duas últimas décadas, o nível de conscientização do público, em relação às questões meio ambientais, têm aumentado consideravelmente. Estas preocupações com os efeitos da poluição, na saúde pública e na qualidade do meio ambiente, têm levado aos governos a regulamentar o nível de emissões permitidas; e, aos geradores de poluição, a adotar práticas de gestão ambiental.

A utilização social e ambientalmente responsável dos processos de combustão se coloca com os desafios concomitantes de aumento da eficiência energética e da redução do impacto ambiental. Tecnologias de combustão turbulenta pré-misturada vêm sendo desenvolvidas como soluções efetivas para reduzir a formação de NOx e de fuligem em turbinas a gás e queimadores industriais. Estas tecnologias, que envolvem por vezes a utilização da combustão estabilizada por *swirl*, possuem os desafios fundamentais da previsão dos limites de sopramento e de retorno da chama, bem como o das instabilidades acústicas.

Este desafio foi objeto do artigo de revisão de Huang and Yang [2], que apresentaram os estudos abordando o acoplamento entre a dinâmica do escoamento e a excitação das instabilidades de combustão, com foco nos mecanismos que as controlam e nas técnicas de supressão de instabilidades. Uma extensa discussão dos trabalhos de modelagem numérica e experimental também foi feita. Mais recentemente, Candel et al. [3] revisaram o estado da arte da combustão em escoamentos com *swirl*, com ênfase na influência que exerce o número de *swirl* na estrutura do escoamento e no início das instabilidades. Os resultados de uma análise dinâmica não linear da chama e do combustor também foram discutidos. Estes trabalhos permitem concluir que a configuração geométrica do *swirler* e da câmara de combustão são os

principais fatores que influenciam o comportamento de chamas turbulentas com *swirler*.

Portanto, o presente trabalho é dedicado a estudar chamas turbulentas de metano e ar estabilizadas pela presença de *swirl*. Em parceria com a École Centrale de Paris um queimador aberto e dois *swirlers* foram enviados à PUC-Rio. O queimador, denominado *BEST Flame (Bioethanol Swirl Turbulent)*, foi projetado para receber ar e metano pré-misturados, como prelúdio para o estudo com etanol. Realizou-se a caracterização experimental da geometria do *swirl* e analisou-se a influência da câmara de combustão sobre as características de *blow-off* e topologias de chamas. O estudo foi motivado pela dificuldade de se lidar com o gás natural (metano), uma vez que a sua composição não é uniforme e pode variar. Introduzir um *swirler* permite estabilizar a turbulência, ou seja, sua presença é necessária para uniformizar a mistura e para estabilizar misturas pobres ou de baixo poder calorífico.

Este trabalho apresenta resultados de estudos realizados em um queimador laboratorial das regiões de chamas confinadas pré-misturada em presença de *swirl*. Ele está dividido em cinco capítulos. O primeiro exhibe seus objetivos gerais e específicos. Em seguida, são apontados alguns fundamentos teóricos fundamentais à compreensão da combustão. Posteriormente são apresentados os materiais e métodos experimentais empregados, que estão subdivididos em duas seções: (a) câmara de combustão, onde há a explicação de sua concepção e (b) *swirlers* radiais, que mostra como os *swirlers* foram desenvolvidos. Em seguida, são mostrados os resultados obtidos, novamente dividido em subseções: (a) resultados preliminares e (b) estudo das regiões de chamas confinadas. Por fim, foram apresentadas as conclusões e perspectivas para futuros trabalhos.



## 2

### Objetivo

O principal objetivo deste projeto é desenvolver um queimador laboratorial para estudar chamas turbulentas pré-misturadas de hidrocarbonetos e de ar em presença de *swirl*.

#### 2.1

##### Objetivos específicos

- Compreender os fundamentos dos processos de combustão
- Desenvolver e construir *swirlers* com diferentes características geométricas e fluidodinâmicas
- Desenvolver e construir duas câmaras de combustão que permitem visualizar o processo de combustão
- Caracterizar a combustão, mediante o uso de quimiluminescência, para diferentes vazões e composições da mistura de combustível
- Construir um mapa de funcionamento, identificando os limites de *blow-off* (soprimento) da combustão

## 3

### Fundamentos Teóricos

Esta seção apresenta os fundamentos teóricos que permitiram a realização deste trabalho. Primeiro serão explicados alguns conceitos fundamentais sobre combustão, em seguida, serão explorados os conceitos de quimiluminescência da chama. Por fim, será discutida a Inversão de Abel.

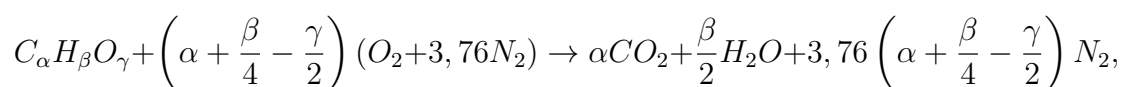
#### 3.1

##### Conceitos Fundamentais sobre combustão

Combustível e oxigênio são os componentes primários na combustão. Para a maioria dos processos de combustão, ar é utilizado com oxidante, pois além de ser gratuito, está disponível em quase todos os locais do planeta [4]. A escolha do combustível, por outro lado, depende do propósito do processo de combustão e está sujeito às regulações locais de emissão.

O propósito do processo de combustão está ligado às suas diversas aplicações. Caldeiras, queimadores, geração de energia elétrica em termelétricas, cozimento de alimentos, explosivos, transporte terrestre, marítimo e aéreo, fabricação de vidros e cerâmicas, fundição de metais são exemplos de onde ocorre combustão.

Para um dado dispositivo que realiza combustão, é preciso determinar quanto combustível e ar deve ser empregado para que ambos sejam completamente queimados. Balanceando-se a equação de reação da combustão para um combustível particular é possível obter esse dado. Por definição, uma mistura estequiométrica contém a quantidade exata de produtos, que após o processo de combustão, são completamente consumidos. Esta mistura ideal fornece a temperatura máxima da chama, pois toda a energia liberada da combustão é utilizada para aquecer os produtos. Para um hidrocarboneto genérico,



é a fórmula que deve ser aplicada para determinar a proporção estequiométrica. Na prática, os combustíveis são consumidos em presença de uma quantidade de ar diferente da estequiométrica. Se há menos ar que a quantidade estequiométrica, a mistura é chamada de rica. Se há excesso de ar, a mistura é

denominada pobre. Por esse motivo, é comum quantificar as misturas de acordo com os seguintes métodos:

1. Razão combustível-ar - é a razão da massa de combustível pela massa de ar da mistura dada pela seguinte equação:

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

2. Riqueza (ou razão de equivalência) - é razão de ar e combustível normalizada:

$$\phi = \frac{f}{f_s}, \quad (3-2)$$

onde  $f_s$  indica o valor da razão combustível-ar na condição estequiométrica. A partir da riqueza é possível classificar a chama de três formas diferentes

- Se  $\phi < 1$ , a mistura é considerada pobre;
- Se  $\phi = 1$ , a mistura é estequiométrica;
- Se  $\phi > 1$  a mistura é rica.

É importante observar que  $\phi$  pode variar de zero a infinito, de acordo com os limites de ar e combustível presentes no processo.

3. Percentual de excesso de ar  $\%EA$  - é a quantidade de excesso de ar de uma mistura estequiométrica. É definido como:

$$\%EA = 100 \frac{m_a - m_{as}}{m_{as}} = 100 \left( \frac{m_a}{m_{as}} - 1 \right). \quad (3-3)$$

Dadas qualquer uma das três propriedades mencionadas acima ( $f$ ,  $\phi$ ,  $\%EA$ ) é possível descobrir as outras através das equações apresentadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Relação entre as variáveis  $f$ ,  $\phi$  e  $\%EA$ .

$f$	$\phi$	$\%EA$
$f = f_s \cdot \phi$	$\phi = \frac{f}{f_s}$	$\%EA = 100 \frac{1-\phi}{\phi}$
$f = \frac{100 \cdot f_s}{\%EA + 100}$	$\phi = \frac{100}{\%EA + 100}$	$\%EA = 100 \frac{1-f/f_s}{f/f_s}$

Outro conceito importante a ser apresentado é o de chamadas pré-misturadas. Esse é o tipo de combustão que ocorre quando o combustível e o oxidante se misturam de forma homogênea antes da queima. Chamadas pré-misturadas estão presentes em diversos dispositivos de que realizam combustão,

inclusive no queimador *BEST Flame* que é estudado no presente trabalho. A combustão é iniciada por ignição ou por uma chama piloto, criando uma chama que se propaga através da mistura não queimada.

Essa propagação depende de dois processos consecutivos. Primeiro, o calor produzido na zona de reação é transferido na direção do escoamento, aquecendo, dessa forma, a mistura que está entrando no queimador até sua temperatura de ignição. Em seguida, os reagentes já pré-aquecidos reagem quimicamente entre si. Essa sucessão de processos permite concluir que a velocidade da chama depende das propriedades de transporte e das propriedades químicas dos reagentes de combustão, tanto em escoamentos laminares quanto em escoamentos turbulentos.

Todavia, observações experimentais revelaram que chamas pré-misturadas em escoamentos turbulentos se propagam mais rapidamente que suas homólogas em escoamentos laminares. Esse aumento de velocidade que pode ser significativo é justificado pela intensificação da troca de quantidade de movimento no fluido.

### 3.2

#### Quimiluminescência

A espectroscopia de emissão é utilizada como diagnóstico da combustão [5]. Ela está diretamente ligada à informação espectral originada a partir das espécies intermediárias que são formadas durante o processo de queima. A partir dos dados obtidos, modelos matemáticos podem ser empregados, tornando possível obter-se informações tanto com respeito aos mecanismos de formação das espécies como também à própria dinâmica da chama.

As bandas observadas no espectro UV-visível em chamas pré-misturadas de hidrocarbonetos estão relacionadas à presença de radicais excitados originados das reações químicas em andamento na chama. Dentre eles estão presentes os radicais  $C_2^*$ ,  $CH^*$  e  $OH^*$ . No presente trabalho, será observada apenas a emissão do  $OH^*$ .

A partir da estrutura dos espectros de emissão de chamas é possível determinar parâmetros importantes como a temperatura e a concentração das espécies emissoras de radiação. Por isso é importante realizar o mapeamento dos radicais.

A emissão natural das espécies presentes na chama é fruto das reações químicas que as produzem no estado excitado. Uma vantagem importante da emissão espontânea reside no fato de que as espécies emitem radiação na vizinhança das regiões onde são formadas, em decorrência do reduzido tempo de vida de emissão. Isso possibilita relacionar as informações obtidas a partir

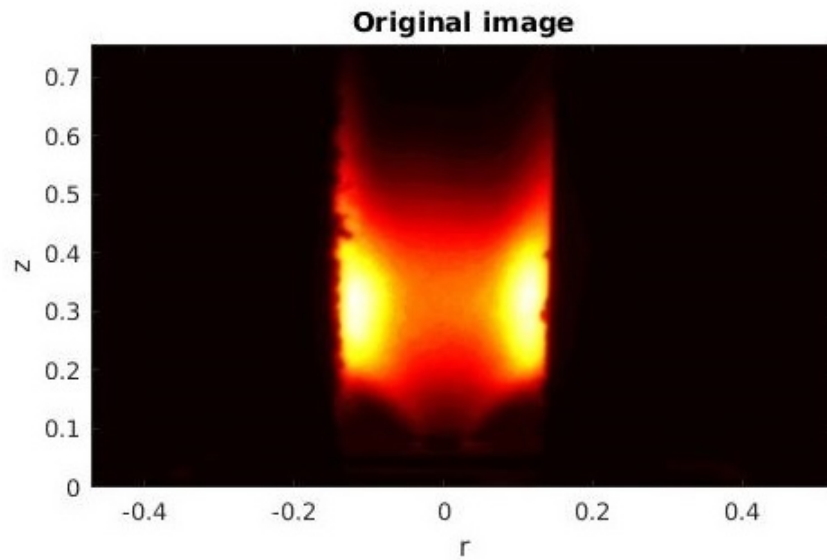
dos espectros com as zonas de formação e reação da chama.

### 3.3

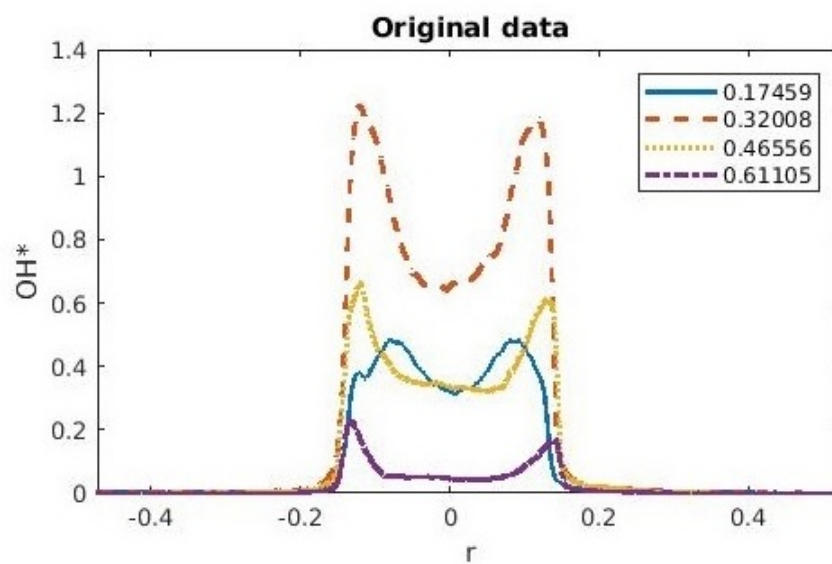
#### Inversão de Abel

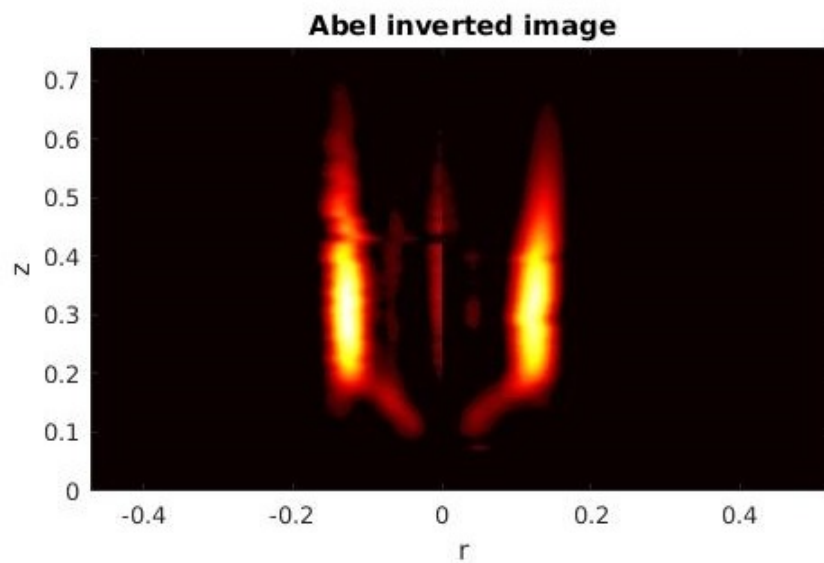
Para evidenciar a região de liberação de calor de chamas pré-misturadas, as imagens presentes nesse trabalho foram deconvoluídas usando uma técnica de inversão de Abel obtidas com uma câmera ICCD na banda espectral de 310 nm. A técnica escolhida emprega uma formulação baseada na transformada de Fourier (Pretzier, 1991) [6] e (Pretzier et al., 1992) [7]. Essa inversão transforma as imagens obtidas ao longo da linha de visão em uma representação em seção transversal, assumindo simetria axial. Essa hipótese de simetria axial não se aplica no caso da câmara de combustão de seção transversal quadrada, mas permite colocar em evidência a forma da chama [8]. Para uma determinada imagem, determina-se primeiro o seu centroide. Em seguida a deconvolução das porções esquerda e direita é realizada separadamente. Note-se que o número de modos de Fourier influencia tanto o tempo de cálculo quanto a exatidão com a qual a chama é representada. Neste trabalho são utilizados 16 modos, compromisso entre esses dois requisitos contraditórios.

Imagens deconvoluídas são úteis para mostrar a localização e o formato da chama. As figuras 3.1(a) e 3.2(a) apresentam imagens originais e deconvoluídas com seus respectivos gráficos de intensidade de OH\* em diversas alturas da chama (figs. 3.1(b) e 3.2(b)).



3.1(a): Imagem original obtida através da câmera I

3.1(b): Intensidade de  $\text{OH}^*$  em diferentes alturas da chama.Figura 3.1: SW08 com chama estável em formato de V - captura de  $\text{OH}^*$ .



3.2(a): Imagem deconvoluída.

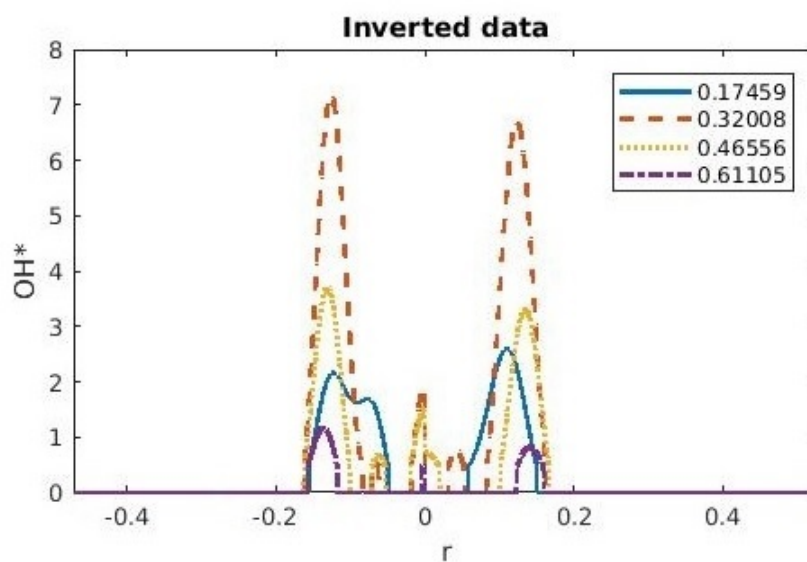
3.2(b): Intensidade de  $OH^*$  em diferentes alturas da chama deconvoluída.

Figura 3.2: SW08 com chama estável em formato de V deconvoluída - captura de  $OH^*$ .

## 4

### Materiais e Métodos experimentais

Esta seção apresenta os materiais utilizados e os métodos experimentais empregados nos experimentos. Em parceria com a École Centrale Paris um queimador aberto e dois *swirlers* foram enviados à PUC-Rio com o objetivo de estudar chamas turbulentas em presença de *swirl*.

O queimador, denominado *BEST Flame (Bioethanol Swirl Turbulent)*, foi projetado para receber ar e metano pré-misturados. Após ensaios preliminares com e sem câmaras de combustão cilíndricas, concluiu-se que a chama quando confinada apresentava um maior domínio de estabilidade, em termos de riqueza da mistura de combustível, e que havia uma grande influência do *swirl* sobre este. Por isso foi decidido intervir tanto sobre o *swirler* quanto sobre a câmara de combustão.

#### 4.1

##### Montagem Experimental

A figura 4.1 mostra o aparato experimental, que contém dois medidores de vazão (metano e ar), um controlador de vazão, o queimador, o *swirler*, uma câmera CCD com seu intensificador e a câmara de combustão.

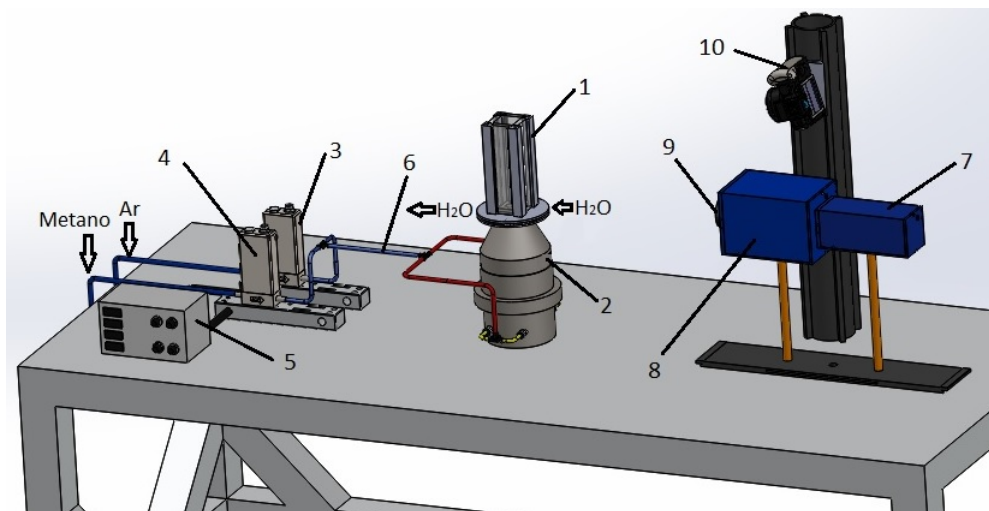


Figura 4.1: Esquema da bancada experimental: 1 - câmara de combustão, 2 - queimador, 3 - medidor de vazão de ar, 4 - medidor de vazão de metano, 5 - Controlador de vazão, 6 - tubulação de mistura, 7- câmera CCD, 8 - Intensificador, 9 - Filtro 310 nm, 10 - câmera Canon.

O medidor de vazão utilizado para o metano é da marca Bronkhorst



(series F-201AC), com um fundo de escala de  $0,5 \text{ Nm}^3/h$ . Seu controle é realizado através de um aparelho eletrônico que ajusta o percentual da vazão do escoamento. A vazão volumétrica do ar é medida por um par de rotâmetros da marca Omel, modelos 4T70903X12 e 4T708TX12 e precisão de 2% do fundo de escala. Eles permitem uma vazão máxima de  $1039 \text{ cm}^3/s$ . Além disso, a temperatura do ar é medida através de um termopar tipo T. Nesse trabalho, a vazão de  $CH_4$  varia de  $18,6 \text{ cm}^3/s$  a  $107,2 \text{ cm}^3/s$  e a vazão volumétrica total da mistura varia de  $411,1 \text{ cm}^3/s$  a  $1146,1 \text{ cm}^3/s$ , levando, desse modo, a uma variação ampla de riqueza da mistura de combustível entre 0,44 e 1,14.

As imagens de quimiluminescência integradas no tempo do processo de combustão foram obtidas usando uma câmera Canon EOS Rebel TS. Esta câmera está equipada com uma lente de 58 mm de diâmetro, mas sem filtros. Todas as imagens exibidas nesse trabalho usam a abertura f-36 e o tempo de exposição de 0,5 s. Imagens representativas foram obtidas para diversas riquezas.

Utilizou-se uma câmara CCD (Charge Coupled Device) da marca LaVision, modelo Imager Intense para gravar imagens de chama com um tempo de exposição de 4 ms e abertura f-8. Além disso, foi usado um intensificador IRO (Intensified relay-optics) também da marca LaVision, equipado com um filtro de 310 nm e com ganho de 100% e tempo de abertura de 100 ms. Essas imagens estão associadas aos radicais de  $OH^*$  de quimiluminescência, ou seja, estão relacionadas à zona de liberação de calor de chamas pré-misturadas.

## 4.2

### Câmara de Combustão

Ensaio exploratórios indicaram que a chama se estabiliza melhor quando está confinada. Na presença de um confinamento a riqueza do soprimento diminui, ou seja, o *blow-off* ocorre com a chama mais pobre. Portanto o próximo passo foi projetar uma câmara de combustão.

Com o objetivo de compreender a influência do confinamento, foram projetadas duas câmaras de combustão com área de seção transversal quadradas. Os ensaios exploratórios foram realizados com câmaras de combustão cilíndricas de 30 e 40 mm de diâmetro. As câmaras de combustão projetadas com área de seção transversal quadrada têm lados de mesma dimensão que os diâmetros destes cilindros.

Ensaio preliminares foram realizados com as câmaras de combustão quadradas, com o objetivo de escolher qual delas seria de fato a definitiva. Por possuir maior acesso óptico, que permitirá futuros estudos do seu comportamento através da utilização de lasers, a câmara de 40 mm foi apontada como

definitiva. Além disso, ela mantém um nível de estabilização próximo ao da câmara de 30 mm de lado.

O projeto da câmara de combustão começou pela base, que é cilíndrica e tem espessura de 11 mm, tal como mostrado na figura 4.2.

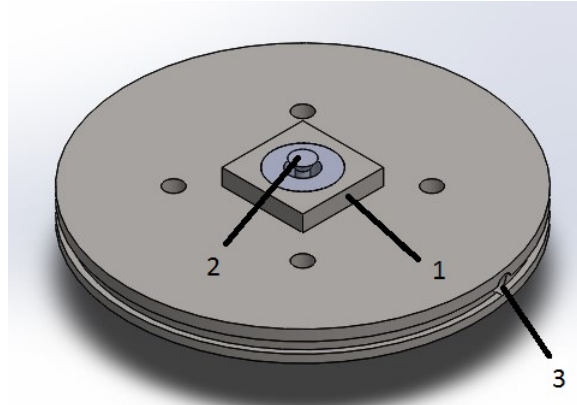


Figura 4.2: Base da câmara de combustão: 1 - peça de resfriamento, 2 - *swirler*, 3 - canal de resfriamento.

A base possui um rasgo lateral de 4 mm de altura e profundidade para que possa ser encaixada ao queimador. Por estar em contato com gases a altas temperaturas de combustão, a base deve ser resfriada, por isso possui canais de 3 mm de diâmetro por onde passa água. A parte superior do *swirler* coincide com a parte superior da base, que possui 6 mm de altura e é oca para que a água escoe com mais facilidade. A aresta desta peça de resfriamento da câmara de combustão possui 40 mm. A câmara de combustão pode ser vista como um todo na figura 4.3.

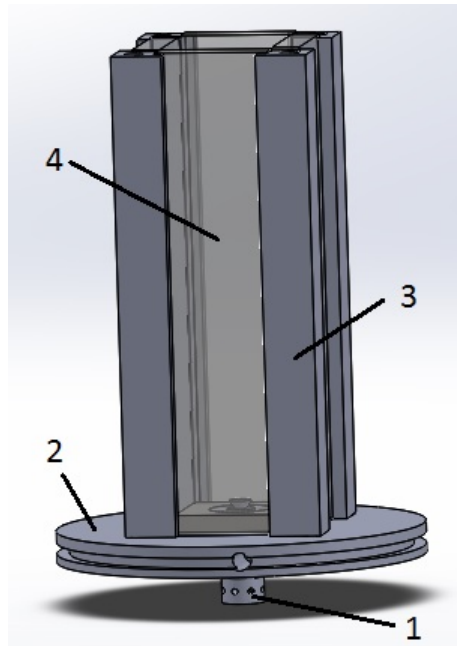


Figura 4.3: Câmara de combustão: 1 - *swirler*, 2 - base, 3 - cantoneiras, 4 - janelas de quartzo.

Em seguida, foram projetadas as cantoneiras que sustentam as janelas de quartzo. Elas possuem 170 mm de altura e 18 mm de largura e comprimento. Elas foram construídas de modo que a parte de aço inox não entre em contato com a chama ou com os produtos da combustão. Dessa forma, reduz-se o risco da cantoneira deformar com o calor. Quatro cantoneiras sustentam quatro placas de quartzo que foram cortadas de modo a encaixarem na cantoneira, por isso têm 170 mm de altura, 10 mm de espessura, e 40 mm de largura. O quartzo resiste a altas temperaturas sem trincar além de ser transparente, fornecendo, dessa forma, amplo acesso óptico para a região da combustão. O último item do confinamento é a chaminé. Ela também é de aço inox e possui uma pequena angulação que modifica as propriedades de acoplamento acústico entre a câmara de combustão e o ar da sala.

A exceção do quartzo, todas as partes foram usinadas em aço inox. Logo, utilizou-se um isolante para garantir que as peças não iriam fundir entre si, devido as altas temperaturas. Além disso, o isolante reduz a probabilidade do quartzo trincar.

### 4.3

#### **Swirlers radiais**

*Swirlers* radiais são pequenas peças que têm a função de colocar o escoamento em rotação e, assim, estabilizar uma chama turbulenta. O *swirler* se encaixa na base da câmara de combustão para que a chama fique completa-

mente confinada. Ar e metano entram pelos orifícios laterais e a chama fica ancorada no corpo rombudo central, o qual pode ser observado na figura 4.4.

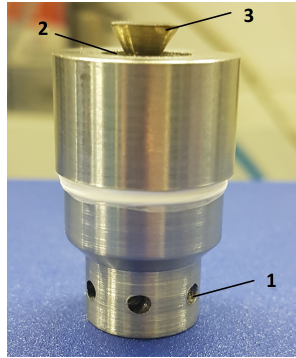
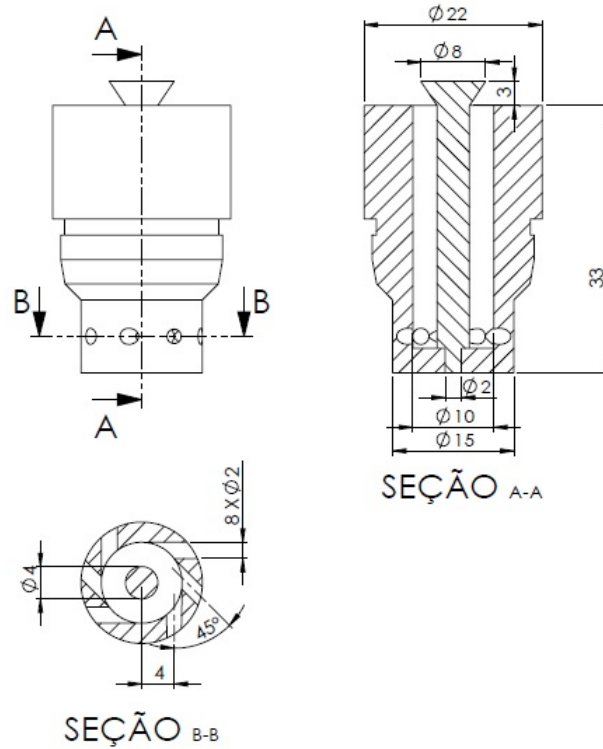


Figura 4.4: *Swirler*: 1 - orifícios de entrada de ar e combustível, 2 - área de saída do escoamento, 3 - corpo rombudo central ("bluff body").

Dois modelos de *swirlers* vieram junto com o *BEST Flame* da École Centrale Paris e a partir do seu estudo foi possível determinar como novos *swirlers* poderiam ser projetados. A figura 4.4 representa uma adaptação do modelo original. A partir dessa análise concluiu-se que a posição e os diâmetros dos furos de entrada de fluido interferem na variação da velocidade axial e tangencial e, conseqüentemente, sobre a turbulência da chama. A partir dos primeiros resultados obtidos, diversos modelos de *swirlers* foram projetados neste trabalho utilizando o programa SolidWorks. Os novos *swirlers* e sua respectiva nomenclatura podem ser vistos no anexo A.

Apesar de diversos modelos serem projetados, apenas dois foram de fato construídos e ensaiados.

A figura 4.5 exibe o modelo 2D do *swirler* apresentado na figura 4.4 apenas com as suas principais medidas. O escoamento do combustível pré-misturado é induzido por oito orifícios de 2 mm de diâmetro, cujos eixos estão situados a 4 mm do eixo principal do *swirler*. Esses furos alimentam a câmara do *swirler* que possui 10 mm de diâmetro e 33 mm de altura. A parte central do *swirler* é ocupada por um cilindro de 4 mm de diâmetro, que possui um cone invertido no seu topo. A chama é ancorada na base desse cone invertido. Todos os *swirlers* são feitos de aço inox.

Figura 4.5: Modelo 2D do *swirler*.

As áreas de entrada e saída influenciam diretamente no número de *swirl* que é um parâmetro adimensional comumente utilizado para caracterizar escoamentos espiralados [9]. Este parâmetro relaciona o fluxo de quantidade de movimento angular do escoamento com o fluxo de quantidade de movimento linear. O número de *swirl* é expressado de acordo com a equação 4-1:

$$S = \frac{\int_0^R u_z u_\theta r^2 dr}{R \int_0^R u_z^2 r dr}, \quad (4-1)$$

onde  $u_z$  é a velocidade axial,  $u_\theta$  é a velocidade azimutal e  $R$  é o raio do *swirler*. Ensaio preliminares com o confinamento de área de seção transversal circular demonstraram a influência do número de *swirl* sobre a estabilização da queima.

## 5

### Resultados e discussão

Esse capítulo apresenta os resultados obtidos após os ensaios. Ele foi dividido em duas seções: estudo preliminar e estudo das chamas confinadas. A primeira exibe a topologia, o *blow-off* da chama não confinada e a influência da câmara de combustão. A seção seguinte apresenta a topologia da chama confinada, o processo de deconvolução e, por fim, os diagramas dos regimes de combustão.

#### 5.1

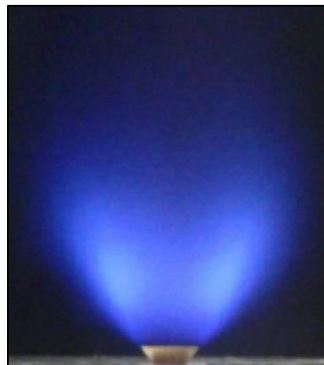
##### Estudo preliminar: chamas não confinadas e influência do confinamento

Os resultados preliminares foram obtidos a partir do ensaio de duas geometrias diferentes de swirler, oriundos da École Centrale de Paris: SW00 e SW01. Seu projeto pode ser comparado ao da figura 4.5. Ambos possuem 8 orifícios, contudo, seu corpo rombudo central possui diferentes alturas, alterando, dessa forma, a área de saída do escoamento.

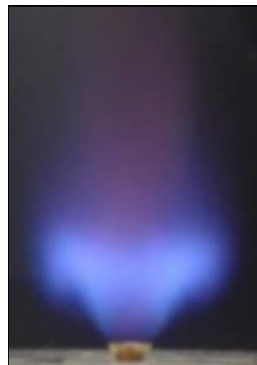
##### 5.1.1

##### Topologia da chama não confinada

Duas imagens típicas de chama turbulenta não confinada são apresentadas na figura 5.1. Esta figura permite verificar que a chama estabiliza com formato de V ou de M próximo à saída do *swirler*. Este formato depende das vazões de ar e combustível que são empregadas.



5.1(a): Chama em formato de V



5.1(b): Chama em formato de M

Figura 5.1: Chamas turbulentas não confinadas.

De fato, as chamas características do caso não confinado são alteradas quando confinada e exibem uma forte interação com as paredes da câmara de combustão. Além disso, a diluição da mistura combustível pelo ar ambiente também pode desempenhar um papel na estabilização, no caso não confinado.

### 5.1.2

#### ***Blow-off* de chamas não confinadas**

O *blow-off* ocorre quando a chama se descola da superfície do queimador, podendo resultar no seu apagamento. Isto pode acontecer, por exemplo, numa chama de bico de Bunsen quando se aumenta a vazão dos reagentes [10]. Ocorre assim um aumento da distância entre a chama e o queimador, o gás da combustão vai se tornando cada vez mais diluído devido ao contato com a atmosfera. Desse modo, a velocidade da reação tende a diminuir e eventualmente ocorre o *blow-off*.

Neste estudo experimental, o *blow-off* pôde ser obtido de duas formas diferentes. A primeira consiste em fixar a vazão de metano e reduzir a vazão de ar gradativamente até que ele ocorra. A segunda maneira é oposta, mas semelhante: fixa-se a vazão de ar e reduz-se a de metano até o limite do *blow-off*. Ambas as formas foram realizadas, de modo a verificar a reprodutibilidade dos resultados.

Esses resultados podem ser comparados aos de bico de Bunsen de Lewis e von Elbe [10]. Classicamente, os limites de *blow-off* são dados em função da vazão volumétrica total de ar e combustível e do percentual de combustível. Neste trabalho, todos os gráficos foram apresentados em função da riqueza e da vazão volumétrica total, para melhor compreensão. A figura 5.2 mostra o limite de *blow-off* medido para as duas geometrias de *swirler* mencionadas na seção 4.3. Estas geometrias diferem apenas pelo tamanho da área de entrada do escoamento.

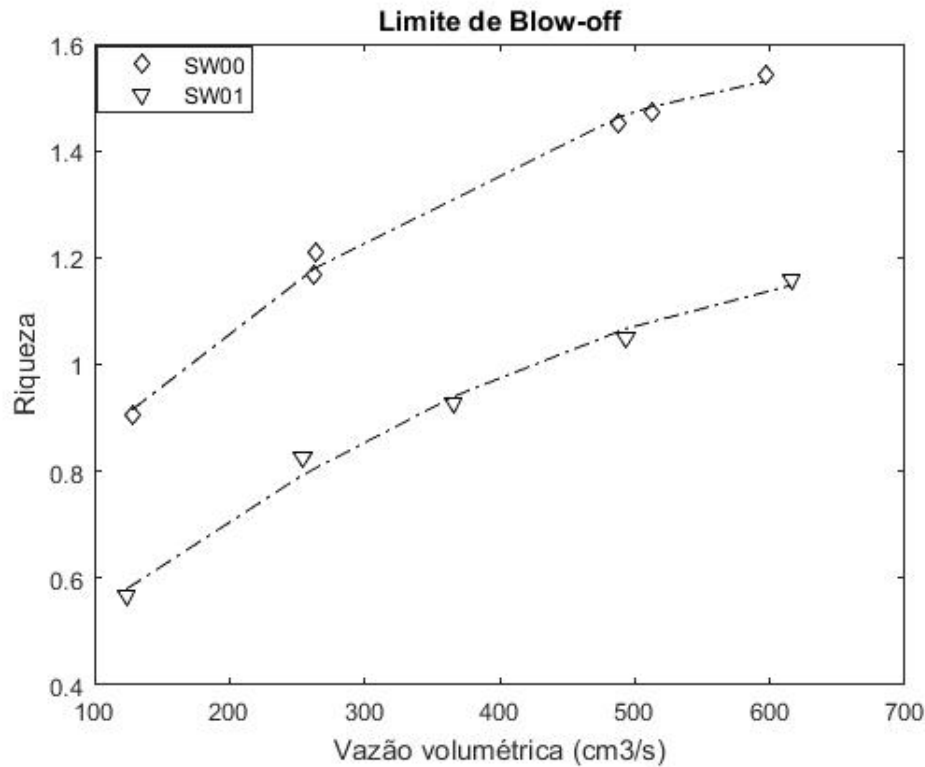


Figura 5.2: Limites de *blow-off* de chamas metano/ar não confinadas para duas geometrias de *swirler*.

Os símbolos mostrados no gráfico da figura 5.2 representam os limites de *blow-off* para determinada vazão de ar e combustível. Utilizou-se o método dos mínimos quadrados para uma função polinomial de segundo grau com o objetivo de determinar o formato da curva que um grande conjunto de dados forneceria. Tanto as curvas de SW00 quanto as de SW01 possuem concavidade para baixo, além de possuírem riquezas de *blow-off* mais altas para vazões maiores.

É possível concluir que, em nosso experimento, o *blow-off* ocorre quase sempre para misturas ricas de ar e combustível. Essa é uma característica indesejável para potenciais aplicações práticas na indústria. Riquezas maiores que 1 indicam que está sendo gasto mais combustível do que ar, o que não é de interesse das indústrias, tanto por questões ambientais quanto financeiras.

### 5.1.3

#### Influência da câmara de combustão

Após a análise da influência da altura do corpo rombudo central, estudou-se a influência do confinamento sobre o limite de *blow-off*. Para este fim, utilizou-se duas câmaras de combustão de área de seção transversal quadrada,



com 3 e 4 cm de lado, respectivamente. A figura 5.3 mostra os resultados obtidos numa representação idêntica à da figura 5.2.

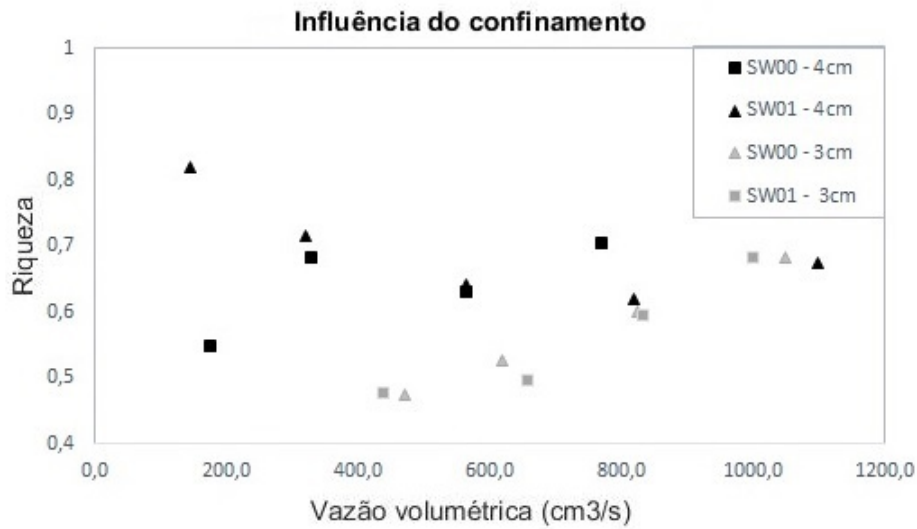


Figura 5.3: Limites de *blow-off* de chamas metano/ar para dois confinamentos e *swirlers* diferentes.

A figura 5.3 compara os limites de *blow-off* obtidos para dois *swirlers* e duas câmaras de combustão. Comparando-o com a figura 5.2 é possível concluir que o *blow-off* de chamas confinadas ocorre para misturas pobres, o que retrata um contraste com as chamas não confinadas. É importante destacar também que a riqueza do *blow-off* é menor quando a área da seção transversal do confinamento é reduzida de  $4 \times 4 \text{ cm}^2$  para  $3 \times 3 \text{ cm}^2$ . A menor riqueza é de 0,47 para a menor razão de área. Os resultados mostrados na figura 5.3 podem ser separados em três regimes:

1. Para regimes a baixas vazões ( $Q < 400 \text{ cm}^3/\text{s}$ ), aumentar a vazão da mistura leva a uma redução da riqueza do *blow-off*. Esse comportamento pode ser justificado pela interação da chama com as paredes da câmara de combustão.
2. Para regimes com vazões moderadas ( $400 < Q < 800 \text{ cm}^3/\text{s}$ ), os limites de *blow-off* aumentam com a vazão. Esse comportamento é similar ao do observado em chamas não confinadas. Além disso, é possível observar que os detalhes do *swirler*, altura do corpo rombudo central não exercem uma influência significativa no limite do *blow-off*.
3. Para regimes a altas vazões ( $Q > 800 \text{ cm}^3/\text{s}$ ) é possível observar que há uma dispersão dos resultados para o confinamento de 4 cm, que ocorreu

por falhas na usinagem da base do confinamento. Após reparos, a falta de repetibilidade dos resultados cessou.

É importante observar que a influência do confinamento se dá pela interação da chama com as paredes da câmara de combustão. Esse fenômeno foi estudado por Galley et al. [11], Nogenmyr et al. [12], Giuberti et al. [13], Khalil et al. [14] e Jourdain et al. [15]. Na verdade, esses estudos indicam que uma forte interação da chama com as paredes leva a um pré-aquecimento da mistura fresca e à recirculação de produtos quentes da combustão.

## 5.2

### Estudo das chamas confinadas

Com o intuito de analisar as diferentes regiões das chamas confinadas, novos estudos foram realizados. Uma vez estudada a influência do corpo rombudo central do *swirler*, decidiu-se analisar a influência dos furos do *swirler*. O SW08, que foi mostrado na figura 4.4, foi estudado e comparado ao SW05. A principal diferença entre eles é a área de entrada do escoamento. O SW05 possui apenas 5 furos, cada um com 2,5 mm de diâmetro, portanto 24,54 mm<sup>2</sup>. O SW08, por outro lado, possui 8 furos com 2,0 mm de diâmetro, logo sua área de entrada é de 25,13 mm<sup>2</sup>. Desse modo, sua área de entrada é maior que a de SW05. Ambos os *swirlers* possuem o mesmo tipo de corpo rombudo central.

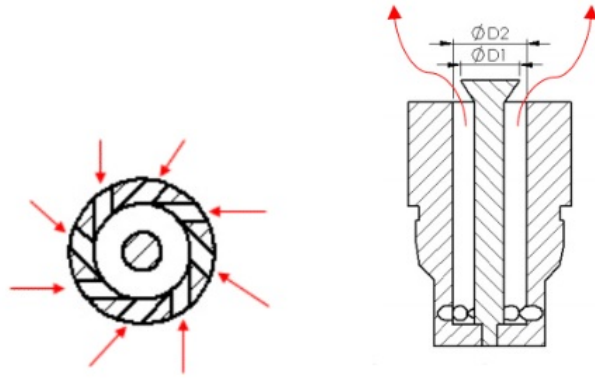
A potência do queimador é calculada como:

$$P = \dot{m} \cdot PCI, \quad (5-1)$$

e varia entre 0,5 e 3,6 kW. O número de Reynolds foi calculado em duas regiões diferentes do *swirler*, na área de entrada do escoamento (orifícios - fig. 5.4(a)) e na sua área de saída (*bluff body* - fig. 5.4(b)). O diâmetro característico utilizado para o cálculo de  $Re$  na área de entrada foi o diâmetro dos furos multiplicados pelo número de furos. Já o diâmetro característico da área de saída foi o diâmetro hidráulico do tronco de cone do corpo rombudo central. As equações 5-2 e 5-3 foram utilizadas para o cálculo em cada área e seus valores máximo e mínimo estão mostrados na tabela 5.1.

$$Re_{entrada} = \frac{4\dot{V}}{\nu n \pi D} \quad (5-2)$$

$$Re_{saida} = \frac{4\dot{V}}{\nu (D_2 - D_1)} \quad (5-3)$$



5.4(a): Área de entrada

5.4(b): Área de saída

Figura 5.4: Áreas utilizadas para o cálculo do número de Reynolds.

Tabela 5.1: Número de Reynolds dos *swirlers*

$Re$	SW08	SW05
Entrada <sub>max</sub>	$5,7 \cdot 10^3$	$7,4 \cdot 10^3$
Entrada <sub>min</sub>	$2,1 \cdot 10^3$	$2,6 \cdot 10^3$
Saída <sub>max</sub>	$1,4 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^5$
Saída <sub>min</sub>	$5,1 \cdot 10^4$	$5,1 \cdot 10^4$

A partir da análise da tabela é possível observar que o número de Reynolds na entrada do SW05 são maiores que os de SW08. Isso ocorre porque a velocidade do escoamento no SW05 é mais alta. Ela é calculada através da vazão volumétrica total, logo, para alcançar as mesmas vazões aplicadas em SW08, é preciso fornecer mais combustível/ar, o que leva a maiores velocidades de escoamento, fornecendo números de Reynolds mais elevados. A área de saída, por outro lado fornece valores iguais para ambos os *swirlers*. Isso ocorre porque suas áreas de saída são idênticas.

### 5.2.1

#### Topologia da chama confinada

Três fotografias de chamas confinadas em diferentes regimes são mostradas na figura 5.5. Todas foram tiradas com o SW08 e uma vazão de ar fixa em  $1039 \text{ cm}^3/\text{s}$ , enquanto o metano variou de 83 a  $111 \text{ cm}^3/\text{s}$ . Essas imagens permitem verificar que a chama estabiliza de três formas diferentes: zona de recirculação, V e tornado. Esses formatos serão discutidos na seção 5.2.2. Os mesmos três regimes podem ser observados para o SW05, na figura 5.6 o que permite concluir que os regimes estáveis da chamas são semelhantes, com pequenas alterações perceptíveis.

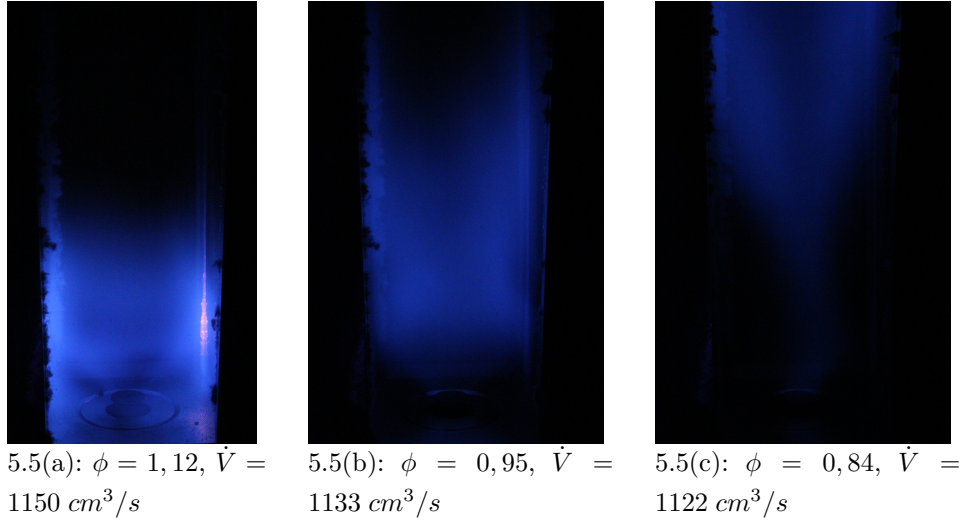


Figura 5.5: Chamas turbulentas confinadas - SW08.

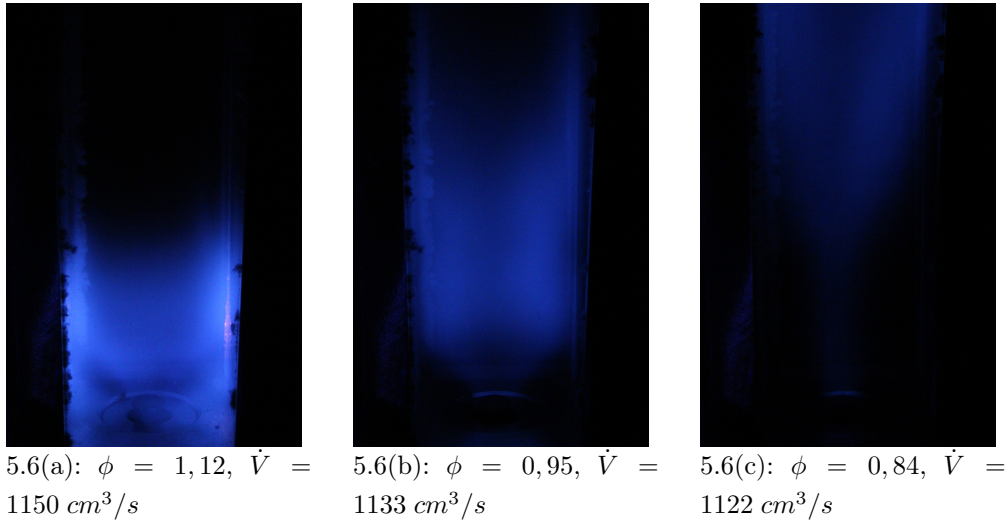


Figura 5.6: Chamas turbulentas confinadas - SW05.

As chamas da esquerda, zona de recirculação, ocorrem para maior riqueza e apresentam maior interação com as paredes da câmara de combustão. A da fotografia central possui um formato de V e ocorre para vazões próximas à estequiometria e também apresenta interações com a parede. Por fim, as chamas da direita têm o formato de um tornado, com menos interação com a parede. Essas imagens são as mais próximas ao limite de *blow-off*. É importante destacar que existe uma zona de instabilidade entre as figuras, o que será discutido na seção 5.2.3.

A topologia da chama é influenciada não apenas pela sua interação com as paredes da câmara de combustão, mas também pela composição da mistura e pelo número de *swirl*. Alterações no formato da chama estão relacionada com a riqueza da mistura e com instabilidades acústicas [8], isso sugere que:

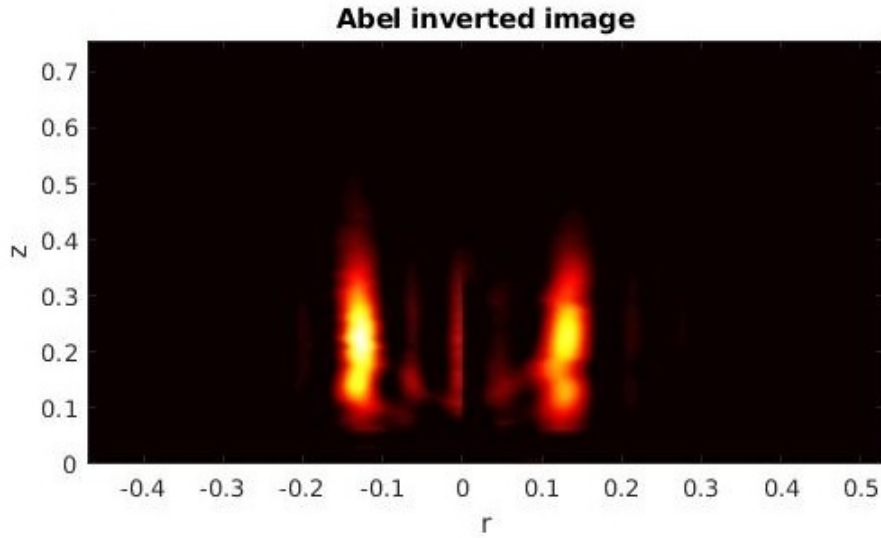
- O formato e a macroestrutura da chama estão correlacionados com a riqueza da mistura (quando  $Re$  é constante) e mudanças significativas são observadas quando se cruza alguns valores críticos da concentração de combustível;
- A velocidade do escoamento varia à medida em que a riqueza muda, ou seja, existe um escoamento exclusivo associado a cada formato de chama;
- À medida que a riqueza da mistura aumenta, a região de queima torna-se mais curta e tende a ficar mais próxima do *swirler*.

É importante destacar chamas pré-misturadas têm um grande impacto na dinâmica do escoamento. Isso ocorre devido a sua expansão volumétrica ao longo do percurso até que a combustão de fato ocorra.

### 5.2.2

#### Deconvolução

Esta seção apresenta os resultados obtidos através do processo de inversão de Abel, mencionado na seção 3.3. As figuras 5.7(a), 5.8(a) e 5.9(a) exibem imagens ivertidas da chama, enquanto as figuras 5.7(b), 5.8(b) e 5.9(b) mostram gráficos com a intensidade de  $OH^*$  em diversas alturas da chama. Cada imagem foi obtida em diferentes regiões de funcionamento estável da câmara de combustão (I, III e V) e para ambos os *swirlers*, SW05 e SW08. Nestas figuras as escalas  $r$  e  $z$  têm dimensões arbitrárias, mas idênticas em todas.



5.7(a): Imagem deconvoluída.

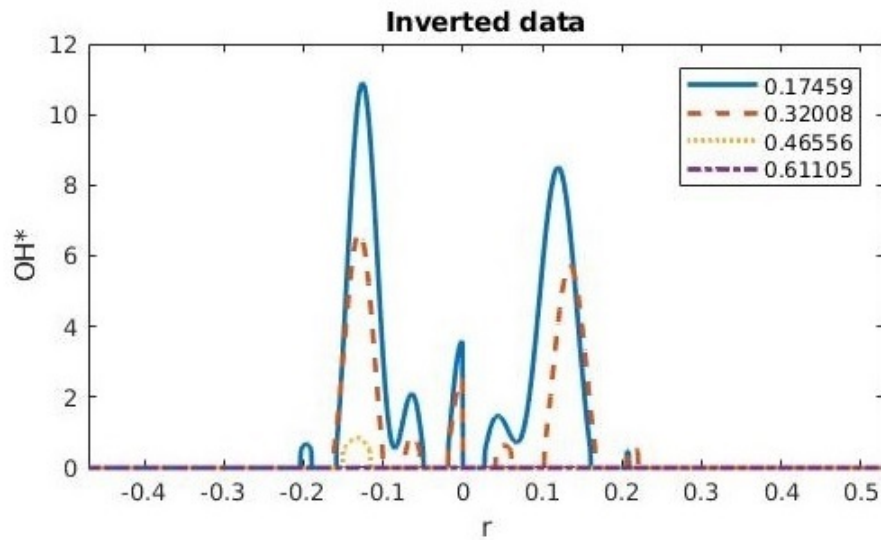
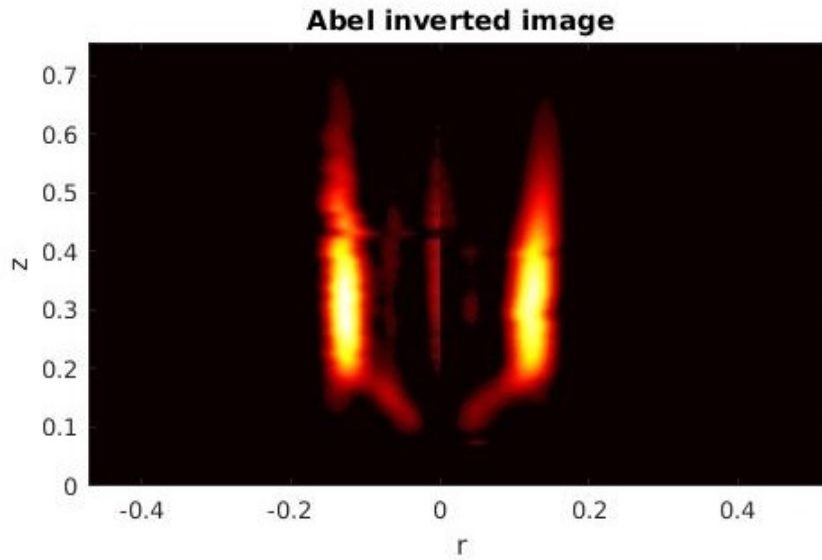
5.7(b): Intensidade de  $OH^*$  em diferentes alturas da chama deconvoluída.

Figura 5.7: SW08 com chama estável em zona de recirculação deconvoluída - quimiluminescência de  $OH^*$ .

Presume-se existir uma zona de recirculação, tal como observada por Shanbhogue et al. [8] e Giuberti et al. [13], devido à estrutura do escoamento. Na figura 5.7(a) é possível observar a chama na zona de recirculação de SW08 deconvoluída. As regiões de maior intensidade luminosa estão localizadas nas paredes da câmara de combustão, ou seja, a chama está ancorada nas paredes do confinamento. Observa-se um máximo local da intensidade do sinal de  $OH^*$  no centro da chama o que ocorre por causa do número de termos utilizados na expansão de Fourier (fig. 5.7(b)).



5.8(a): Imagem deconvoluída.

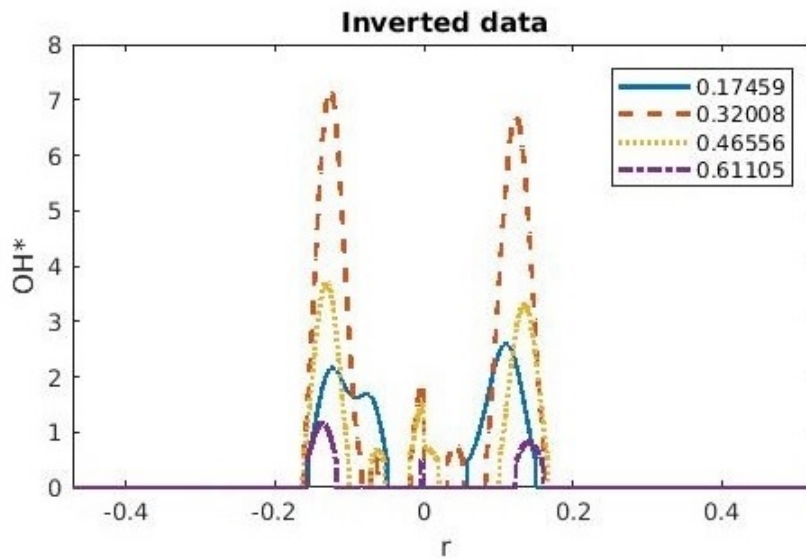
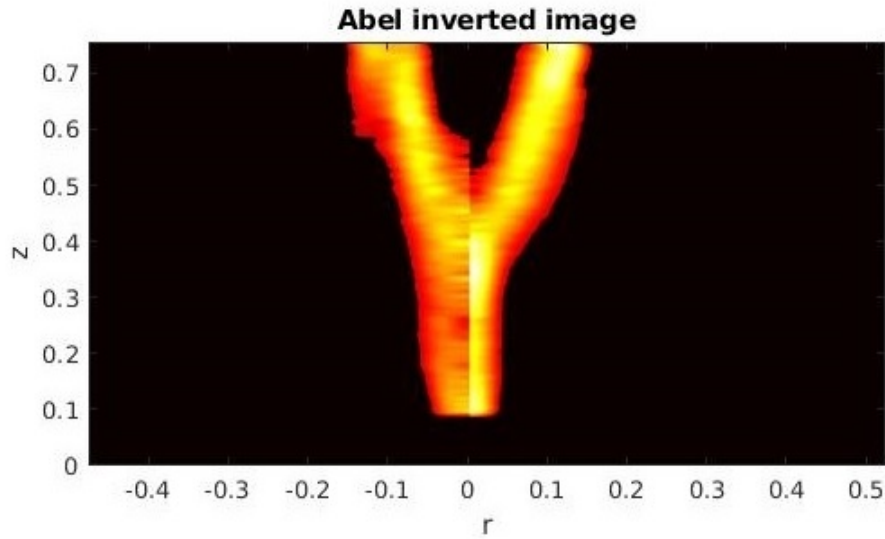
5.8(b): Intensidade de  $OH^*$  em diferentes alturas da chama deconvoluída.

Figura 5.8: SW08 com chama estável em formato de V deconvoluída - quimi-luminescência de  $OH^*$ .

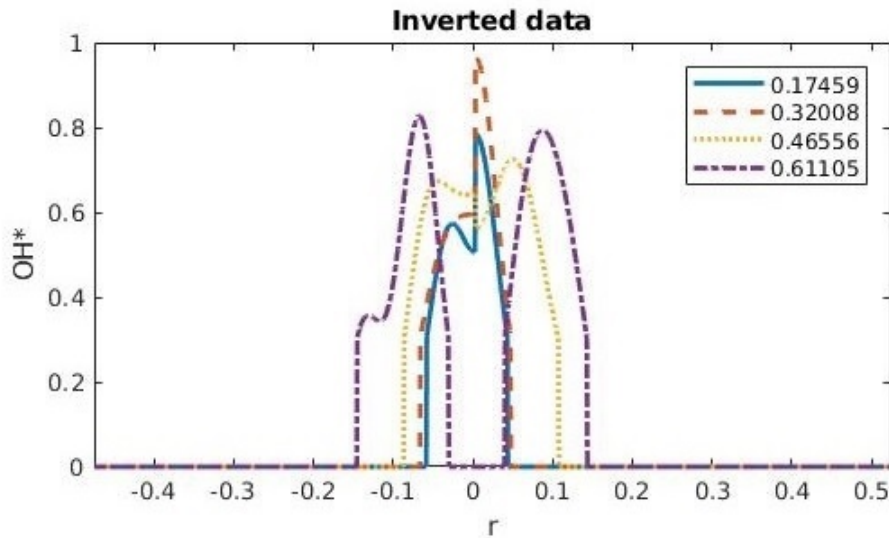
A figura 5.8(a) mostra a deconvolução da chama em formato de V. Novamente, a região de maior intensidade luminosa está localizada nas paredes da câmara de combustão, porém em uma região mais limitada na direção  $z$  da chama. Novamente, a chama está ancorada nas paredes do confinamento, assim como no caso da zona de recirculação. Isso pode ser comprovado através do gráfico de  $OH^*$  em função de  $r$ : os maiores sinais de  $OH^*$  ocorrem para alturas intermediárias de corte da chama (fig. 5.8(b)). Também pode ser observado o



ancoramento da chama no *bluff body*.



5.9(a): Imagem deconvoluída.



5.9(b): Intensidade de  $OH^*$  em diferentes alturas da chama deconvoluída.

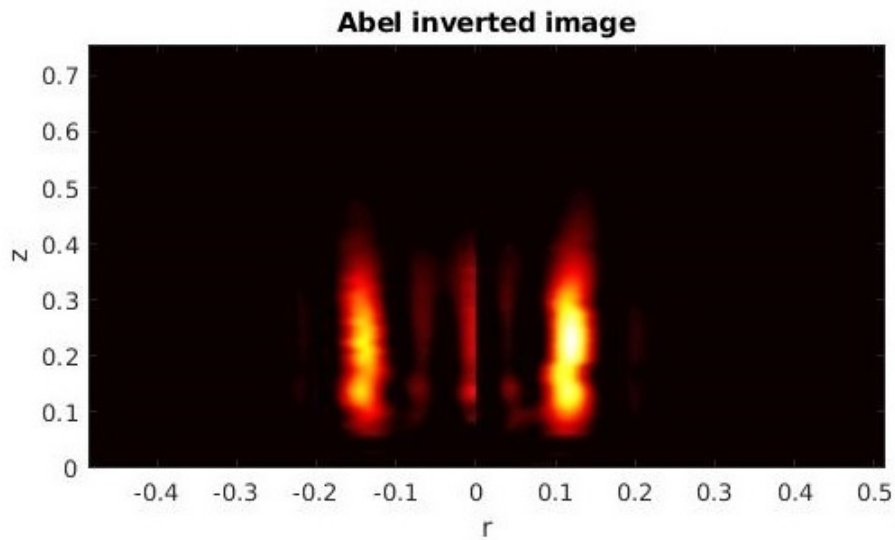
Figura 5.9: SW08 com chama estável em formato de tornado deconvoluída - quimiluminescência de  $OH^{**}$ .

A figura 5.9(a) fornece a imagem deconvoluída da chama em formato de tornado de SW08. Nesse caso, a chama já está desacoplada do *swirler* e é possível observar que a região de maior intensidade luminosa da chama está no seu centro. Como era esperado, a região de maior concentração de  $OH^*$  ocorre para cortes mais altos na chama. É possível observar também uma bifurcação na chama, o que comprova que não há altas concentrações de  $OH^*$  no seu centro, apenas nas laterais.

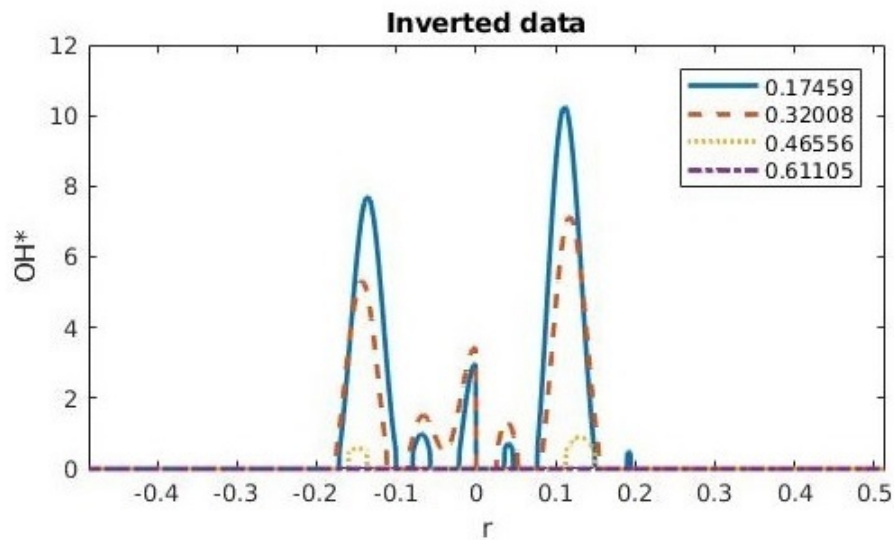


As imagens acima nos permitem concluir que a intensidade de  $\text{OH}^*$  está relacionada tanto com  $r$  quanto com a vazão volumétrica de ar/combustível da mistura. A maior intensidade de  $\text{OH}^*$  da chama ocorre para diferentes alturas nos três casos analisados.

Resultados similares podem ser observados para SW05, nas figuras 5.10, 5.11, e 5.12.

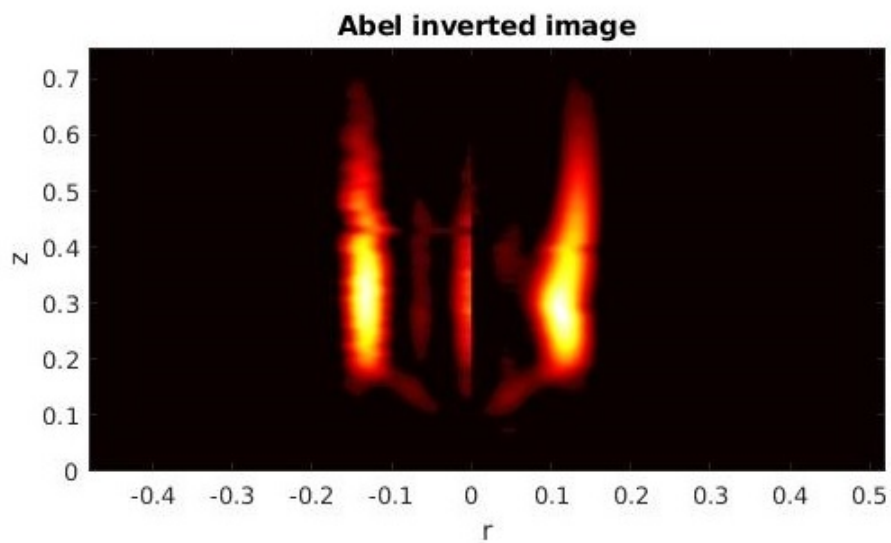


5.10(a): Imagem deconvoluída.



5.10(b): Intensidade de  $\text{OH}^*$  em diferentes alturas da chama deconvoluída.

Figura 5.10: SW05 com chama estável em zona de recirculação deconvoluída - quimiluminescência de  $\text{OH}^*$ .



5.11(a): Imagem deconvoluída.

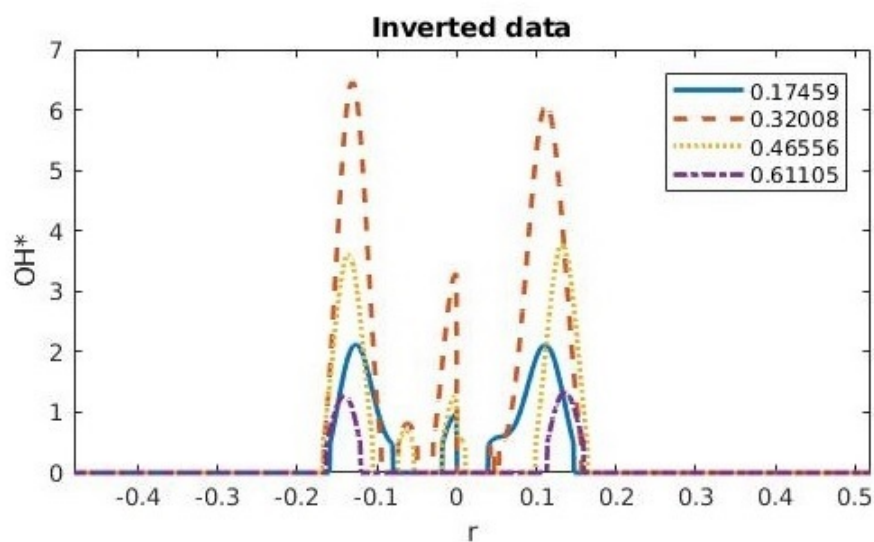
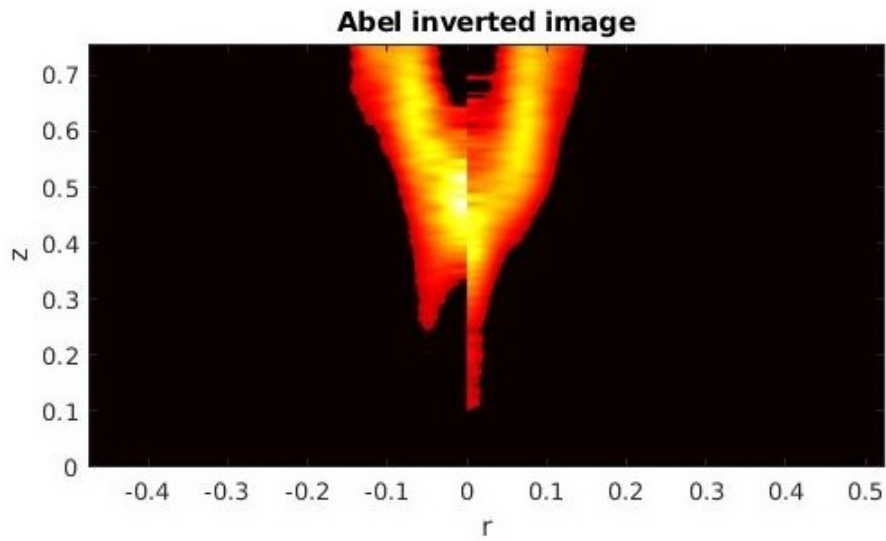
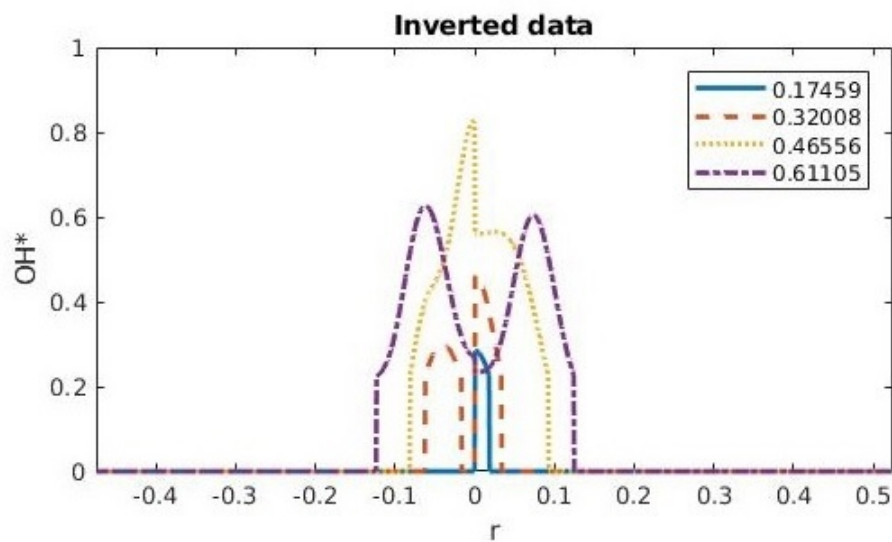
5.11(b): Intensidade de  $OH^*$  em diferentes alturas da chama deconvoluída.

Figura 5.11: SW05 com chama estável em formato de V deconvoluída - quimiluminescência de  $OH^*$ .



5.12(a): Imagem deconvoluída.



5.12(b): Intensidade de OH\* em diferentes alturas da chama deconvoluída.

Figura 5.12: SW05 com chama estável em formato de tornado deconvoluída - quimiluminescência de OH\*\*.

### 5.2.3

#### Diagrama dos regimes de combustão

Para caracterizar as fronteiras entre os regimes de combustão, para cada *swirler* estudado, os diagramas foram determinados como função da vazão volumétrica e da riqueza da mistura metano/ar. É importante destacar que os limites entre os regimes foram definidos visualmente, como explicado a seguir. Os ensaios foram realizados fixando a vazão de ar e diminuindo a vazão de

metano para percorrer cada regime de combustão. As vazões de ar estudadas foram 393, 483, 556, 619, 708, 793, 865 e 1039  $\text{cm}^3/\text{s}$ . Para delimitar cada curva, identificando assim os limites, o método de mínimos quadrados foi empregado novamente.

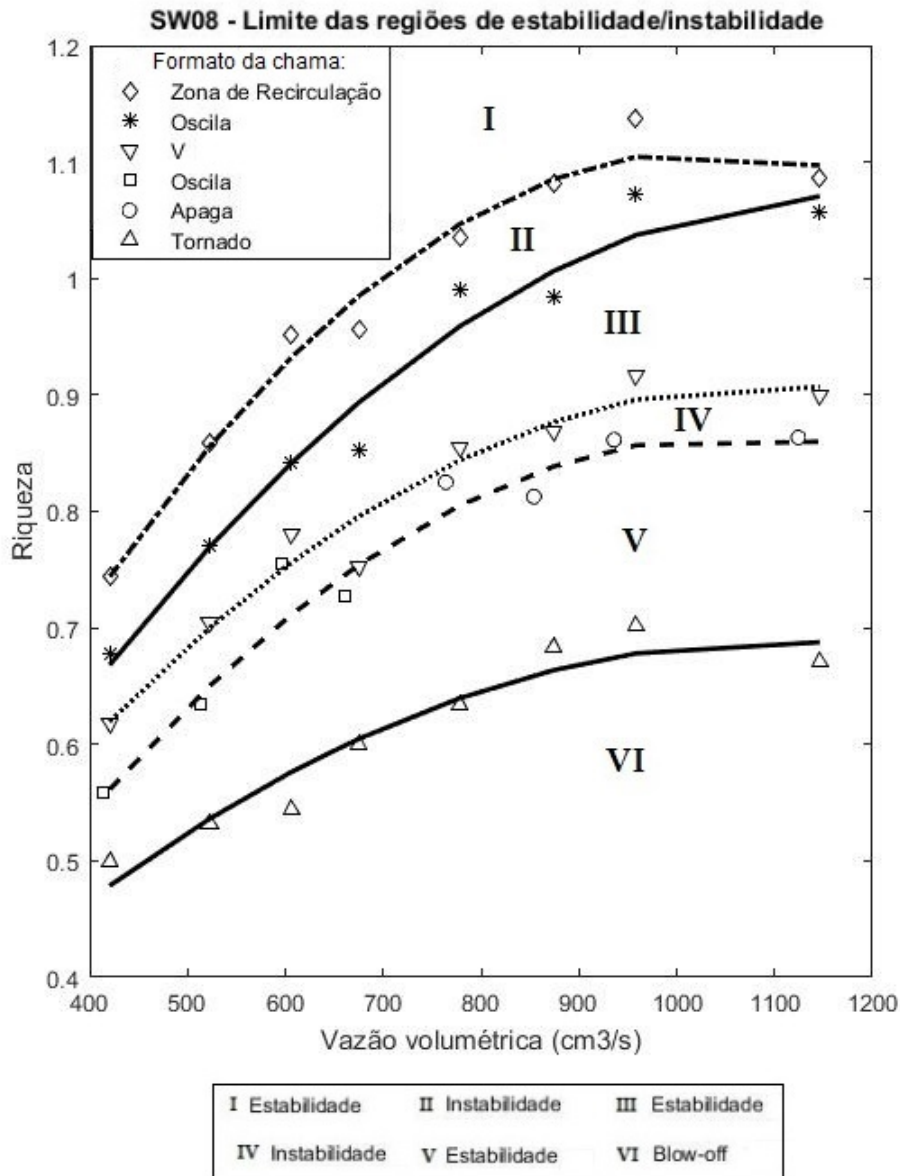


Figura 5.13: Regimes de combustão de chamas metano/ar confinadas - SW08.

Foram identificadas 6 regimes distintos, dos quais 3 foram apresentadas na seção anterior. Cada símbolo no gráfico representa o limite, em termos de riqueza da mistura, de uma determinada região para uma dada vazão de mistura. A figura 5.13 mostra os resultados do SW08, que serão discutidos partindo-se de uma riqueza elevada e diminuindo progressivamente seu valor.

Na região I, as chamas são estabilizadas na zona de recirculação, como indicado na figura 5.5(a). Ao atingir o limite, a chama passa por uma zona de instabilidade, II, na qual começa a oscilar e apresenta instabilidades acústicas. Esta instabilidade ocorre pois a presença da chama na zona de recirculação é intermitente, tal como discutido por Shanbhogue et al. [8]. Na região III obtém-se chamas tal como a representada na figura 5.5(b). Estas apresentam um formato característico de V e se mantêm assim até atingir outra instabilidade. Essa região apresenta uma característica particular: para vazões volumétricas baixas, ocorre a extinção (vazões representadas pelos quadrados), já para vazões mais altas (representada por círculos) observa-se instabilidade. Este segundo tipo de instabilidade parece estar relacionado a uma pulsação de grande escala da câmara de combustão. Na região V, a estrutura da chama é aquela observada na figura 5.5(c). Ao se diminuir a riqueza o limite de *blow-off* é atingido.

A figura 5.14 exhibe os resultados de SW05. Eles são semelhantes ao da figura 5.13, a exceção da segunda região de instabilidade (IV), na qual não ocorre a extinção da chama para nenhuma vazão.

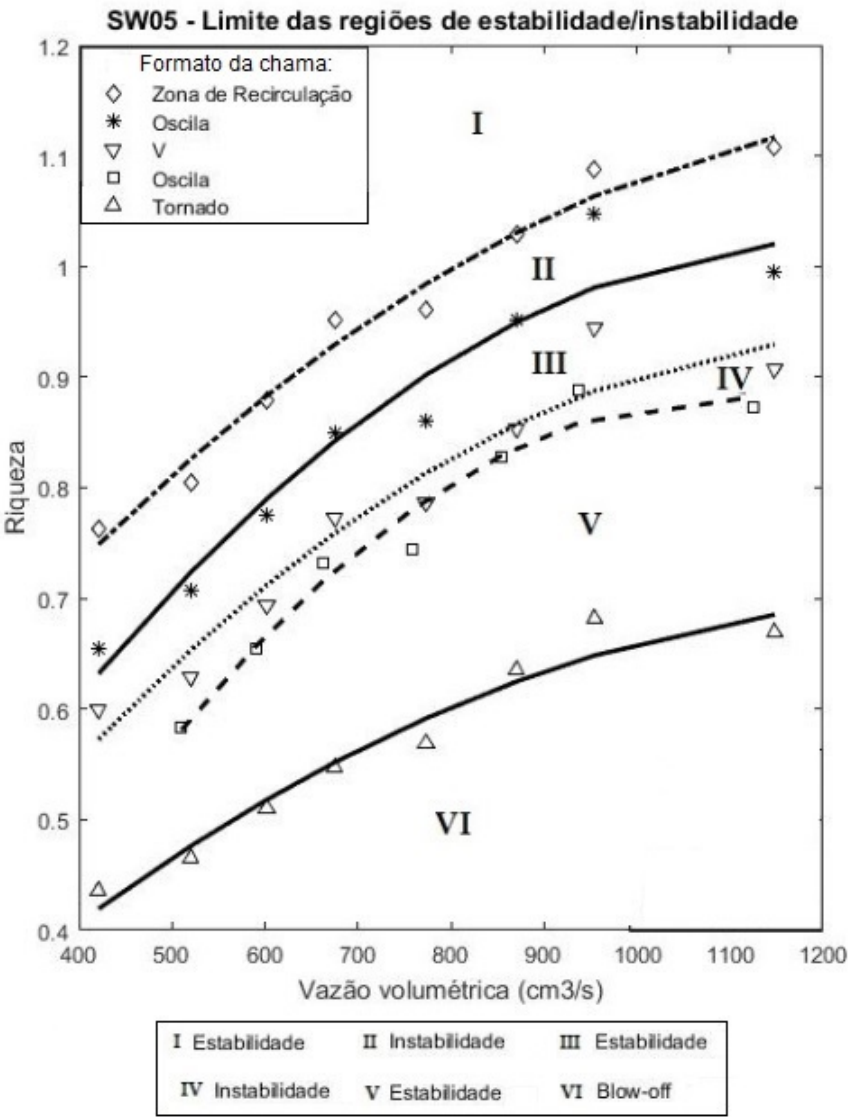


Figura 5.14: Regimes de combustão de chamas metano/ar confinadas - SW05.

A ciência e a tecnologia da combustão têm um grande impacto nos setores industrial, de transporte e de geração de energia elétrica. A utilização social e ambientalmente responsável dos processos de combustão se coloca com os desafios concomitantes de aumento da eficiência energética e da redução do impacto ambiental. Por isso, novas tecnologias estão sendo desenvolvidas para aprimorar o processo de combustão. O queimador laboratorial *BEST Flame* foi desenvolvido com esse intuito. Este queimador opera nas faixas de potência e de número de Reynolds de 0,5 a 3,6 kW e  $2,1 \cdot 10^3$  a  $5,1 \cdot 10^4$ , respectivamente. Estudou-se chamas turbulentas pré-misturadas de metano e ar em presença de *swirl*. Além disso, foi possível mapear o comportamento deste queimador, em termos de regiões de estabilidade e instabilidade, como função da composição da mistura combustível e da riqueza.

Inicialmente, a partir dos *swirlers* recebidos da École Centrale de Paris, foi possível analisar o formato de estabilização das chamas não confinadas, o qual depende principalmente das vazões de ar e combustível. Além disso, constatou-se que o *blow-off* ocorre quase sempre para misturas ricas de ar e combustível. Essa é uma característica indesejável para potenciais aplicações práticas na indústria. Ainda nos estudos preliminares, analisou-se a influência do confinamento sobre o limite de *blow-off* de dois diferentes *swirlers*. Concluiu-se que ele ocorre para misturas pobres, o que retrata um contraste com as chamas não confinadas. Esses resultados permitiram o desenvolvimento de um *paper* [16].

Também analisou-se a influência da altura do corpo rombudo central no processo de *blow-off*. Em seguida, o estudo da área de entrada do escoamento sobre o limite de sopramento da chama, foi realizado com dois novos *swirlers*. Os resultados obtidos foram coerentes com os da literatura.

A análise da deconvolução do sinal de quimiluminescência do radical  $\text{OH}^*$  permitiu determinar a forma da chama. Identificou-se também o local de ancoragem da chama dentro da câmara de combustão. Enfim, foi realizado um estudo sistemático dos regimes de combustão obtidos como função da vazão da mistura de combustível e de sua riqueza. Este estudo permitiu construir mapas de funcionamentos de chamas confinadas com dois *swirlers* diferentes.

Este trabalho abriu portas para estudos mais avançados das chamas turbulentas pré-misturadas com *swirl*. Será realizada a conclusão da bancada experimental definitiva, uma vez que a atual ainda é provisória. A caracterização

das frequências próprias de cada chama também será estudada. Isso permitirá relacionar instabilidades acústicas à vazão volumétrica e à riqueza das chamas. Além disso, pretende-se analisar o campo de velocidade utilizando a técnica de velocimetria por imagem de partículas, PIV. Por fim, será efetuada a combustão do etanol pré-vaporizado, que é o objetivo principal do projeto *BEST Flame*.



## Referências Bibliográficas

- [1] Balanço energético Nacional: Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <<https://ben.epe.goc.br/>>. Acesso em 31 jul. 2017.
- [2] 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.
- [3] CANDEL, S. et al. Dynamics of swirling flames. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 46, p. 147-173, 2014.
- [4] MCALLISTER S. et al. **Fundamentals of Combustion Processes**, USA, Springer, 2011. 327 p.
- [5] LACAVA, P. T.; MARTINS, C. A. **Métodos experimentais de Análise Aplicados à Combustão**, Papel Brasil Editora, 2010. 310 p.
- [6] PRETZIER, G. A new method for numerical Abel-inversion. **Zeitschrift für Naturforschung**, v. 46, p. 639-641, 1991.
- [7] 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.
- [8] SHANBHOUE, S. J et al. Flame macrostructures, combustion instability and extinction strain scaling in swirl-stabilized premixed CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> combustion. **Combustion and Flame**, v. 163, p. 494-507, 2016.
- [9] KUHLMANN, J. A. **Estudo do Escoamento e Transferência de Calor em um Jato Espiralado Incidente**. Rio de Janeiro, 2005. 134 p. Dissertação de Mestrado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- [10] LEWIS, B.; VON ELBE, G. **Combustion, flames, and explosions of gases**, 3.ed. London: Academic Press, 2012. 764 p.
- [11] 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.
- [12] 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.

- [13] 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.
- [14] KHALIL, A. E. E. et al. Impact of confinement on flowfield of swirl flow burners **Fuel**, v. 184, p. 1-9, 2016.
- [15] JOURDAINE, P. et al. Effect of Quarl on N<sub>2</sub>- and CO<sub>2</sub>-Diluted Methane Oxy-Flames Stabilized by an Axial-Plus-Tangential Swirler. **Combustion, Fuels and Emissions**, v. 4A, 2016.
- [16] Mergulhão, C. S., et al. Experimental study of a lean premixed turbulent swirling flame stabilization. **Cobem - 2017-0808**, ABCM, Curitiba, 2017.

## A

### Variações dos *swirlers* projetados

Ensaaios exploratórios com uma versão preliminar do queimador foram realizados e apontaram as direções de projeto a serem seguidas. A base do queimador onde a câmara de combustão ficava apoiada nos ensaios preliminares possuía uma dimensão diferente daquela finalmente empregada. Por esta razão, os primeiros *swirlers* projetados possuem 17 mm de altura. Alguns desses modelos podem ser observados na figura A.1.

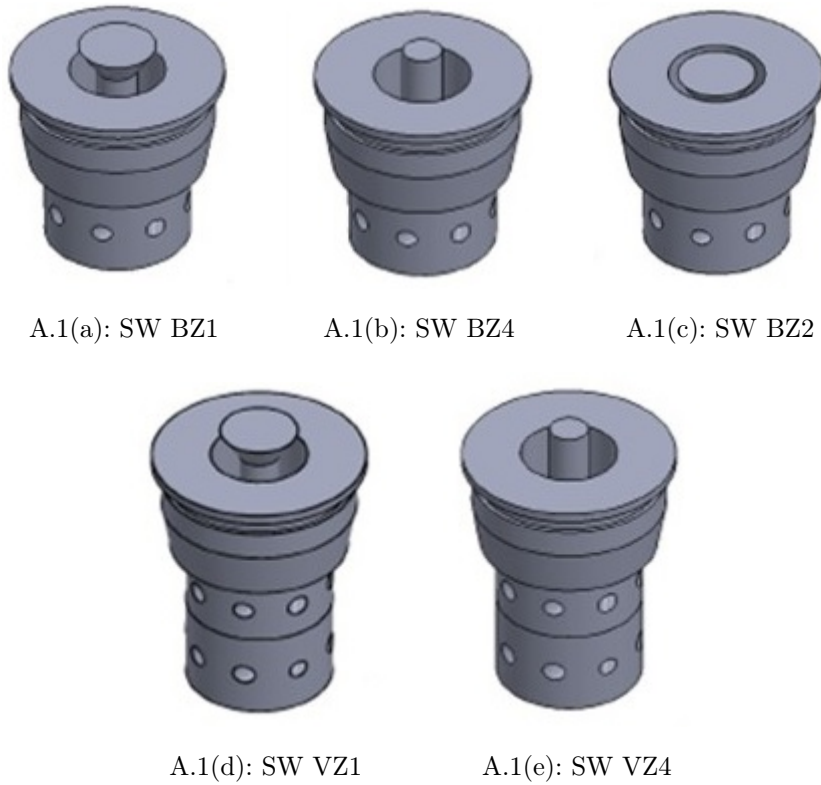


Figura A.1: Exemplos de variações de *swirlers* projetados.

O modelo da figura A.1(a) foi utilizado como referência para os demais, por se tratar do modelo original oriundo da École Centrale de Paris. Este *swirler* possui 8 orifícios igualmente espaçados além de um corpo rombudo central com uma protuberância cônica. Com o intuito de alterar a área de saída do escoamento, foi projetado um *swirler* sem a protuberância cônica (figura A.1(b)) e outro com a parte cônica no interior do *swirler* (figura A.1(c)). Nesses dois casos, a área de entrada do escoamento permanece a mesma por causa do número de orifícios. Por outro lado, as figuras A.1(d) e A.1(e) mostram *swirlers* com 16 orifícios, dobrando dessa forma a área de entrada. As variações de

todos os modelos de *swirler* estão colocados na tabela A.2 com a sua respectiva nomenclatura definida na tabela A.1. É necessário destacar que apesar de todos os *swirlers* da tabela A.2 terem sido projetados, apenas alguns foram de fato usinados e ensaiados.

Tabela A.1: Nomenclatura empregada para distinguir as variações geométricas.

Nomenclatura	
B	Base (1 camada)
V	Variação (2 camadas)
NC	Novo Confinamento
1	Cone para fora
2	Cone para dentro
3	Cilindro D=3 mm
4	Cilindro D=4 mm
X	5 furos
Y	6 furos
Z	8 furos

Tabela A.2: Variação dos swirlers projetados.

Swirler	Nº furos	Nº camadas	$\alpha$	Formato	d (mm)	h (mm)
SW BZ1	8	1	45°	Cone invertido	8	23
SW BZ2	8	1	45°	Cone invertido	8	20
SW BZ3	8	1	45°	Cilindro	3	23
SW BZ4	8	1	45°	Cilindro	4	23
SW VZ1	16	2	45°	Cone invertido	8	30
SW VZ3	16	2	45°	Cilindro	3	30
SW VZ4	16	2	45°	Cilindro	4	30
SW BNCZ1	8	1	45°	Cone invertido	8	36
SW BNCZ2	8	1	45°	Cone invertido	8	33
SW VNCZ1	16	2	45°	Cone invertido	8	45
SW VNCZ2	16	2	45°	Cone invertido	8	42
SW BX1	5	1	72°	Cone invertido	8	23
SW BNCX1	5	1	72°	Cone invertido	8	36
SW VNCX1	10	2	72°	Cone invertido	8	45
SW BNCX2	5	1	72°	Cone invertido	8	33
SW VNCX2	10	2	72°	Cone invertido	8	42
SW BY1	6	1	60°	Cone invertido	8	23
SW BNCY1	6	1	60°	Cone invertido	8	36
SW VNCY1	12	2	60°	Cone invertido	8	45
SW BNCY2	6	1	60°	Cone invertido	8	33
SW VNCY2	12	2	60°	Cone invertido	8	42