

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Deysiane Cristina Marques**

**Estudo experimental da combustão de  
chamas turbulentas de etanol e de ar 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 2019

## Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, professor Luís Fernando Figueira da Silva, pelo aprendizado, empatia, paciência, disponibilidade e, sobretudo, pelo suporte.

À minha família, pelo apoio e incentivo durante minha trajetória acadêmica. Não tenho palavras para agradecer-los o suficiente.

Aos meus colegas de laboratório Nicole Junqueira, Gabriela Nobrega, Maria Clara Vieira, Rodolfo Spinelli e Emilio Álvarez pelo companheirismo e pela ajuda.

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

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

## Resumo

### Estudo experimental da combustão de chamas turbulentas de etanol e de ar com *swirl*

A combustão compreende a grande parte de geração de energia no mundo, cerca de 80%, sendo de suma importância para os setores industrial, de transporte e de geração de energia. Em contrapartida, são emitidos gases poluentes prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente. Com isso, queimadores capazes de operar com combustão pré-misturada pobre veem sendo desenvolvidos como solução para reduzir a emissão de poluentes, em especial o NO<sub>x</sub>. Queimadores que utilizam esse tipo de processo utilizam *swirl* para estabilizar a combustão. O presente trabalho tem como objetivo estudar chamas turbulentas pré-misturadas de etanol e de ar em presença de *swirl*. Inicialmente, foi desenvolvida uma adaptação para que fosse possível operar com etanol. Em seguida, a partir da identificação de diferentes topologias de chamas traçou-se diagramas de regimes de combustão. Foram identificados os regimes estáveis e instáveis de combustão como função da vazão total da mistura combustível/ar e de sua riqueza. Por fim, foi feita uma comparação dos diagramas de regimes de combustão para o etanol e para o metano.

### Palavras-chave

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

## Abstract

### **Experimental study of combustion of turbulent flames of ethanol and air with *swirl***

Combustion comprises the vast majority of power generation in the world, about 80%, and is of great importance to the industrial, transport and power generation sectors. In contrast, pollutant gases harmful to human health and the environment are emitted. As a result, burners capable of operating on poor premixed combustion are being developed as a solution to reduce pollutant emissions, especially NO<sub>x</sub>. Burners using this type of process use swirl to stabilize combustion. The present work aims to study pre-mixed turbulent flames of ethanol and air in presence of swirl. Initially, an adaptation was developed so that it could operate with ethanol. Then, from the identification of different flame topologies, diagrams of combustion regimes were traced. Stable and unstable combustion regimes were identified as a function of the total flow of the fuel / air mixture and its richness. Finally, a comparison of the combustion regime diagrams for ethanol and methane was made.

## Keywords

Combustion; Swirl; Premixed flames; Experimental study.

## Sumário

1	Introdução	8
2	Objetivo	11
2.1	Objetivos específicos . . . . .	11
3	Conceitos Teóricos	12
3.1	Prinípios do processo de combustão . . . . .	12
3.2	Conceitos da calorimetria . . . . .	13
3.3	Número de swirl . . . . .	14
3.4	Chama laminar pré-misturada . . . . .	16
4	Metodologia experimental	17
4.1	Montagem Experimental . . . . .	17
4.2	Câmara de Combustão . . . . .	18
4.3	Swirlers radiais . . . . .	19
4.4	Medidores de vazão . . . . .	20
5	Resultados e discussões	22
5.1	Estudo da vaporização da mistura no cordão de aquecimento . . . . .	22
5.2	Determinação dos regimes de combustão . . . . .	23
5.3	Comparação entre os diagramas dos regimes de combustão de metano/ar e de etanol/ar . . . . .	26
6	Conclusões e perspectivas	28

## Lista de figuras

3.1	Plano de entrada(esquerda) e saída(direita) do swiler [13]. . . . .	15
4.1	Esquema da bancada experimental: 1 - Tanque de pressurização; 2 - Medidor de vazão do ar; 3 - Rotômetro; 4 - Queimador; 5 - Cordão de aquecimento. . . . .	17
4.2	Câmara de combustão: 1 - swirler, 2 - base, 3 - cantoneiras, 4 - janelas de quartzo [15]. . . . .	19
4.3	Swirler: 1 - orifícios de entrada de ar e combustível, 2 - área de saída do escoamento, 3 - corpo rombudo central ("bluff body") [13].	19
4.4	Curva de calibração do rotômetro de etanol . . . . .	20
5.1	Curvas de isotência como função da vazão mássica total ar/combustível e da riqueza da mistura. . . . .	22
5.2	Média das imagens binarizadas do radical OH [13]. . . . .	24
5.3	SW06II: Diagrama de regimes de combustão da mistura etanol/ar, $S=1,3$ . . . . .	25
5.4	Diagrama de regimes de combustão superpostos às curvas de isotência. . . . .	26
5.5	SW06II: Diagrama de regime de combustão da mistura metano+ar, $S=1,3$ [13]. . . . .	26

## Lista de tabelas

# 1

## Introdução

A combustão consiste de um processo de geração de energia por meio da interação química entre duas substâncias. Esse processo tem suma importância em diversos segmentos da sociedade compreendendo a grande parte da geração de energia necessária do mundo, cerca de 80%. A reação química entre combustível e oxidante provoca a liberação de energia em forma de calor, que pode ser transformada em energia mecânica ou elétrica. Essa ciência permeia inúmeros segmentos, entre eles: industriais, automobilísticos e de geração de energia elétrica[1].

Os combustíveis utilizados no processo de combustão podem estar em qualquer fase: líquida, sólida ou gasosa. Os combustíveis líquidos, em geral, são derivados de petróleo bruto incluindo gasolina, diesel, combustível para aviação e óleos combustíveis. A exceção mais notável é o etanol oriundo da cultura de cana-de-açúcar, que é utilizado como combustível automotivo no Brasil há vários anos. Os combustíveis sólidos compreendem a madeira, carvão e outros tipos de biomassa. Já os combustíveis gasosos mais usados em residências e para geração de energia são o gás natural e o gás liquefeito de petróleo (GLP)[2].

A maioria dos combustíveis utilizados no processo de combustão são de origem fóssil e o uso destes vem contribuindo significativamente para o aumento do aquecimento global, por conta da elevada emissão de  $\text{CO}_2$  oriunda do processo de combustão[2]. Os combustíveis derivados de biomassa ou de outras fontes renováveis revelam-se como possíveis alternativas aos combustíveis fósseis. Os biocombustíveis são exemplos de combustíveis derivados de fonte diferente dos combustíveis fósseis. Alguns exemplos de biocombustíveis são: óleo vegetal, biodiesel, bioálcoois, biogás, biocombustíveis sólidos (madeira, carvão e outros tipos de biomassa) e gás de síntese[2].

O impacto que a emissão de  $\text{CO}_2$  ocasiona ao meio ambiente tem gerado uma preocupação mundial sendo necessária a criação de regulamentações cada vez mais severas. Por isto foi assinado um acordo global, o protocolo de Quioto, onde se determinam metas de redução dos gases do efeito estufa. Com isso, os países se viram obrigados a investir na produção de combustíveis renováveis e no desenvolvimento de tecnologias[3].

A participação de combustíveis de fontes renováveis na matriz energética nacional compreendeu 45,3% em 2018, tendo um aumento de 2,3% em comparação ao ano anterior. Desta participação 17,4% provém da biomassa da cana,

12,6% hidráulica, 8,4% lenha e carvão vegetal e 6,9% lixo e outras fontes renováveis. Em conjunto, as emissões de CO<sub>2</sub> decresceram de 5,2% em relação a 2017, segundo o balanço de energético nacional de 2019 [4].

Dentre os combustíveis de fontes renováveis o uso do etanol nos meios de transporte vem se consolidando em vários países. O etanol é uma alternativa para a substituição dos combustíveis fósseis uma vez que emite menos poluentes, sua produção é menos custosa e sua fabricação é mais simples.

A emissão de poluentes não só está relacionada com o tipo de combustível, como também com o processo de combustão. O processo de combustão pode ser classificado de acordo com o balanço químico dos componentes da reação. No caso estequiométrico reagentes possuem quantidades equivalentes e seus gases de exaustão compreendem dióxido de carbono, água e, eventualmente, dióxido de enxofre. Havendo insuficiência de oxigênio a combustão será incompleta e surgem produtos como monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, hidrogênio, metano, outros hidrocarbonetos leves e alcatrão[5].

Com regulamentações cada vez mais rigorosas, sistemas de engenharias utilizando câmaras turbulentas pré-misturadas pobres veem sendo desenvolvidos com o intuito de reduzir as emissões de poluentes, em especial o NO<sub>x</sub>. Alguns exemplos de aplicação de dispositivos práticos que operam com combustível e ar pré-misturados são a turbina a gás e o forno doméstico[2]. Os óxidos de nitrogênio são formados pela reação de oxigênio e nitrogênio presentes no ar sob condições de alta temperatura e elevada pressão. Esses são responsáveis pela destruição da camada de ozônio, barreira de proteção de raios ultravioletas incidente na terra, uma vez que formam ozônio no nível troposférico[6].

Turbinas à gás clássicas operavam com modos de combustão não pré-misturadas, em que os combustíveis líquidos eram nebulizados diretamente na câmara e o processo de combustão ocorria sem pré-mistura completa de combustível e ar. Tal evento resultava em uma temperatura de queima em temperaturas mais altas nos locais onde a mistura é próxima de uma proporção estequiométrica[7].

Nas turbinas mais modernas o combustível e o ar são misturados antes de entrar na câmara de combustão, resultando numa mistura mais homogênea[2]. Por se apresentar mais homogênea, evita assim extremos de temperatura no processo de combustão diminuindo a emissão de NO<sub>x</sub>, em comparação com a combustão não pré-misturada[8]. Como no presente trabalho o combustível estudado é o etanol líquido, faz-se necessário modificar o estado da mistura combustível/ar, a montante da câmara de combustão, para poder operar nesse modo de combustão.

Embora pré-misturas pré-vaporizadas pobres reduzam significativamente

as emissões de NOx, podem ocasionar instabilidade. Essas instabilidades geradas em chamas pré-misturadas podem ocorrer por conta da interação da chama com o escoamento, possuindo assim uma dinâmica própria. Um dos principais problemas em sistemas de combustão de motores aeroespaciais está relacionado com as instabilidades de combustão, sendo estas decorrentes da interação dos fenômenos de combustão, acústica e turbulência. Tais instabilidades podem se tornar tão intensas, em alguns sistemas, até o ponto de interromper a chama ou danificar o combustor[9].

Combustores modernos de turbinas a gás contam com a presença de uma peça na base do queimador denominada swirler, sendo esta responsável por ancorar a chama de maneira eficaz e aumentar o tempo de residência do fluido, facilitando assim a estabilização da combustão. Além disso, os escoamentos turbilhonares complexos dão origem a várias zonas de recirculação e camadas de cisalhamento, gerando muitas possibilidades de estabilização da chama. Isso faz com que os escoamentos em presença de swirl exibam vários formatos possíveis de chama média[10].

Sendo assim, o presente trabalho dedica-se a estudar experimentalmente chamas turbulentas de etanol e ar em presença de swirl. O queimador denominado BEST Flame (Bioethanol Swirl Turbulent), que vem sendo estudado no laboratório de combustão e turbulência da PUC-Rio, foi projetado para queimar etanol e ar pré-misturados. Este projeto foi realizado em parceria com o laboratório Énergetique moleculaire et macroscopique combustion, Centre national de la recherche scientifique, CentraleSupélec, (France) e opera com swilens radiais[11][12][13][14][15][16]. Swilens radiais consistem de peças que se localizam na base do queimador e tem como objetivo estabilizar chamas turbulentas e homogeneizar a mistura[11].

O restante do trabalho está dividido em 5 capítulos. O primeiro apresenta os objetivos gerais e específicos. Em seguida, conceitos teóricos são enunciados afim de introduzir os fundamentos que possibilitaram a realização do trabalho. Posteriormente, são apresentados os materiais e metodologia experimental, que estão subdivididos em 3 seções: câmara de combustão e swilens radiais. Depois, são discutidos os resultados obtidos. Por fim, são apresentadas as conclusões.

## 2

### Objetivo

O projeto tem como objetivo analisar a combustão de etanol/ar pré misturados, em presença de swirl com o intuito de determinar os diferentes regimes de combustão, estáveis ou instáveis. Pretende-se também comparar estes resultados com os existentes para a mistura metano/ar, obtidos no mesmo queimador[12].

#### 2.1

##### Objetivos específicos

- Compreender os princípios dos processos de combustão,
- Desenvolver adaptação do combustor existente para a queima de etanol,
- Determinar os regimes de combustão em função da riqueza e definir em função da vazão da mistura combustível-ar,
- Comparar com os resultados existentes da mistura metano/ar.

## 3

### Conceitos Teóricos

Fundamentos teóricos que são a base para o desenvolvimento deste trabalho serão enunciados neste capítulo. São abordados, a princípio, conceitos fundamentais da combustão e, em seguida, o princípio da calorimetria e, por fim, o número de swirl será discutido.

#### 3.1

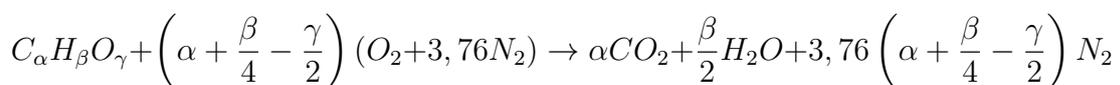
##### Prinípios do processo de combustão

A reação química entre combustível e oxidante gera o fenômeno denominado combustão. Para a seleção do combustível leva-se em conta o seu emprego, a energia contida por massa, segurança, as propriedades da combustão e do combustível e o custo. Já o oxidante mais utilizado nos processos de combustão é o ar, por ser gratuito e abundante em todos os lugares na superfície do planeta[2].

A combustão pode ser de dois tipos: pré-misturada ou não pré-misturada, dependendo do queimador. No presente trabalho combustível e oxidante são pré-misturados antes de ocorrer a queima. Esta queima pode ser iniciada pela ignição de uma faísca ou de uma chama piloto e se propaga para consumir os gases não queimados.

Tal processo requer inicialmente, que o calor gerado na zona de reação seja suficiente para aquecer a zona não queimada até a temperatura de ignição e, posteriormente, que a mistura reagentes pré-aquecida reaja quimicamente na zona de reação. Portanto, a velocidade de propagação da chama depende tanto das propriedades de transporte quanto das propriedades químicas dos reagentes.

A interação química entre combustível e oxidante pode ser completa ou incompleta, dependendo se os produtos reagem em sua totalidade entre si ou não. A equação estequiométrica descreve o comportamento ideal, uma vez que a mistura combustível possui quantidade equivalente de reagentes e produtos. A determinação da quantidade de combustível e ar para se obter uma reação ideal é feita como



Para uma situação real a proporção entre ar e combustível não será a mostrada acima, pois na prática, a quantidade de ar é diferente da estequiométrica. Com isso, a mistura recebe uma denominação de acordo com a quantidade de oxigênio real que possui em comparação com a quantidade ideal podendo ser rica ou pobre. No primeiro caso há deficiência de ar e no segundo há excesso de ar. A riqueza da mistura (ou razão de equivalência) é determinada segundo

$$\phi = \frac{f}{f_s}, \quad (3-1)$$

onde  $f_s$  indica o valor da razão combustível-ar na condição estequiométrica e  $f$  indica o valor da razão combustível-ar dadas por:

$$f = \frac{m_f}{m_a} \quad (3-2)$$

$$f_s = \frac{m_{fs}}{m_{as}} \quad (3-3)$$

Manipulando as equações enunciadas acima a riqueza pode ser representada segundo

$$\phi = \frac{m_{as}}{m_a}, \quad (3-4)$$

Com isso, podemos classificar a mistura de acordo com o valor da riqueza.

- Mistura pobre, se  $\phi < 1$ ;
- Mistura estequiométrica, se  $\phi = 1$ ;
- Mistura rica, se  $\phi > 1$ .

### 3.2

#### Conceitos da calorimetria

A potência corresponde a razão entre quantidade de calor transferida entre dois corpos, devido a desigualdade de temperaturas, por unidade de tempo, ou seja,

$$P = \frac{Q}{\Delta t} = \dot{Q} \text{ [J/s]}, \quad (3-5)$$

Considerando um volume de controle em torno de dois corpos com temperatura distinta, de acordo com o princípio da conservação de Energia,

a quantidade de calor cedida por um corpo somada com a quantidade de calor que o outro corpo recebeu é nula.  $\dot{Q}$  representa a soma das taxas de transferência de calor sensível e de calor latente,

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{sensível} + \dot{Q}_{latente}, \quad (3-6)$$

$\dot{Q}_{sensível}$  corresponde à quantidade de calor necessária para a elevação da temperatura da mistura. Já o calor latente, exprime a quanto uma substância precisa receber de calor para mudar de fase.

$$\dot{Q}_{sensível} = \dot{m}c\Delta T, \quad (3-7)$$

$$\dot{Q}_{latente} = \dot{m}L, \quad (3-8)$$

sendo  $\dot{m}$  a vazão mássica,  $c$  o calor específico,  $L$  o calor latente e  $\Delta T$  a diferença entre temperatura final e temperatura inicial da substância.

### 3.3

#### Número de swirl

O número de swirl é uma medida comparativa entre o fluxo axial da quantidade de movimento tangencial  $G_\theta$  e o fluxo de quantidade de movimento axial  $G_z$ .

$$S = \frac{G_\theta}{RG_z}, \quad (3-9)$$

onde  $R$  é o raio interno do swirler, mostrado na Fig.3.1.

Seguindo trabalhos anteriores, para determinação do numero de swirl assumiu-se que o escoamento na entrada do swiler apresenta uma rotação de corpo sólido  $u_\theta = wr$ , que a velocidade axial é uniforme ( $u_z$ ) a qual pode ser determinada por meio da vazão volumétrica de entrada, negligenciando, também a contribuição da pressão estática no fluxo de quantidade de movimento axial[17][18].

$$S = \frac{\int_0^R u_z u_\theta r^2 dr}{R \int_0^R u_z^2 r dr} = \frac{u_\theta(R)}{2u_z}, \quad (3-10)$$

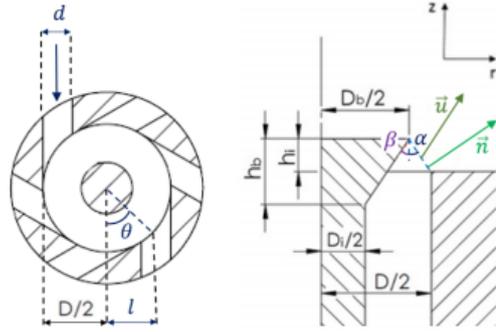


Figura 3.1: Plano de entrada(esquerda) e saída(direita) do swiler [13].

Utilizando a expressão da conservação da massa no tubo e levando em conta a geometria mostrada na Fig. 3.1,  $u_\theta$  pode ser expresso como

$$u_\theta = \frac{4\dot{V}}{\pi n d^2} \sin \theta, \quad (3-11)$$

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

Considerando o vetor velocidade paralelo a superfície do cone invertido e a geometria da swirl ilustrada na Fig. 3.1, a componente da velocidade axial,  $u_z$  pode ser definida como:

$$\tan \beta = \frac{u_r}{u_z} = \frac{D_b - D_i}{2h_b}, \quad (3-12)$$

$$\tan \alpha = \frac{A_z}{A_r} = \frac{D - D_b}{2h_i}, \quad (3-13)$$

$$\dot{V} = \vec{u} \cdot \vec{A}_s = u_z A_z \left( 1 + \frac{\tan \beta}{\tan \alpha} \right), \quad (3-14)$$

$$u_z = \frac{4\dot{V}}{\pi D^2} \frac{1}{\left[ 1 - \left( \frac{D_b}{D} \right)^2 \right]} \frac{1}{\left[ 1 + \frac{D_b - D_i}{D - D_b} \frac{h_i}{h_b} \right]}, \quad (3-15)$$

onde  $D_i$  é o diâmetro do cilindro interno,  $h_i$  a medida entre a superfície do swiler e o topo do cone,  $D_b$  o diâmetro do cone invertido,  $D$  o diâmetro do swiler e  $h_b$  a altura do cone invertido. Assim, o número de swirl pode ser determinado como

$$S = \underbrace{\frac{lD}{nd^2}}_{(a)} \underbrace{\left[1 - \left(\frac{D_b}{D}\right)^2\right]}_{(b)} \underbrace{\left[1 + \frac{D_b - D_i}{D - D_b} \frac{h_i}{h_b}\right]}_{(c)}, \quad (3-16)$$

onde  $l$  corresponde à distância do centro à entrada da mistura e  $n$  é o número de orifícios.

A Eq. (3-16) constitui expressão dos seguintes elementos:

- (a) o número de swirl usual,
- (b) a influência do cilindro central,
- (c) o efeito combinado do ângulo e altura do "bluff-body".

### 3.4

#### Chama laminar pré-misturada

Chamas pré-misturadas se originam de um processo de combustão no qual combustível e oxidante são misturados antes de ser injetados na câmara de combustão. Este tipo de chama é aquele encontrado no presente estudo. Neste tipo de combustão a mistura é homogênea, e após ocorrer a ignição a chama se propaga através da mistura não queimada. Esta propagação é controlada por dois processos. Inicialmente, o calor produzido na zona de reação é transferido a montante por condução e convecção, aquecendo a mistura não queimada. Em seguida, estes reagentes pré-aquecidos reagem quimicamente na zona de reação, em presença de transporte molecular.

Na zona de pré-aquecimento a temperatura é relativamente baixa, com isso pode-se considerar que reações químicas são negligenciáveis. Este tipo de chama se propaga livremente com velocidade constante,  $S_L$ , a qual é uma propriedade da mistura. Como o transporte por condução de calor controla esta propagação, a espessura da chama pode ser estimada como:

$$\delta = \frac{\alpha}{S_L}, \quad (3-17)$$

onde  $\alpha = k/\rho c_p$  é a difusividade térmica.

Na zona de reação várias espécies químicas tornam-se molecularmente excitadas e a alta temperatura, emitem radiação. No caso de misturas pobres a emissão tem coloração azulada e pode ser associada à radiação dos radicais CH. Já a coloração laranja/avermelhada corresponde à radiação das moléculas de CO<sub>2</sub>, vapor de água e fuligem. Para misturas ricas, observa-se uma coloração esverdeada devido a excitação das moléculas de C<sub>2</sub>.

## 4

### Metodologia experimental

Neste capítulo será apresentado a montagem experimental evidenciando seus componentes e os métodos experimentais utilizados. Em parceria com o laboratório Énergetique moleculaire et macroscopique combustion, Centrenational de la recherche scientifique, CentraleSupélec, (France) um queimador vem sendo estudado no laboratório de combustão e turbulência da PUC-Rio com o objetivo de caracterizar chamas turbulentas em presença de swirl.

#### 4.1

##### Montagem Experimental

A Fig. 4.1 mostra o aparato experimental, que consiste de um sistema de queima e de sistemas de controle.

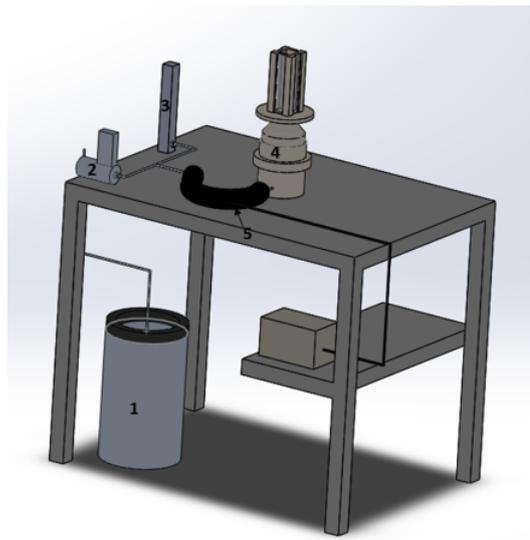


Figura 4.1: Esquema da bancada experimental: 1 - Tanque de pressurização; 2 - Medidor de vazão do ar; 3 - Rotâmetro; 4 - Queimador; 5 - Cordão de aquecimento.

O sistema de queima é composto por uma câmara de combustão e um swiler radial encaixado na base da câmara de combustão. Já o sistema de controle consiste de um controlador de vazão para o ar, um rotâmetro para o etanol, um tanque de pressurização de etanol e um sistema de aquecimento.

A mistura combustível/ar é fornecida ao sistema de queima por meio de tubos e é inserida no queimador pré-misturada. Como o combustível utilizado é líquido, para operar nesse modo de combustão foi necessário adaptar um

sistema que fosse capaz de vaporizar a mistura. Para tanto, é utilizado um sistema de aquecimento, que consiste de um cordão isolado, no qual uma resistência eleva a temperatura da substância que flui em seu interior. Tal sistema possui potência máxima de trabalho de 252 W, tensão de 230 V e temperatura máxima de operação de 200 °C.

Além disso, antes de passar pelo cordão de aquecimento o combustível é pressurizado. O equipamento responsável pela pressurização do etanol é denominado tanque de pressurização cuja marca é Agavic indústria e comércio de equipamentos LTDA. Sua pressão máxima de trabalho é de 5 bar e a capacidade máxima de armazenamento é de 10 L.

## 4.2

### **Câmara de Combustão**

A câmara de combustão ilustrada na Fig. 4.2 consiste de uma base de latão, quatro cantoneiras de aço inox e quatro janelas de quartzo. A base da câmara de combustão tem formato cilíndrico com espessura de 11 mm e possui um rasgo ao longo da circunferência de 4 mm de altura e profundidade usado para encaixá-la no queimador.

A base fica em contato direto com gases a altas temperaturas e, portanto, precisa ser resfriada. Para isto, esta base possui um canal de resfriamento de 3 mm de diâmetro por onde a água escoar, passa pela peça de resfriamento, e é escoada por um canal de saída de mesmo diâmetro. Além disso, a base apresenta um orifício onde o swiler é encaixado e quatro furos para encaixe das cantoneiras.

As cantoneiras são fixadas na base da câmara de combustão e tem por finalidade sustentar janelas de quartzo de 170 mm de altura, 10 mm de espessura e 40 mm de largura. As janelas de quartzo são transparentes, e, por isto, permitem a visualização do interior da combustão de combustão, e resistem a altas temperaturas. Para evitar que os materiais se fundam e que janelas de quartzo trinquem, utiliza-se um material isolante no encaixe entre cantoneira e a base, e nos locais em que o quartzo está em contato com a base.

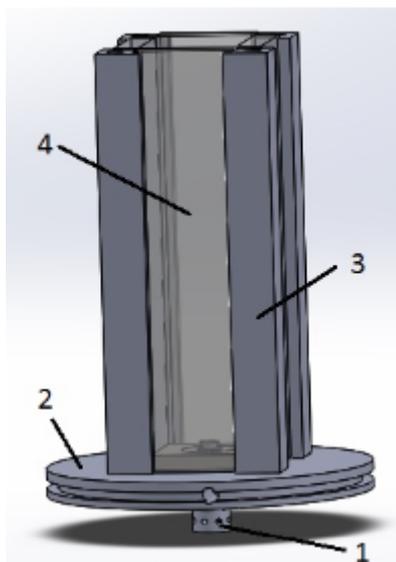


Figura 4.2: Câmara de combustão: 1 - swirler, 2 - base, 3 - cantoneiras, 4 - janelas de quartzo [15].

### 4.3

#### Swirlers radiais

O swirler, mostrado na Fig. 4.3, é uma peça, fabricada em aço inox, que se localiza na base da câmara de combustão e tem por finalidade gerar um movimento rotacional da mistura combustível/ar.

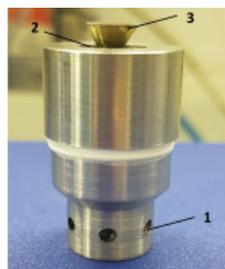


Figura 4.3: Swirler: 1 - orifícios de entrada de ar e combustível, 2 - área de saída do escoamento, 3 - corpo rombudo central ("bluff body") [13].

No presente trabalho a mistura combustível/ar é introduzida por 6 orifícios de 2,3 mm de diâmetro, que alimentam a câmara do swirler. Essa, por sua vez, possui 10 mm de diâmetro e 33 mm de altura. Além disso, a parte interna do swirler possui um cilindro central, de diâmetro igual a 4 mm, com um cone invertido no topo. O cone invertido pode estar rente ou com altura superior a base do swirler e atua como um "bluff-body", onde a chama ancora e estabiliza[13]. O swirler utilizado nos ensaios é denominado SW06II e possui altura do cone invertido, em relação a base do queimador, de 3 mm.

A partir das características geométricas do swiler, e substituindo-as na Eq. (3-16), obteve-se um número de swirl de  $S = 1,3$ .

#### 4.4

##### Medidores de vazão

Nos ensaios foram utilizados dois medidores de vazão, um para controlar o ar e o outro para controlar o etanol.

O medidor de vazão utilizado para o ar é da marca Bronkhorst, série F-202AV com  $\pm 0,5\%$  de leitura e  $\pm 0,1\%$  de escala completa. Seu controle é realizado através de um aparelho eletrônico que ajusta o percentual da vazão do escoamento.

Já para o etanol foi usado um rotâmetro da marca Brooks instrument modelo 1355 L VD T1 com precisão de 5% da escala. Por meio dos dados apresentados na folha de dados foi determinada a equação que melhor se ajusta aos dados, facilitando assim a determinação a conversão do valor lido, em milímetros, no rotâmetro para o valor da vazão em  $l/h$ . Na Fig. 4.4 foram traçados os pontos lidos na folha de dados e a linha de tendência que melhor se ajusta a eles.

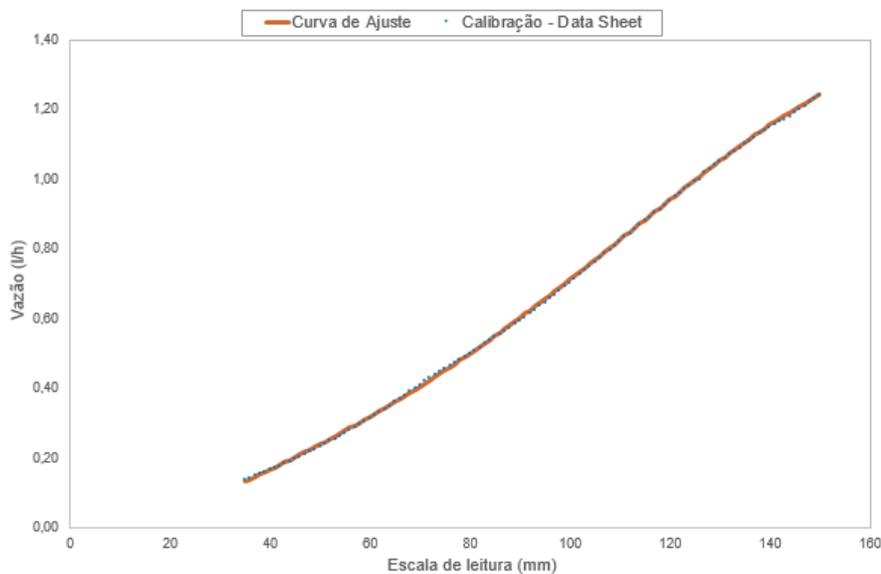


Figura 4.4: Curva de calibração do rotâmetro de etanol

A equação que representa a curva de ajuste é

$$y_{ajuste} = -4,3248 \cdot 10^{-9} x^4 + 1,2483 \cdot 10^{-6} x^3 - 9,2547 \cdot 10^{-5} x^2 + 9,6 \cdot 10^{-3} x - 0,1385, \quad (4-1)$$

onde  $x$  corresponde ao valor lido, em mm, diretamente no rotâmetro e o  $y_{ajuste}$  corresponde a vazão em  $l/h$ .

A incerteza encontrada para a curva de ajuste foi de  $5,9 \cdot 10^{-4} l/h$  e com isso, pode-se determinar que a incerteza do rotâmetro corresponde a  $0,06 l/h$ .

## 5

### Resultados e discussões

Esse capítulo apresenta, primeiramente, a análise da vaporização da mistura no cordão de aquecimento e, em seguida, os resultados experimentais relativos aos diferentes regimes de combustão e, por fim, a comparação entre os diagramas dos regimes de combustão do etanol e do metano.

#### 5.1

##### Estudo da vaporização da mistura no cordão de aquecimento

Como apresentado na seção 4.1, uma adaptação foi necessária para que fosse possível operar o queimador com etanol. Com a finalidade de vaporizar o combustível líquido a montante da câmara de combustão, o cordão de aquecimento fornece uma potência que deve ser capaz de modificar o estado da mistura combustível/ar para gasoso.

Como o cordão de aquecimento possui uma limitação técnica de 252 W de potência, foram feitos cálculos com o intuito de determinar uma faixa de trabalho viável. Estes cálculos consideraram que os valores da temperatura ambiente e de evaporação do etanol à pressão ambiente (1 atm) são, respectivamente,  $T_{amb.} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $T_{vap.et.} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

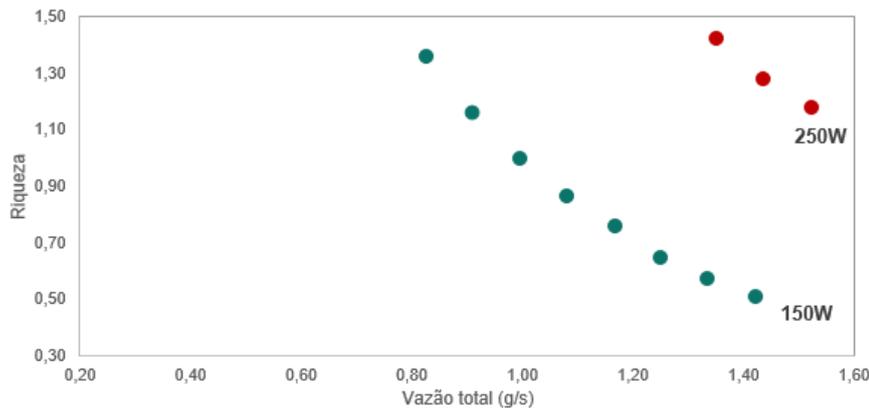


Figura 5.1: Curvas de isotermia como função da vazão mássica total ar/combustível e da riqueza da mistura.

Utilizando as relação de conservação de energia discutida na seção 3.2, e considerando que o calor latente do etanol e o calor específico do etanol e do ar são, respectivamente,  $L = 200\text{ cal/g}$ ,  $c_{esp.et.} = 2840\text{ J/kgK}$  e  $c_{esp.ar.} = 1004,8\text{ J/kgK}$ , na Fig. 5.1 foram traçadas duas linhas de potência iguais a 150 W

e 250 W. Estes valores foram escolhidos pois ambos se encontram abaixo da limitação técnica do equipamento. Com isso, pode-se observar graficamente com quais riquezas e valores de vazão total é possível se operar com margem de segurança. Para tanto, o ponto de operação selecionado deve estar abaixo da linha de isotência igual a 150 W. Para que isso ocorra, a vazão total não deve ultrapassar de  $1,0 g/s$  para  $\phi = 1,0$  e  $1,4 g/s$  para  $\phi = 0,5$ .

Para a determinação da curva de isotência foi considerado que não há perda de calor para o meio. Cálculos mais complexos levando em conta transferência de calor para determinação da potência não foram realizados.

## 5.2

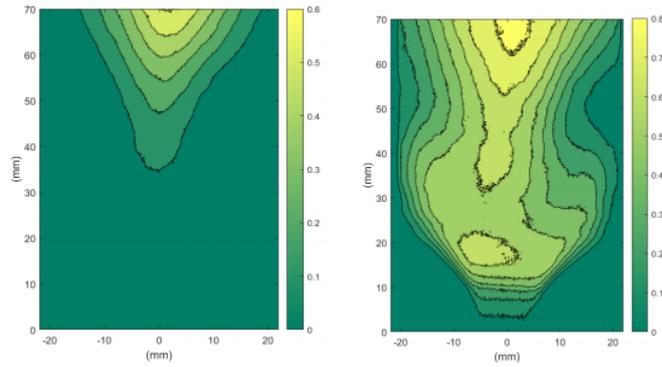
### Determinação dos regimes de combustão

Os experimentos foram realizados fixando um valor da vazão do ar e diminuindo progressivamente a vazão de etanol, afim de determinar os regimes de combustão. Quando tentou-se inverter o procedimento, ou seja, operar com vazão de etanol fixa, a cada alteração na vazão de ar a vazão de etanol modificava-se sem que qualquer interferência manual no rotâmetro fosse feita. Operando dessa maneira houve dificuldade em observar os diferentes regimes, uma vez que o sistema apresentava dificuldade de se estabilizar. Isto ocorre por que não se dispõe de um controlador de vazão mássica de etanol, portanto, uma modificação da vazão de ar leva a uma modificação da queda de pressão através do sistema de alimentação da mistura o que, por sua vez, se traduz por uma alteração na vazão de etanol.

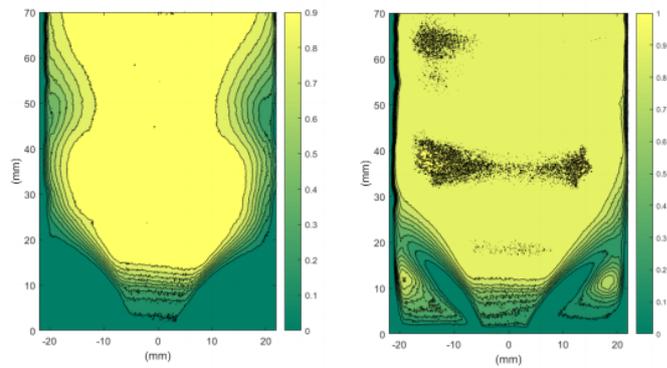
Ainda assim, ao realizar o experimento fixando a vazão de ar foi necessário variar lentamente a vazão de etanol, da ordem de  $0,01 g/s$ , pois o sistema demora vários segundos para se estabilizar e atingir o regime estacionário.

No ensaio foi utilizado o swiler SW06II que possui "bluff-body" com altura superior à superfície do swiler. Este swirler foi escolhido por operar com riquezas menores e possuir maior número de swirl dentre os disponíveis[13]. De modo análogo ao que foi feito nos estudos precedentes, as topologias das chamas foram observadas visualmente e acusticamente. Com isso foram observadas três regiões estáveis, duas instáveis, o "blow-off" e o apagamento de chama do regime II para o regime I, as quais são brevemente descritas adiante.

Alguns desses regimes estão ilustrados na Fig. 5.2 que foram observados por meio da técnica de fluorescência induzida por laser planar OH[13]. Estes regimes foram obtidos usando o swiler SW06I, com "bluff-body" rente a base do swiler [13]. Para o swiler SW06II observou-se as mesmas estruturas de chama.



5.2(a): Regime I:  $\phi = 0,57$  e  $\dot{V} = 1430 \text{ cm}^3/\text{s}$ .  
 5.2(b): Regime II:  $\phi = 0,62$  e  $\dot{V} = 1430 \text{ cm}^3/\text{s}$ .



5.2(c): Regime III:  $\phi = 0,70$  e  $\dot{V} = 1440 \text{ cm}^3/\text{s}$ .  
 5.2(d): Regime IV:  $\phi = 0,73$  e  $\dot{V} = 1450 \text{ cm}^3/\text{s}$ .

Figura 5.2: Média das imagens binarizadas do radical OH [13].

Os regimes observados foram classificados conforme estudos realizados anteriormente[19] e, com isso, foi possível traçar o digrama de regime de combustão. No regime IV, Fig. 5.2(d), a chama é denominada chama M devido ao seu formato, e é estabilizada na zona de recirculação externa. Reduzindo o valor da riqueza um regime instável denominada IVf pode ser observado. Diminuindo a riqueza observa-se um regime estável, III, denominado chama V, Fig. 5.2(c). Em uma riqueza inferior, chega-se a um regime instável, II, no qual a chama pulsa, Fig. 5.2(b). Ao reduzir mais a riqueza chega-se a um regime estável, I, no qual a chama é denominada chama tornado por causa do seu formato, como pode-se observar na Fig. 5.2(a). Reduzindo a riqueza novamente a chama se apaga, fenômeno também denominado "blow-off".

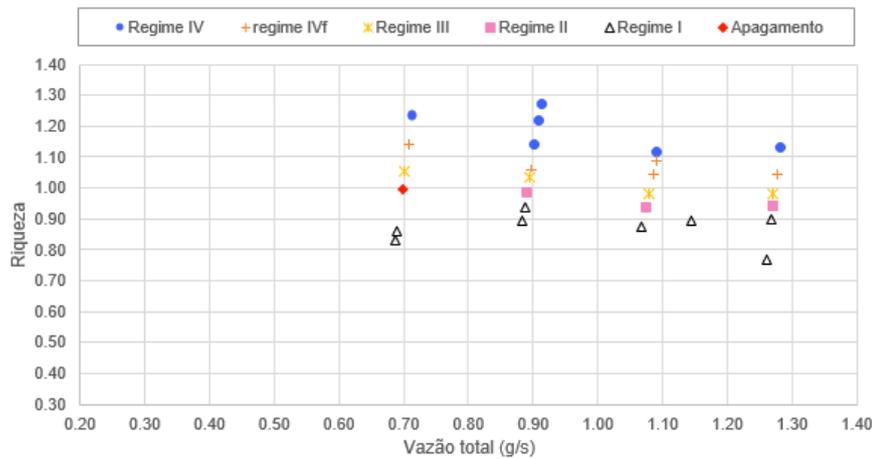


Figura 5.3: SW06II: Diagrama de regimes de combustão da mistura etanol/ar,  $S=1,3$ .

Utilizando uma representação similar àquela dos trabalhos precedentes, a Fig. 5.3 mostra a posição dos diferentes regimes obtidos num plano vazão mássica total  $\times$  riqueza da mistura etanol/ar. Nesta figura é possível observar que o regime IV acontece com maior riqueza e que o regime I é sempre caracterizado por menores riquezas. As regiões de chama estável IV, III e I ocorrem, respectivamente, em faixas de riqueza de 1,11 à 1,27, 0,98 à 1,05 e 0,77 à 0,94. Já as regiões de chama instável IVf e II ocorrem, respectivamente, nas faixas de riqueza de 1,04 à 1,14 e de 0,94 à 0,99.

A Fig. 5.3 também mostra que o regime I possui uma faixa de riqueza mais extensa, podendo assim ser mantida de forma estável mais facilmente. Observou-se, também, que quando se tentava obter o regime I partindo-se do regime II, a chama se apagava. Esse apagamento da chama parece ocorrer porque, para pequenas vazões, não há interação da chama com a parede da câmara de combustão. Uma vez que as paredes da câmara de combustão estão quentes, esta interação favorece o ancoramento da chama no queimador. Além disso, pode-se observar que as faixas de riqueza de um regime para o outro são relativamente estreitas, não permitindo que seja possível traçar com precisão os limites entre duas regiões adjacentes.

O regime de "blow-off" foi observado durante o experimento, mas não foi possível determinar com confiança os valores de vazão de ar e etanol correspondentes devido a limitações intrínsecas do presente aparato experimental, alguma já discutidas no início da seção 5.2. Acredita-se que essas limitações ocorram por conta da imprecisão na leitura do rotâmetro utilizado e, também, por conta da dificuldade em garantir que toda a mistura é pré-vaporizada pelo

cordão de aquecimento antes de ser fornecida ao queimador.

Com o intuito de garantir a confiabilidade do experimento, este foi operado de modo a garantir que os valores de vazão e de riqueza não ultrapassem o limite de potência do cordão de aquecimento. A figura 5.4 mostra que todos os valores utilizados de fato estão abaixo da limitação da potência.

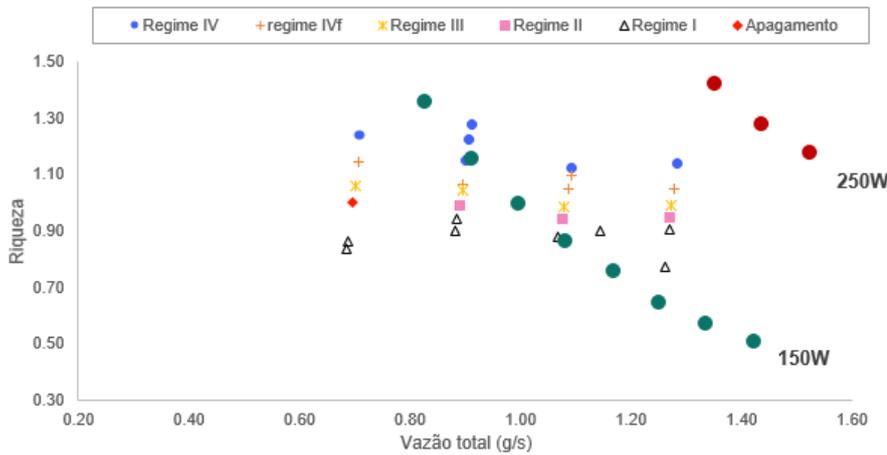


Figura 5.4: Diagrama de regimes de combustão superpostos às curvas de isopotência.

### 5.3

#### Comparação entre os diagramas dos regimes de combustão de metano/ar e de etanol/ar

Estudos realizados no presente queimador foram realizados no laboratório de combustão da PUC-Rio[13], os quais abordaram chamas turbulentas de metano e ar em presença de swirl. O diagrama de regimes de combustão para chamas turbulentas de metano e ar com o swiler SW06II é apresentado na

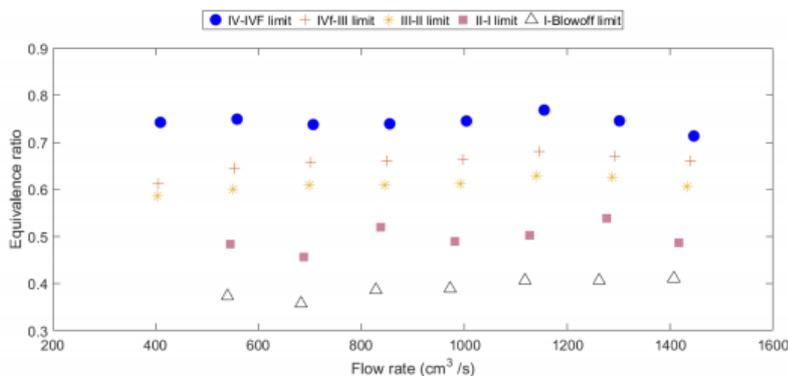


Figura 5.5: SW06II: Diagrama de regime de combustão da mistura metano+ar,  $S=1,3$ [13].

Esta figura mostra que a maior riqueza estudada é 0,8 e a mínima, que corresponde ao limite de "blow-off", é de 0,35. Os valores da riqueza para os regimes estável IV, III e I ocorrem, respectivamente, em faixas de riqueza, 0,77 à 0,80, 0,6 à 0,68 e 0,35 e 0,5. As regiões de instabilidade IVf e II, apresentam faixas de riqueza, respectivamente, entre 0,68 à 0,77 e 0,45 e 0,63. Foi observado, também, que para este swiler não foi possível estabilizar a chama para baixas vazões. Com isso, a chama se extinguiu antes de atingir o regime I. Esse fenômeno, também observado no presente trabalho, é atribuído a uma interação mais fraca da parede do combustor com a chama, visualmente observada para menores vazões e maior número de swirl.

Os limites máximo e mínimo de riqueza apresentados na seção 5.2 equivalem, respectivamente, a 1,27 e 0,77. Com isso, pode-se concluir que com metano é possível operar com riqueza mais baixas. A região de instabilidade II, no estudo com etanol, possui menor extensão de riqueza, em comparação ao estudo realizado com metano, o que sugere ser mais fácil estabilizar a chama com etanol do que com metano.

## 6

### Conclusões e perspectivas

A combustão é um processo que tem suma importância em diversos segmentos da sociedade e compreende a grande parte de geração de energia no mundo. Grande parte destes processos ainda são realizados com combustíveis de origem fóssil, que emitem muitos poluentes prejudiciais a saúde e ao meio ambiente. Com isso, novas tecnologias veem sendo desenvolvidas, visando reduzir o impacto causado pelo processo de combustão.

O queimador denominado BEST Flame foi projetado para operar com combustíveis pré-misturados. No presente estudo foi desenvolvido uma adaptação para que fosse possível operar com etanol. Além disso, foi realizado o mapeamento do diagrama de regime de combustão e a comparação com estudos precedente realizados com metano.

Concluiu-se que as estruturas de chamas encontradas são as mesmas de estudos anteriores, e que operando com etanol os limites de riqueza são mais altos do que com metano. Observou-se, também, que o swiler SW06II, em ambos os casos, apresentava dificuldade em estabilizar a chama para pequenas vazões, ocasionando extinção da mesma.

Em estudos posteriores pretende-se utilizar um cordão de aquecimento que tenha uma potência mais elevada, visando garantir a evaporação da mistura, e obter resultados com maior confiabilidade. Verificou-se, também, a necessidade de ter um controlador de vazão para o etanol. Além disso espera-se realizar um estudo utilizando a técnica fluorescência induzida por laser planar OH para determinar as topologias das chamas e Velocimetria por imagem de partículas para medir o campo de velocidade.

## Referências Bibliográficas

- [1] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <<http://cp.inpe.br/linhas-pesquisa/combustao/>>. Acesso em 13 ago. 2019.
- [2] MCALLISTER, S. et al. **Fundamentals of combustion processes**, USA, Springer, 2011. 327 p.
- [3] Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/protocolo-de-quioto.html>>. Acesso em 13 ago. 2019.
- [4] Balanço Energético Nacional: Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <<https://epe.gov.br/>>. Acesso em 20 ago. 2019.
- [5] LACAVAL, P. T.; MARTINS, C. A. **Métodos experimentais de análise aplicados à Combustão**, Papel Brasil Editora, 2010. 310 p.
- [6] Ministério do Meio Ambiente. **Relatório final: 1º inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários**, Brasil, 2011.
- [7] TACINA, R. R. **Combustor technology for future aircraft**, 26th Joint Propulsion Conference, American institute of aeronautics and astronautics, Orlando, 1990.
- [8] POESCHL, G. et al. **Combustion with low pollutant emissions of liquid fuels in gas turbines by premixing and prevaporization**, Present at the International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Netherlands, 1994.
- [9] LIEUWEN, T.; YANG, V. **Combustion instabilities in gas turbine engines: operational experience, fundamental mechanisms, and modeling**, Progress in Astronautics and Aeronautics, American institute of aeronautics and astronautics, 2005. 210 v.
- [10] TAAMALLAH, S. et al. **Correspondence between ‘stable’ flame macrostructure and thermo-acoustic instability in premixed swirl-stabilized turbulent combustion**, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2015, 137 v.

- [11] PITON, L. **Desenvolvimento de um queimador para o estudo de chamas turbulentas pré-misturadas com swirl**, Trabalho de conclusão de curso, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2017.
- [12] NOBREGA, G. **Estudo da influência do número de swirl sobre a estabilidade da combustão em um queimador pré-misturado**, Trabalho de conclusão de curso, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2018.
- [13] NOBREGA, G. et al. **Experimental study of the effect of the swirl number on premixed combustion regimes and flame topologies**, 11th Mediterranean combustion symposium, Spain, 2019.
- [14] FIGUEIRA DA SILVA, L.F. et al. **Experimental study of a lean premixed turbulent swirling flame stabilization**, 24th ABCM International congress of mechanical engineering, Brazil, 2017.
- [15] PITON, L. et al. **Experimental study of the influence of the swirl number on lean premixed combustion regimes**, 17th Brazilian congress of the thermal sciences and engineering, Brazil, 2018.
- [16] FIGUEIRA DA SILVA, L.F. et al. **Characterization of a lean premixed turbulent swirling combustion regimes using OH planar laser induced fluorescence measurements**, 25th ABCM International congress of mechanical engineering, Brazil, 2019.
- [17] BEER, J. M.; CHIGIER, N. A. **Combustion aerodynamics**, John Wiley Sons, New York, 1972.
- [18] DUROX, D. et al. **Flame dynamics of a variable swirl number system and instability control**, *Combustion and Flame*, 2013, 160 v., 1729–174 p.
- [19] 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*, 2016. 163 v. 494–507 p.