

DESENVOLVIMENTO DE UM QUEIMADOR DE CALIBRAÇÃO PARA ESTUDOS DA COMBUSTÃO

Aluno: Camila Uriarte Peña
Orientador: Luís Fernando Figueira da Silva

Introdução

A combustão é uma ciência que permeia quase todos os setores de uma sociedade, em qualquer parte do mundo, independentemente do grau de desenvolvimento da nação. 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 MME (Ministério de Minas e Energia).

Com o objetivo de maximizar a taxa de conversão de reagentes em produtos, freqüentemente a queima ocorre em escoamentos turbulentos. Dentre os problemas abertos relevantes para este regime de combustão, o estudo da interação entre combustão e turbulência é de fundamental importância para processos industriais da cadeia do refino e que envolvem, em particular, fornos e caldeiras e também para turbinas a gás.

Este estudo requer o desenvolvimento de técnicas de medição capazes de caracterizar os processos físicos e químicos que ocorrem na vizinhança da frente de chama. Nos últimos 10 anos foram desenvolvidas técnicas de medição, baseadas na utilização de luz laser, capazes de caracterizar as distribuições de temperatura, espécies químicas e de fuligem, por exemplo. Entretanto, a aplicação destas técnicas a escoamentos turbulentos requer uma prévia calibração dos equipamentos em situações de escoamento laminar.

Objetivos

Desenvolver e caracterizar um queimador de calibração para realizar estudos experimentais da combustão. Este queimador deverá propiciar um acesso óptico irrestrito à frente de chama, de modo a permitir a realização de medidas de concentração de espécies químicas, temperatura e concentração de partículas de fuligem baseadas em técnicas laser.

Metodologia

Este estudo, que teve início no mês de janeiro de 2008, desenvolve-se segundo cinco fases. A primeira fase consistiu em uma pesquisa bibliográfica visando (i) a familiarização com o processo de combustão e (ii) o levantamento dos tipos de queimadores utilizados para a calibração da medição da concentração das espécies químicas.

A segunda fase será constituída pela construção e montagem do queimador de calibração; a terceira pelo estudo bibliográfico da técnica de fluorescência induzida por plano laser; a quarta pela determinação dos regimes de operação do queimador e a quinta, e última, pela caracterização do radical hidroxila na chama.

A etapa de familiarização envolveu um estudo dirigido baseado em um livro clássico de combustão [1]. Foram estudados temas como: Termoquímica (entalpia, mistura reagentes-produtos, equilíbrio químico e alguns exercícios com o auxílio do software HPFLAME); Fundamentos de Transferência de Massa (taxa de transferência de massa e conservação de espécies); Cinética Química (taxas de reação e alguns mecanismos químicos importantes para a combustão); chamas laminares pré-misturadas e não pré-misturadas (de difusão); entre

outros. Vale frisar que a cada tópico estudado houve oportunidade de debater o assunto a fim de esclarecer eventuais dúvidas.

O estudo da Termodinâmica e da Cinética Química serviu para revisar e fixar definições que há algum tempo não estavam sendo usadas, como o de fração molar (X_i) e fração em massa (Y_i) de i espécies; entalpia (h_{mist}) e entropia (S_{mist}) de uma mistura; 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica e Conservação de Energia; estequiometria – que foi imprescindível na resolução dos exercícios, mesmo tendo feito uso do software HPFLAME; riqueza da mistura (F) – que indica se a mistura é estequiométrica, pobre ou rica em combustível; equilíbrio químico – que fez lembrar da dissociação das espécies principais em inúmeras espécies secundárias, mostrando que os produtos de combustão não são uma simples mistura de produtos ideais, sugerido pelo balanço atômico da estequiometria; energia livre de Gibbs (G).

Além disso, a oportunidade de estudar este livro clássico de combustão inseriu novos conceitos, tais como o de Temperatura de Combustão Adiabática; Transferência de Massa – Lei de Fick da Difusão; difusividade binária (D_{AB}); alguns tópicos ainda não abordados sobre condução de calor; conservação de espécies para uma mistura gasosa binária; taxas de reação elementar; taxas de reação para mecanismos compostos por várias etapas e sua notação compacta; reações de ramificação de cadeia e escalas de tempo químico; reações unimoleculares, bimoleculares e termoleculares.

Foram vistos, ainda, alguns importantes mecanismos químicos: sistema H_2-O_2 ; oxidação do monóxido de carbono; oxidação de parafinas superiores; mecanismos Global e Quasi-Global; combustão do metano; análise de caminhos de reação em baixas temperaturas e formação de óxidos de nitrogênio. Estudou-se, inclusive, análises químicas e térmicas de alguns sistemas reativos como: o reator de massa fixa a pressão constante e o de massa fixa a volume constante, onde foi feito todo um raciocínio sobre as leis de conservação de energia e de massa, hipóteses simplificadoras como a de gás ideal, entalpia, trabalho e concentrações molares. Embora certamente não sejam usados todos os tópicos revisados ou aprendidos, essa primeira etapa de familiarização serviu para mostrar a amplitude e a diversidade existentes por trás da combustão.

Porém, o último capítulo estudado neste livro trabalhou mais densamente a chama em si, tratando especificamente de chamas laminares de difusão. Iniciando a abordagem com o jato laminar não-reativo de densidade constante: foram elucidados pontos como a sua descrição física, as hipóteses simplificadoras utilizadas, a aplicação das leis de conservação de massa, de momento axial e de espécies, as condições de contorno para a resolução das equações, comentários sobre a taxa de espalhamento e o ângulo de espalhamento (que são normalmente usados na caracterização de jatos); descrições teóricas simplificadas e outras soluções variadas (Burke-Schumann, Roper, solução da densidade constante e da densidade variável); enumeração de parâmetros que afetam o comprimento da chama e a estequiometria, tais como taxa de escoamento e geometria dos queimadores, tipo de combustível, aeração primária, quantidade de oxigênio no oxidante, diluição do combustível com gás inerte. Foram lidas também observações sobre formação e destruição de fuligem e, finalmente, sobre chamas em contra-corrente e sua descrição matemática, aplicadas na chama CH_4-Ar .

Já na segunda etapa, dentre os diversos queimadores encontrados na literatura, optou-se pela utilização do queimador tipo Tsuji I [2, 3, 4] por permitir a estabilização de chamas laminares de reagentes pré-misturados ou não. Além disso, este tipo de queimador, que opera em configuração de jatos em contra-corrente, teve sua utilização demonstrada para diversos combustíveis e oxidantes, tais como hidrogênio, *n*-heptano, metanol, ar, oxigênio, etc.

As configurações dos jatos em contra-corrente [2] e do queimador Tsuji I [3] podem ser vistas nas figuras 1 e 2, respectivamente, a seguir:

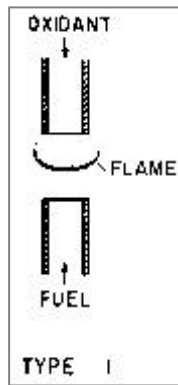


Fig. 1 – Jatos de oxidante e combustível em contra-corrente

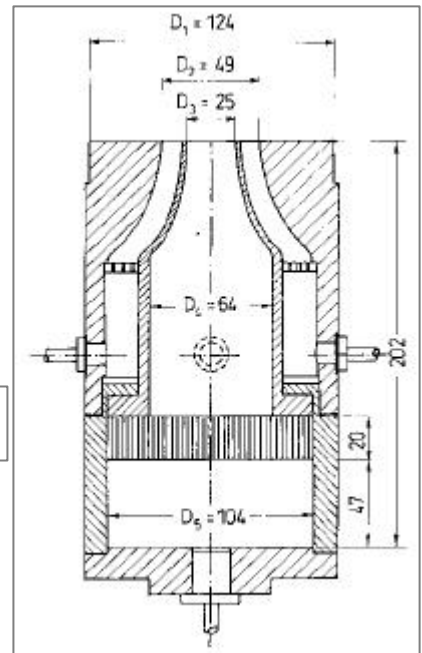


Fig. 2 – Queimador Tsuji tipo I, com dimensões detalhadas em milímetros

No queimador tipo I [3], o gás fornecido (oxigênio ou combustível) para o escoamento principal entra por um tubo central para uma pequena câmara de tranquilização, a qual é preenchida com lã de alumínio, que tem por finalidade estabilizar o escoamento antes que este atravesse uma camada de colméias. Em seguida, o escoamento principal entra na parte reta do bocal, cujo diâmetro é igual a $D_4 = 64\text{mm}$, e é acelerado pela seção convergente do bocal, para alcançar a velocidade de $0,645\text{ m/s}$ na seção de saída, cujo diâmetro é $D_3 = 25\text{mm}$.

A figura 3 mostra a disposição das linhas de alimentação dos queimadores em contra-corrente. Duas linhas de controle distintas existem para fornecer oxigênio e combustível (provenientes de garrafas pressurizadas) para as duas câmaras de tranquilização. Hidrogênio (H_2), metano (CH_4) e propano (C_3H_8) são usualmente empregados como combustíveis. Nitrogênio comprimido também encontra-se disponível, em garrafas, para diluir seja o oxigênio, seja o combustível [3].

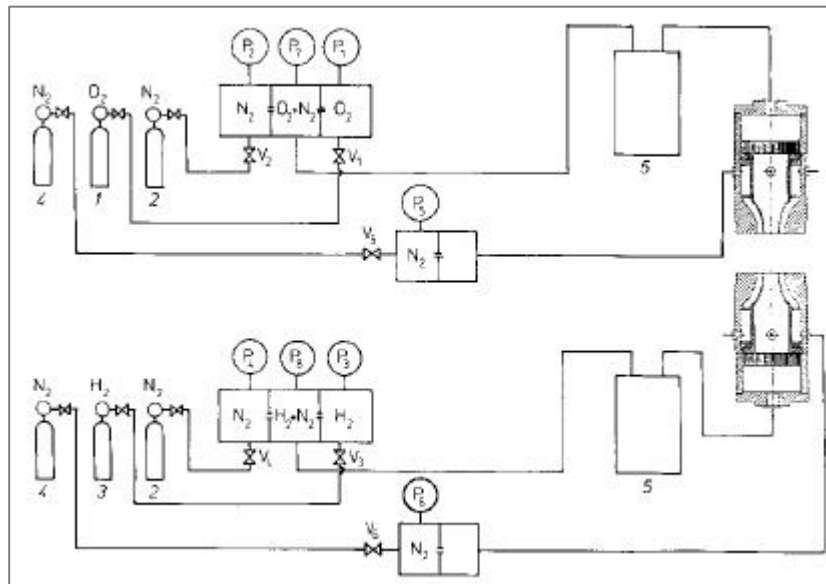


Fig. 3 – Linhas de abastecimento de: (1) oxigênio; (2 e 4) nitrogênio; (3) combustível

Pode ainda ser realizado um escoamento protetor de nitrogênio, o qual entra no queimador por meio de quatro linhas de abastecimento, localizadas circunferencialmente em volta do queimador. As correntes de nitrogênio isolam do ambiente as duas correntes reativas visando prevenir reações químicas entre elas e o ar do laboratório, além de reduzir a influência das perturbações externas sobre o processo de combustão [4].

Como pode ser visto na figura 4, a mistura de hidrogênio-nitrogênio é injetada na parte superior (do queimador tipo Tsuji I), enquanto que a mistura de oxigênio-nitrogênio é injetada no inferior. Ambos os escoamentos são laminarizados ao passar por colméias e bilhas de vidro. Em seguida, bocais convergentes são responsáveis pela aceleração, garantindo também uma pequena distorção da evolução da velocidade ao longo do diâmetro na seção de saída. Os escoamentos de combustível e de oxidante possuem a mesma velocidade na saída dos bocais [4].

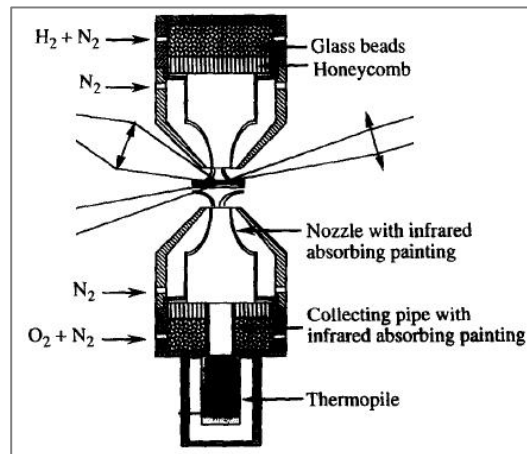


Fig. 4 – Corrente de nitrogênio protege os escoamentos de hidrogênio-nitrogênio e de oxigênio-nitrogênio

Uma das principais vantagens deste tipo de configuração é permitir a geração de um escoamento laminar na saída do queimador. Para realizar o projeto deste aparato foi necessário entender os mecanismos de controle e diminuição de turbulência. Assim, foram estudados tópicos como: uso da seção de contração (ou bocal) [5, 8] e as aplicações de colméias e de telas em túneis de vento [6, 7].

A seção de contração do bocal serve para diversos propósitos: (i) aumentar a velocidade média do escoamento em um fator de 20 ou mais (valores típicos situam-se no intervalo de 6 a 10) entre a câmara de tranquilização e a seção de teste do túnel de vento (isto é, a saída do bocal); (ii) reduzir as não-uniformidades do escoamento, resultando em uma distribuição uniforme de velocidade na entrada da seção de teste; (iii) reduzir o nível de turbulência do escoamento e (iv) reduzir as cargas e perdas dinâmicas, o que normalmente é obtido mediante ao uso de telas e/ou colméias (as quais acarretam a redução da pressão dinâmica na câmara de tranquilização) [8].

O parâmetro mais importante que governa a ordem de grandeza dos diversos efeitos enumerados acima é a razão de contração de área do bocal (CR). Uma vez que o valor de CR é fixado, dois outros parâmetros devem ser determinados: a forma do contorno e o comprimento do bocal, que controlam a uniformidade da distribuição de velocidade na saída do bocal, e o desenvolvimento da camada limite.

Note-se que, em contrações de comprimento finito, a velocidade na parede do bocal não aumenta monotonicamente, mas exibe um mínimo local perto da entrada e um máximo local perto da saída [8]. Assim, a escolha da forma da seção convergente do bocal influencia a uniformidade do escoamento na seção de saída.

Devido à existência de um máximo de pressão ao longo da parede na vizinhança da saída do bocal, duas regiões de gradiente de pressão adverso existem ao longo da mesma, o que acarreta a possibilidade de separação do escoamento. Cabe ressaltar que mesmo separações localizadas causam espessamento da camada limite, e que separações em grande escala podem produzir instabilidade no escoamento, sendo ambos os efeitos não desejáveis.

Tendo sido estabelecida a razão de contração (CR), os fatores que governam o projeto da seção de contração do túnel de vento, em resumo, são: (i) uniformidade do escoamento na saída; (ii) separação; (iii) espessura da camada limite e (iv) espaço/custo. No presente caso, que envolve o projeto de seções de dimensões relativamente pequenas, os dois primeiros critérios são os mais importantes. São também essenciais no projeto o comprimento (L) da seção de contração e o número de Reynolds (Re) do escoamento, o qual é baseado no diâmetro saída. Um método utilizado para o projeto da seção de contração é voltado para a prevenção da separação do escoamento e para uma distribuição de velocidade com não-uniformidade dada por:

$$\bar{u}_2 \equiv (V - U_c)_2 / U_{2,\infty}$$

Equação 1

onde u_2 é a não-uniformidade na saída; V é a velocidade na parede; U_c é a velocidade na linha de centro; $U_{2,\infty}$ é a velocidade a montante e a jusante, e o índice 2 indica o plano de saída do bocal.

A forma cúbica que será utilizada para descrever o contorno da parede com apenas um parâmetro de controle consiste em duas curvas que se unem em ponto situado a uma distância x_m da entrada da seção de contração. Estudos numéricos mostram que, para este tipo de forma do contorno de parede, as únicas informações necessárias sobre o escoamento são os dois coeficientes de pressão na parede (para $CR = 4$), definidos como:

$$C_{pe} \equiv 1 - (U_{2,\infty} / V_e)^2$$

$$C_{pi} \equiv 1 - (V_i / U_{1,\infty})^2$$

Equações 2 e 3

onde o índice 1 denota o plano de entrada do bocal; o índice e refere-se ao ponto de velocidade máxima da parede, enquanto que o índice i refere-se ao ponto de velocidade mínima da parede. Esta importante simplificação é devida ao fato de que as distribuições de pressão na parede exibem similaridades e que os gradientes de pressão são funções muito semelhantes a dos C_p 's. Logo, o problema do projetista se reduz à determinação, a priori, destes coeficientes. A figura 5 mostra um esquema do contorno da parede constituído por duas curvas cúbicas, dadas pelas equações 4 e 5.

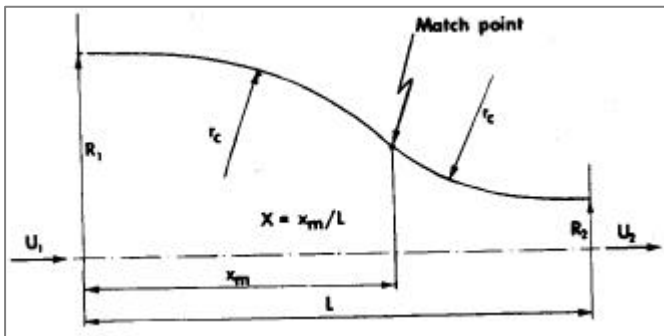


Fig. 5 – Representação esquemática do contorno da parede gerado pelo encontro de duas curvas cúbicas

$$f = 1 - \frac{1}{X^2} \frac{x^3}{L}; x/L \leq X$$

Equação 4

$$f = \frac{1}{(1 - X)^2} \left(1 - \frac{x^3}{L} \right); x/L > X$$

Equação 5

A forma mais adequada do contorno, deve considerar a aplicação à qual se destina o bocal para, assim, chegar aos valores mais adequados para C_{pe} e C_{pi} . Em relação a u_2 , deve ser estipulado o seu valor máximo aceitável levando-se em consideração o seu rápido decaimento na seção de teste do túnel de vento [8]. É interessante observar que a não-uniformidade está relacionada apenas ao coeficiente de pressão C_{pe} .

O único critério para a escolha do C_{pi} é aquele que consiste em evitar a ocorrência de separação perto da entrada, enquanto que para a escolha do C_{pe} estaria relacionada com a seleção do valor desejável da não-uniformidade. Logo, uma vez escolhidos os valores dos coeficientes de pressão, a localização do ponto de encontro das cúbicas $X = x_m/L$ e L/D_1 (L é o comprimento do bocal e D_1 é o diâmetro de entrada) podem ser obtidos através da figura 6 [8]:

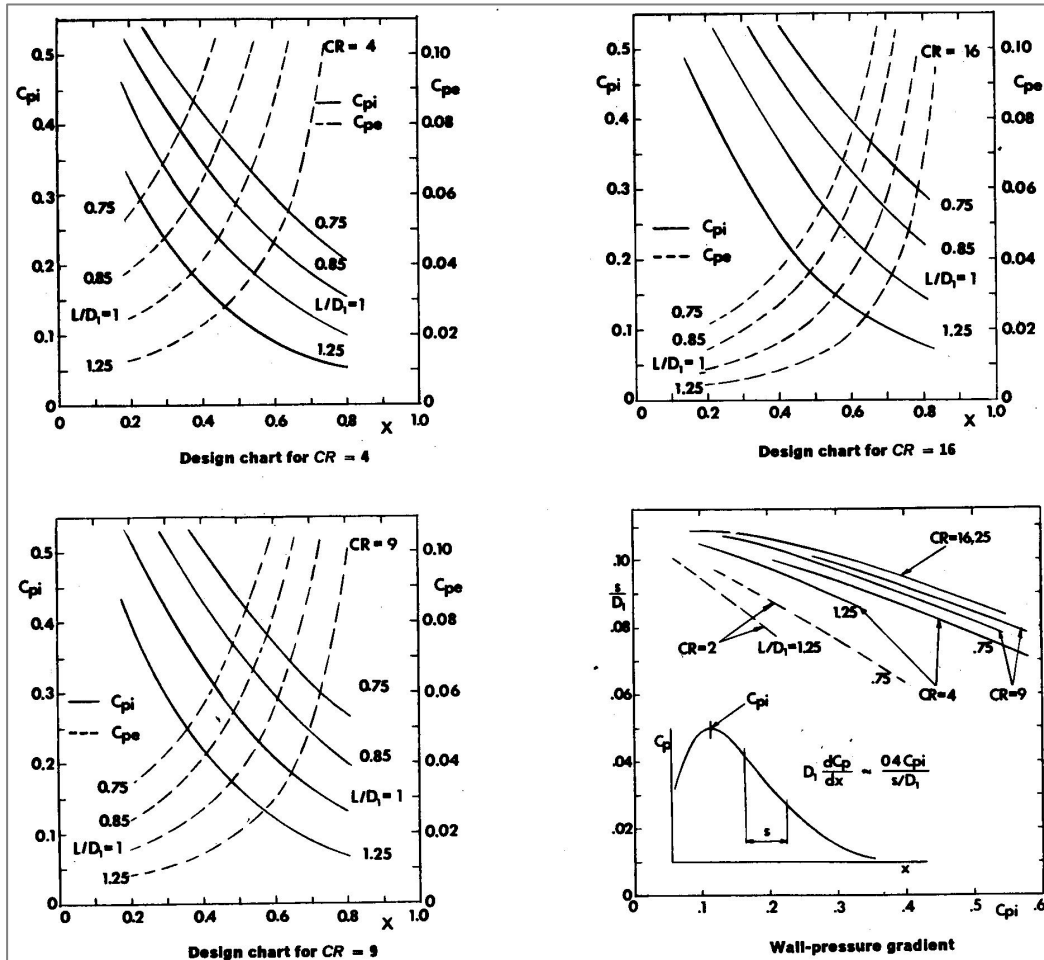


Fig. 6 – Coeficientes de pressão como função da abscissa de encontro das curvas cúbicas para diversos valores do coeficiente de pressão

A figura 6 mostra que os coeficientes C_{pi} e C_{pe} variam rapidamente com a razão L/D_1 de forma que, em um intervalo relativamente pequeno $0,75 = L/D_1 = 1,25$, encontra-se a maior parte dos bocais de túneis de vento de interesse prático. Há ainda algumas restrições: $C_{pi} > 0,1$; $C_{pe} < 0,1$; $2 = CR = 25$ e $0,2 = X = 0,8$.

O bocal é normalmente precedido pela câmara de tranquilização, que contém as telas e colméias. Estas são usualmente feitas de fios metálicos entrelaçados que formam malhas quadradas ou retangulares. As telas usadas em túneis de vento fazem com que a velocidade do escoamento torne-se mais uniforme por imporem uma queda de pressão estática proporcional ao quadrado da velocidade. Além disso, as telas, assim como as contrações, reduzem a componente longitudinal da turbulência ou a variação média da velocidade. De modo geral, para reduzir a componente lateral da velocidade média as colméias são mais eficientes. Colméias produzem turbulência, que decai muito lentamente em comparação àquela gerada por telas. A maioria dos túneis de vento mais modernos faz uso de ambas, telas e colméias, visto que estudos demonstraram que apenas o uso de colméias e uma razão de contração pequena implica na existência de elevados níveis de turbulência na seção de teste, muito

embora o escoamento médio seja satisfatório [9]. Assim, o uso de colméia com tela a jusante é uma combinação interessante para a redução da turbulência [6].



Fig. 7 – Colméia usada em túnel de vento



Fig. 8 – Telas usadas em túnel de vento

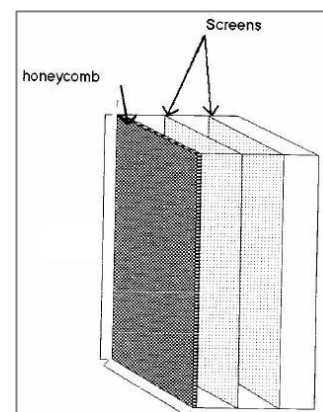


Fig. 9 – Uso combinado de colméia e de telas

Estudos sugerem que um desempenho ótimo na redução da turbulência de ‘corrente livre’ em túneis de vento e de água é alcançada por meio de combinações de colméias e telas, sendo a primeira tela posicionada imediatamente a jusante da colméia. O comprimento da colméia deve ser o menor possível, baseado em considerações estruturais e de projeto, respeitado $l/M = 10$, sendo l o comprimento da colméia e M tamanho da malha da colméia [7].

O dimensionamento da seção de contração do experimento encontra-se em fase final, que levará à determinação da forma ótima de contração que será construída. Uma vez que esta seção de contração será alimentada com combustível e/ou com oxidante, a etapa seguinte consiste no projeto do sistema de alimentação e de medição de vazão dos reagentes.

A determinação dos medidores de vazão mais adequados para a realização do experimento parte da existência de cinco modelos de rotâmetros a base de flutuador existentes no Laboratório de Combustão e Turbulência do DEM/PUC-Rio. Para este fim, foi realizada, primeiramente, uma estimativa da vazão volumétrica do oxidante (ar ou oxigênio) e dos possíveis combustíveis (nitrogênio e hidrogênio), levando-se em conta que a velocidade de saída do bocal desejada é igual a 0,645 m/s e que o diâmetro de saída é $D_3 = 25\text{mm}$ [3], chegando-se ao valor de vazão volumétrica $Q=1,06\text{ m}^3/\text{h}$.

Em seguida, verifica-se a adequação dos medidores de vazão disponíveis no laboratório a trabalhar neste valor máximo de vazão, fazendo uso da tabela dos rotâmetros, na qual constam suas especificações, e determinando-se os fatores de correção relativos à mudança da pressão, da temperatura e do peso específico para cada um dos rotâmetros:

ROTÂMETROS A BASE DE FLUTUADOR					
	Número de série	Modelo	Temperatura de calibração	Pressão	Escala
A	174.564	3P5-0401V01	GNV @ 20°C	2 Bar	0 - 0,80 NM ³ /H
B	182.301		GNV @ 25°C	1 Bar	0 - 0,80 NM ³ /H
C	182.302		GNV @ 25°C	1 Bar	0 - 1,60 NM ³ /H
D	- 182.303		GNV @ 25°C	1 Bar	0 - 2,50 NM ³ /H
E	182.304		GNV @ 25°C	1 Bar	0 - 3,50 NM ³ /H

Tabela 1 – Especificações dos rotâmetros

Fator 1: Correção da pressão

$$F1 = \sqrt{\frac{P1_{abs.}}{P0_{abs.}}}$$

Fator 2: Correção da temperatura

$$F2 = \sqrt{\frac{T0_{abs.}}{T1_{abs.}}}$$

Fator 3: Correção do peso específico

$$F3 = \sqrt{\frac{g0c.}{g1c.}}$$

Equações 6, 7 e 8

Das equações 6, 7 e 8, temos:

P0 abs. = pressão absoluta do gás nas condições de calibração;

P1 abs. = pressão absoluta do gás nas condições de serviço;

T0 abs. = temperatura absoluta do gás nas condições de calibração;

T1 abs. = temperatura absoluta do gás nas condições de serviço;

ρ_{0c} = peso específico do gás (relativo ao ar) de calibração nas condições normais;

ρ_{1c} = peso específico do gás (relativo ao ar) de medição nas condições normais;

No caso das vazões do nitrogênio, oxigênio, hidrogênio e ar foram obtidos os seguintes resultados:

RESULTADOS DAS VAZÕES REAIS DOS ROTÂMETROS [m³/h]				
ROTÂMETRO	NITROGÊNIO (N₂)	OXIGÊNIO (O₂)	HIDROGÊNIO (H₂)	AR
A	0,435	0,407	1,623	0,428
B	0,615	0,575	2,295	0,605
C	1,230	1,150	4,590	1,210
D	1,923	1,798	7,173	1,890
E	2,692	2,517	10,042	2,646

Assim, pode ser concluído que, para os escoamentos de N₂, de O₂ e de ar os rotâmetros adequados seriam C ou D; e já para H₂ todos poderiam ser usados, sendo o rotâmetro A o de melhor precisão para essa situação.

Conclusões

O desenvolvimento exposto neste relatório é parte essencial do projeto do aparato experimental que será construído ao longo do segundo semestre do ano de 2008. O estudo da forma mais adequada do contorno da seção de contração do túnel de vento será finalizado ainda no mês de agosto. Em seguida, será determinada a configuração mais adequada de grades de tranquilização do escoamento. Além disso, procedeu-se à escolha de medidores de vazão capazes de operar na faixa selecionada para combustão de hidrogênio e de ar. Por fim, será realizado um desenho de engenharia do conjunto, que permitirá o início da construção do aparato experimental

Durante a construção do experimento, será realizado um estudo bibliográfico cuja a meta é a familiarização com a técnica de medição de espécies químicas por fluorescência induzida por plano laser (PLIF). Uma vez concluída a construção do queimador e sua montagem no Laboratório de Combustão e Turbulência do DEM/PUC-Rio, serão realizados ensaios visando determinar os diferentes regimes de operação deste queimador. Por fim, medições da concentração do radical OH (hidroxila) serão realizadas utilizando-se a técnica de fluorescência induzida por plano laser (PLIF) em situações representativas dos diversos regimes de funcionamento do queimador.

Referências

- 1 – TURNS, S. R. **An Introduction to Combustion: Concepts and Applications**. 2.ed. McGraw-Hill, 2000.
- 2 – TSUJI, H. Counterflow Diffusion Flames. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 8, p. 93-119, 1982.

- 3 – ROLON, J. C., VEYNANTE, D., MARTIN, J. P. Counter Jet Stagnation Flows. **Experiments in Fluids**, v. 11, p. 313-324, 1991.
- 4 – DAGUSE, T., CROONENBROEK, T., ROLON, J. C., DARABIHA, N., SOUFIANI, A. Study of Radiative Effects on Laminar Counterflow $H_2 / O_2 / N_2$ Diffusion Flames. **Combustion and Flame**, v. 106, p. 271-287, 1996.
- 5 – BARLOW, J. B., RAE JR., W. H., POPE, A. **Low-Speed Wind Tunnel Testing**. 3.ed. New York: A Wiley-Interscience Publication, 1999.
- 6 – SCHEIMAN, J., BROOKS, J. D. Comparison of Experimental and Theoretical Turbulence Reduction from Screens, Honeycomb, and Honeycomb-Screen Combinations. **Journal of Aircraft**, v. 18, n. 8, p. 638-643, 1981.
- 7 – LOEHRKE, R. I., NAGIB, H. M Control of Free-Stream Turbulence by Means of Honeycombs: A Balance Between Suppression and Generation. TRANSACTIONS OF THE ASME. **Journal of Fluids Engineering**, p. 342-353, set. 1976.
- 8 – MOREL, T. Comprehensive Design of Axisymmetric Wind Tunnel Contractions. TRANSACTIONS OF THE ASME. **Journal of Fluids Engineering**, p. 225-233, jun. 1975.
- 9 – BRADSHAW, P., MEHTA, R. Wind Tunnel Design. Disponível em: <http://navier.stanford.edu/bradshaw/tunnel/>. Acesso em: 17 de maio de 2008.