

1 Introdução

Até 1998 o gás natural teve uma participação coadjuvante na matriz energética brasileira, respondendo por apenas 2,7% do total de energia gerada. O recente aumento do seu consumo foi fomentado pela importação a partir de países vizinhos (Argentina, Bolívia), e pela descoberta de novas reservas nacionais, as quais atingiram um total 588,6 bilhões de m³ em 2006 [1]. Além disto, há perspectiva de importação de gás natural do Peru e, de acordo com a projeção de dados de consumo, a participação do gás natural sairá de 9,6% em 2006 para cerca de 12% em 2010 [1].

O uso deste energético em substituição ao óleo combustível acarreta melhorias em termos de eficiência energética e de qualidade do meio ambiente, uma vez que os produtos de combustão do gás natural são os mais limpos dentre os combustíveis fósseis.

Após a aplicação das novas diretrizes energéticas do Brasil, o gás natural está sendo utilizado também para geração de energia elétrica em 49 novas termelétricas que foram construídas em todo o país, a maioria das quais é operada com gás natural. Com a inauguração do Gasbol (Gasoduto entre a Bolívia e o Brasil, cujo comprimento é de 3150 km) em 1999, o Brasil interligou os estados do Centro-Oeste, Sudeste e Sul, implementando um passo decisivo no suprimento de energia para as regiões mais industrializadas do país. O Brasil busca assim uma alternativa mais eficiente para processos de combustão industrial. Desde então, grandes quantidades de gás natural foram empregados em diferentes segmentos da indústria, como refinarias, metalúrgica, cerâmica e têxtil. A combustão em escoamento turbulento é o processo básico comum a todas estas aplicações industriais, pois pode ser encontrada em turbinas a gás, motores diesel, queimadores, motores de ignição por centelha e fornalhas.

Simulações numéricas, tais como aquelas possibilitadas pela utilização da técnica de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), permitem investigar estas configurações de interesse prático com custo relativamente reduzido, quando comparado com estudos experimentais. Porém, ainda hoje a simulação completa de escoamentos turbulentos reativos que envolva todos os fenômenos físicos e químicos e números de Reynolds representativos de tais situações

encontra-se além da capacidade computacional disponível [2]. Entretanto, mediante a utilização de modelos adequados dos processos turbulentos e da combustão, é possível realizar a análise e o projeto de sistemas práticos que utilizam processos de combustão [3].

No entanto, antes de aplicar os modelos em situações de engenharia, seu desenvolvimento e validação devem ser realizados utilizando-se configurações geométricas simples, porém representativas destas situações.

A caracterização detalhada da interação entre combustão e turbulência, tema de estudos atuais, é objeto de investigação no DEM/PUC – Rio [4]. Medições detalhadas do campo aerodinâmico permitem a criação de um banco de dados para o desenvolvimento e validação de modelos de combustão em escoamento turbulento.

O presente trabalho tem por objetivo estudar, numérica e experimentalmente, uma chama turbulenta não prémisturada de configuração geométrica simples. Esta chama encontra-se estabilizada em um queimador tipo obstáculo (Bluff Body) e queima gás natural e ar. Na figura 1.1 mostra-se um esquema das principais características do queimador tipo obstáculo utilizado neste estudo. A configuração geométrica simples deste tipo de queimador facilita o trabalho de modelagem computacional. Outra vantagem deste queimador é de permitir amplo acesso ótico, facilitando assim a caracterização detalhada do escoamento mediante uso de técnicas baseadas em laser.

A estrutura da chama turbulenta dominada pelo jato de combustível, estabilizada sobre este tipo de queimador pode ser dividida em três regiões, de montante a jusante [5]:

- Uma região próxima ao obstáculo (estagnação) onde ocorre a recirculação dos gases. Esta região apresenta, normalmente, dois vórtices, um externo e outro interno. Geralmente o vórtice externo possui composição química praticamente uniforme na vizinhança da base do queimador. O vórtice interno, que se encontra estabilizado na interface entre o jato de combustível e a camada de cisalhamento turbulento, é de menor dimensão e é caracterizado por uma mistura rica em combustível e não uniforme. Com o incremento da velocidade do jato de combustível ou da velocidade do ar anular, o jato é expandido e translada-se a jusante o núcleo do vórtice interno, até que ocorre sua incorporação pelo jato central. Esta região próxima ao obstáculo é a responsável pela estabilização da combustão.
- Uma região estreita de mistura intensa, denominada de zona de

garganta, onde podem ocorrer as extinções locais da frente de chama quando a velocidade do jato de combustível é suficientemente alta.

- Uma região de propagação livre do jato na qual, para velocidades do jato suficientemente altas, pode ocorrer a re-ignição da combustão de modo similar ao encontrado em chamas tipo jato estabilizadas com pilotos.

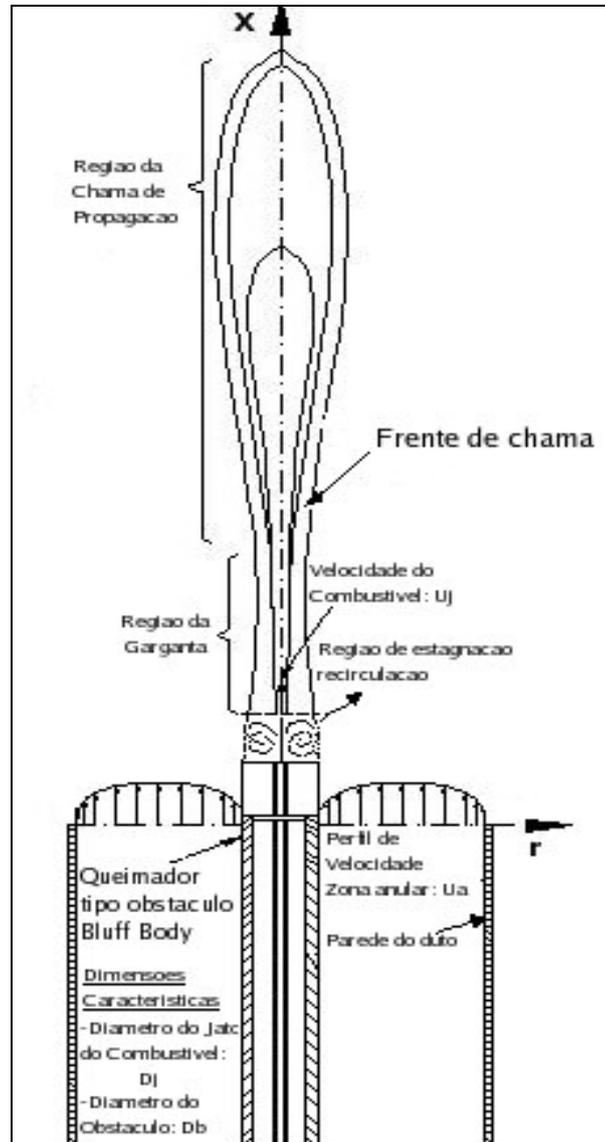


Figura 1.1 Esquema do queimador tipo obstáculo (Bluff Body) com uma chama turbulenta livre.

A região de recirculação estabilizada na vizinhança do queimador propicia um acréscimo local do tempo de residência dos gases queimados. Quando este se torna superior ao tempo característico da combustão, o ancoramento da chama é possível.

Este tipo de queimador, que é representativo de configurações utilizadas em fornos e caldeiras industriais, pode ser facilmente modificado para utilização

de outros tipos de combustíveis. Além disto, também pode ser projetado para operar a potências mais elevadas, típicas de aplicações práticas.

A figura 1.2 mostra uma imagem do funcionamento do queimador tipo obstáculo do DEM/PUC - Rio, antes das modificações desenvolvidas durante o presente trabalho. Nesta figura, onde pode ser observada a chama turbulenta obtida para um número de Reynolds do jato de combustível (GNV) de 7235, as flutuações turbulentas da chama são claramente visíveis.



Figura 1.2 Fotografia do queimador tipo obstáculo operando em regime turbulento de combustão com número de Reynolds do GNV de 7235. [4]

Para a presente caracterização da estrutura do escoamento reativo, foram realizadas modificações da instalação experimental existente no Departamento de Engenharia Mecânica/PUC - Rio [4], a qual fora empregada para a caracterização detalhada do escoamento, na ausência de reação química, utilizando-se as técnicas de Velocimetria por imagem de partículas (PIV) e Velocimetria Doppler laser (LDV). As modificações realizadas têm por finalidade alcançar números de Reynolds turbulentos maiores do que os anteriormente utilizados e melhorar a uniformidade do escoamento de ar. Com o objetivo de aumentar a velocidade média do ar anular, o que permite alcançar maiores valores do número de Reynolds turbulento, também foi utilizado um novo ventilador de ar. Uma caixa tranqüilizadora foi projetada e construída, para ser obter um campo de velocidade anular uniforme.

Foi projetado e construído um novo corpo central para garantir um alinhamento mais estável e rígido do obstáculo, o que não era possível com o existente. Além disso, o diâmetro de saída do jato central foi aumentado de 2 mm para 7,1 mm, a fim de torná-lo suficientemente maior do que a espessura característica do plano laser (0,1mm).

Estas modificações serão detalhadas no corpo deste trabalho.

O estudo numérico foi realizado empregando-se metodologia de dinâmica dos fluidos computacional e a ferramenta ANSYS CFX. Este estudo foi dividido em duas etapas. Na primeira compararam-se os resultados obtidos usando três modelos de turbulência e dois modelos de combustão com os dados experimentais disponíveis na literatura. O conjunto de modelos que apresentou o melhor desempenho foi selecionado para então na segunda etapa, comparar os resultados numéricos com aqueles obtidos com o presente aparato.

A técnica de medição empregada, fluorescência induzida por plano laser (PLIF) é destinada a caracterizar a presença de uma espécie química presente durante o processo de combustão, no caso, o radical hidroxila (OH).

O presente trabalho é dividido em seis capítulos:

No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica dos trabalhos experimentais e de modelagem computacional das chamas estabilizadas não pré-misturadas.

No terceiro capítulo introduzem-se brevemente as técnicas utilizadas para a modelagem do escoamento turbulento e a metodologia numérica usada.

No quarto capítulo são descritas as modificações realizadas na instalação do queimador estudado. Neste capítulo também é discutido o funcionamento da técnica ótica usada, a Fluorescência induzida por plano laser (PLIF).

No quinto capítulo são apresentados e discutidos os principais resultados experimentais e numéricos obtidos. Descrevem-se inicialmente os regimes de operação do queimador com combustão e a estrutura do escoamento reativo. A seguir, são comparados os resultados das distribuições de velocidade nas direções longitudinal e transversal, em diferentes regiões de interesse. Esta comparação é efetuada com resultados experimentais existentes na literatura. Os resultados obtidos da fluorescência do radical OH são discutidos para os diferentes regimes de combustão do queimador e comparados com os resultados da modelagem.

Finalmente, no sexto capítulo se apresentam as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.