

1 Introdução

Todas as atividades humanas requerem o uso de algum tipo de energia para sua realização e uma das formas mais usuais de geração de energia é a queima de combustíveis fósseis. A combustão é a principal fonte de energia para o transporte marinho, terrestre ou aéreo, assim como para a geração de energia elétrica nas centrais térmicas. No século passado eventos, como a crise energética mundial, e problemas, como a poluição atmosférica e aquecimento global, incentivaram a busca de um melhor entendimento dos processos envolvidos nos fenômenos de combustão. A finalidade desta busca é obter a maior eficiência energética acompanhada de baixas emissões de gases nocivos, como por exemplo, aqueles responsáveis pelo efeito estufa. Num motor de combustão interna, por exemplo, os níveis de emissão podem ser reduzidos mediante a melhora da atomização do combustível e da qualidade da mistura ar – combustível [1]. Muitos aspectos da combustão ainda não são totalmente entendidos. Dentre estes, podem ser citados a complexidade das reações químicas, os fenômenos de transporte envolvidos ou a interação da turbulência com a combustão. Esta complexidade tem norteado estudos do processo de combustão aplicados a sistemas de interesse da engenharia.

O esgotamento dos combustíveis fósseis não renováveis, e sua contribuição para a poluição ambiental motivaram a busca de combustíveis alternativos e a colocação em prática de rigorosos padrões de redução da emissão de poluentes. Combustíveis alternativos como o biodiesel, hidrogênio e, em particular, o etanol veem sendo estudados e usados devido à menor emissão de poluentes como o dióxido de carbono e o óxido nítrico, que são os principais contribuintes para o efeito estufa. Por exemplo, um automóvel utilizando gasolina libera $2,2 \text{ kg } CO_2/l$ para a atmosfera, enquanto que utilizando etanol libera $1,3 \text{ kg } CO_2/l$ [2], e a queda dos níveis de emissões é considerável. Além disso, os excessos de dióxido de carbono liberado pela queima do etanol ou do biodiesel

proveem da fixação do carbono durante o processo das culturas agrícolas, o que contribui apenas moderadamente para incremento global do nível de CO_2 .

Nos dispositivos práticos, a presença de grandes quantidades de ar/combustível pré-misturadas é evitada por razões de segurança. Entretanto, durante o processo de combustão é preciso misturar os reagentes rapidamente para garantir a queima. Nas aplicações industriais, é utilizada principalmente a combustão não pré-misturada de escoamentos turbulentos, pois: (i) a turbulência favorece o processo de mistura oxidante/combustível, o que melhora o processo de combustão; (ii) a combustão libera calor que a sua vez gera instabilidade do escoamento durante a expansão do gás, o que favorece a transição para a turbulência [3]. No entanto, o estudo das chamas turbulentas apresenta muitos desafios, pois envolve um acoplamento complexo da dinâmica de fluidos com a cinética química, sobre amplas faixas de escalas espaciais e temporais. Esta interação entre turbulência e a química influencia a estrutura e a estabilidade das chamas, o progresso da reação e as relações entre as concentrações das espécies químicas e a formação de poluentes [4]. Por esta razão é preciso desenvolver conhecimento da aerodinâmica das chamas e como esta controla a mistura dos reagentes e as reações químicas.

Idealmente, em um estudo experimental de chamas turbulentas, a velocidade e as quantidades escalares, incluindo temperatura e concentrações das espécies químicas, deveriam ser medidas simultaneamente, com adequada resolução temporal e espacial [5]. As técnicas de medição mediante diagnóstico laser são amplamente utilizadas na combustão, pois fornecem medições com alta taxa de aquisição temporal, boa resolução espacial, e não são intrusivas, pois não interferem nos fenômenos envolvidos na combustão. Embora os sistemas industriais combinem vários fenômenos físicos complexos acoplados, a adequada compreensão destes fenômenos requer que os mais relevantes sejam tratados separadamente, ou de forma simplificada, antes que o problema completo possa ser abordado [4]. É por isso que nos estudos fundamentais da combustão são utilizados dispositivos queimadores com configurações geométricas simples.

Bray [6] apresentou os principais desafios envolvidos no estudo da combustão turbulenta. Os equipamentos de combustão na indústria combinam vários fenômenos complexos que dificulta o estudo de um fenômeno físico em particular. Neste contexto, os experimentos devem ser projetados para identificar

aspectos específicos, por exemplo, da interação entre a transformação química e a turbulência. Estes experimentos devem permitir a variação controlada dos parâmetros relevantes a fim de garantir a correta identificação dos fenômenos físico-químicos importantes. Outro requisito diz respeito à sua utilidade para o desenvolvimento de modelos computacionais. Dentre as características relevantes destes experimentos, destacam-se (i) Amplo acesso óptico, para permitir a aplicação de diagnósticos laser, (ii) As condições de contorno devem ser totalmente conhecidas e com exatidão suficiente, (iii) Controle e medição adequadas da vazão adequada. No caso particular dos motores de combustão interna utilizando combustível no estado líquido, é possível estudar diferentes propriedades do spray utilizando técnicas ópticas não intrusivas a fim de desenvolver uma melhor compreensão das suas características e de sua influência na combustão [1]. Dentre as propriedades macroscópicas importantes destacam-se o ângulo de cone e comprimento de penetração do spray. No que diz respeito aos parâmetros microscópicos é interessante medir os diâmetros de gotas, campos de escalares e de velocidade.

A combustão de combustíveis líquidos implica quase sempre na formação de um spray, sua atomização e a posterior queima. A atomização do combustível antes da zona de combustão é crítica para a eficiência ao promover uma melhor evaporação e combustão, gerando uma alta razão entre a superfície de contato e o volume das gotas de combustível. Tipicamente um spray é produzido num atomizador, pelo escoamento de um líquido pressurizado. Quando as forças aerodinâmicas vencem a tensão superficial, ocorre quebra do líquido em gotas. A distribuição de gotas ao longo do atomizador é determinada pelas propriedades do fluido, as condições de injeção e os efeitos aerodinâmicos. Medições das distribuições das propriedades do spray são necessárias para a compreensão do processo de atomização e para a posterior validação de modelos teóricos. O ângulo do spray, a profundidade de penetração, o tamanho de gota, a velocidade, a vazão mássica, a temperatura e a distribuição de gotas, entre outros; são propriedades de interesse para sua medição [7]. As medições das propriedades do spray devem ser feitas sem perturbar a região de atomização, então, técnicas não intrusivas são desejáveis. Os métodos de análise direta de imagem são de fácil interpretação e independem da forma e composição das gotas. Estas técnicas podem capturar a distribuições de gotas no espaço, visualizar os ligamentos e a

formação de gotas. Entre as diferentes técnicas de imagens diretas, se destaca a técnica “Shadowgraphy”, por ser poderosa e econômica. Nesta técnica se capturam imagens das sombras das gotas, com alta magnificação, mediante um microscópio de longa distância e iluminação traseira.

Os resultados obtidos neste trabalho permitirão um melhor entendimento da combustão em escoamentos turbulentos, assim como o desenvolvimento a termo de novos modelos numéricos. A caracterização detalhada da interação entre turbulência e cinética química dos processos de combustão é um dos principais objetivos de pesquisa atual no Laboratório de Combustão e Turbulência do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC – Rio, onde já foram feitos diversos estudos experimentais e numéricos [8,9,10,11].

Poucos estudos sobre chamas turbulentas utilizando etanol são encontrados na literatura. Nesse sentido, este trabalho propõe a realização de um estudo experimental do comportamento de chamas de etanol tipo spray mediante o diagnóstico laser. As técnicas de medição que serão empregadas são: (i) a técnica de PLIF-OH, destinada a caracterizar a presença do radical hidroxila durante o processo de combustão, este radical caracteriza a zona de reação da combustão; (ii) a técnica Estereográfica de Velocidade por Imagens de Partículas (estéreo PIV), utilizada para medir o campo de velocidades do ar e (PIV) para as gotas; (iii) a técnica “Shadowgraphy”, destinada principalmente à medição da distribuição de diâmetros de gotas e sua velocidade.

Este trabalho é parte do projeto CAPES PRÓ-ENGENHARIAS “ESTUDO COMPUTACIONAL E EXPERIMENTAL DE CHAMAS TURBULENTAS DE ETANOL”, coordenado pelo Professor Guenther Carlos Krieger Filho (USP) e com a participação da UFSC e da UFRGS.

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem por objetivo geral o estudo experimental de chamas turbulentas não pré-misturadas de spray de etanol e de ar. Estas chamas são estabilizadas em um queimador tipo *obstáculo* de configuração geométrica simples. Mais especificamente, trata-se de aplicar técnicas de diagnóstico laser para: (i) mapear o frente de chama mediante a fluorescência do radical OH; (ii) obter o campo de velocidades do ar; (iii) obter a distribuição dos diâmetros de

gota e sua velocidade; (iv) obter o campo de velocidade de gotas do spray. Outro objetivo deste trabalho é contribuir para criar um banco de dados experimentais destinado ao desenvolvimento e a validação de modelos computacionais.

1.2

Organização do manuscrito

O presente trabalho é organizado em cinco capítulos e um apêndice. No primeiro capítulo foram apresentados o tema da dissertação, seus objetivos e estrutura. No capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica, mostrando trabalhos que serviram como referências para este estudo, dando principal ênfase à técnica “Shadowgraphy” aplicada a sprays. No capítulo 3 são apresentados brevemente os fundamentos das técnicas laser empregadas nos experimentos. Um tratamento mais amplo é dado para “Shadowgraphy”, por ser uma técnica que pela primeira vez foi empregada no Laboratório de Combustão e Turbulência da PUC-Rio. Descreve-se também a montagem experimental, o atomizador e a geometria do queimador utilizado. O capítulo 4 apresenta os principais resultados dos experimentos para condições quimicamente inertes e reativas. Finalmente o capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas.