1. Introdução

Influências importantes das aplicações dos processos de combustão são encontradas em diferentes setores econômicos. A combustão em escoamentos turbulentos é um processo básico comum à diversos dispositivos industriais, tais como turbinas a gás, motores diesel, motores de ignição por centelha, queimadores e fornalhas. Alguns aspectos específicos dos processos de combustão que devem ser compreendidos para garantir o funcionamento destes sistemas são: (i) formação e combustão de spray; (ii) mistura de combustível/ar e estabilização da zona de reação; (iii) formação de poluentes. Estes problemas específicos motivam o desenvolvimento de estudos fundamentais, dentre os quais o presente trabalho.

Em particular, a pesquisa e as aplicações em combustão devem ser examinadas à luz de considerações de impacto ambiental, dada a influência que estes processos possuem sobre a qualidade de ar, sem que a eficiência do processo de combustão seja demasiadamente prejudicada. Uma das alternativas possíveis para a redução da emissão de poluentes, especificamente a de dióxido de carbono, principal gás do efeito estufa, é a substituição dos combustíveis fósseis por combustíveis renováveis, tais como o etanol. Estudos da utilização do etanol, em motores de combustão interna, têm mostrado que a queima do etanol resulta em baixas concentrações de HC , NO_x e CO , quando comparado a combustíveis fósseis (Bahattin et al., 2007 & Park et al., 2010). A avaliação do ciclo do carbono, incluindo as plantações de cana de açúcar, permite minimizar a emissão de gases de efeito estufa. No Brasil a diminuição do efeito estufa foi de 90% e no USA foi de 30% (Silveira et al., 2009). A importância deste combustível é crescente na economia nacional e internacional. Muitas empresas procuram tornar seus equipamentos instalados flexíveis à combustão deste tipo de combustível. Um dos focos de desenvolvimento de etanol são as usinas de geração de energia. No Brasil a conversão da primeira termelétrica 100% flex (Gás Natural ou Etanol) ocorreu em Minas Gerais. A capacidade instalada é de 43,5 MW (Jornal de

Energia, 2010). O Brasil busca, assim, uma alternativa mais eficiente, econômica e com menor impacto ambiental para processos de combustão no sector de geração elétrica.

Os sistemas industriais de combustão, MCI (Motores de combustão interna), turbinas a gás, plantas de potência e fornos de processos, apresentam um impacto ambiental considerável. O diagnóstico da combustão baseado em laser, quando utilizado para caracterizar estes sistemas, tem como desafio o acesso óptico restrito, altas pressões, escoamento turbulento e bifásico e as grandes dimensões dos queimadores. Experiências nos laboratórios empregam diferentes tipos de queimadores, com amplo acesso óptico para estudar chamas pré-misturadas e não pré-misturadas turbulentas. Dentre estes queimadores destacam-se o *bluff body*, *coflow* e combustores DRL (Dally et al., 1998, Kothnur et al., 2002, Marley et al., 2004, Juddoo et al., 2011) nas pesquisas com diagnóstico laser. As técnicas de diagnóstico laser têm contribuído para entendimento da interação entre cinética química e turbulência nos processos de combustão.

Mais especificamente, nos MCI, a mistura de combustível/ar, a formação e a evaporação de spray, a ignição e a formação de poluentes são as principais vias de estudos atuais. Nesta situação as principais dificuldades são relacionadas ao nível de ruído, a oscilações, ao difícil acesso óptico e a incrustações na janela de acesso óptico. Uma técnica utilizada por fábricas de automóveis nos EUA, Japão e Europa é o diagnóstico LIF (Fluorescência induzida por laser). Esta técnica determina as concentrações das espécies OH, CH, HC etc, como principais indicativos da falta de ignição e queima parcial do combustível. O estudo do tamanho das gotas do spray pode ser realizado com uma combinação de técnicas LIF e de espalhamento Mie, dopando-se com um traçador o combustível (Duwel et al., 2007). Emissões de fuligem são estudadas com técnicas LII (Incandescência induzida por laser), medições que tem grande importância em parâmetros de operação do motor, como tempo de injeção e diluição de gases residuais.

A moderna turbina a gás, que opera perto do limite de inflamabilidade inferior, tem acesso óptico restrito, e com sistema de combustão marginalmente estáveis também representam um desafio às medições ópticas em combustão. A mistura ar/combustível é de crucial importância para o controle da formação de NO_x, e para a estabilidade da combustão. Quando a aplicação considera combustores de turbinas a gás, o maior objetivo é diminuir as emissões de NO_x, o

que pode ser alcançado, utilizando pré-misturas pobres. Infelizmente a combustão em pré-misturas pobres é relativamente mais instável do que nos casos estequiométricos. (Boxx et al., 2010). A redução de emissões e o incremento da eficiência podem alterar as características de estabilidade da chama. Processos como LPC (*Lean premixed combustion*) em turbinas a gás permitem reduzir emissões de CO, HC e NO_x, e manter elevada eficiência. Turbinas a gás LPP (*Lean-premixed prevaporized*) e RQL (*Rich-burn, quick-quenching, lean-burn*) são sistemas práticos que, para serem projetados, precisam de modelos confiáveis, validados experimentalmente. Medições simultâneas de velocimetria por imagem de partículas (PIV) e Fluorescência Induzida por plano Laser do radical OH (PLIF-OH), tem sido realizadas em modelos representativos de condições de operações em turbinas a gás (Sadanandan et al., 2008 & Boxx, et al., 2010).

O diagnóstico laser para fornos e caldeiras industriais é bastante limitado pela dificuldade de acesso óptico. Técnicas de diagnóstico laser também são utilizadas no desenvolvimento de sensores para o controle da combustão, visando monitorar a combustão em tempo real e permitir retroalimentação dinâmica para fim de controle. Novas normas de emissões só poderão ser satisfeitas com controle contínuo da combustão. Nas últimas duas décadas o desenvolvimento de técnicas laser passou por um crescimento significativo. Algumas técnicas de diagnóstico laser podem ser aplicadas para monitorar emissões de forma contínua, para cumprir com normas ambientais, obter dados de operação em tempo real e melhorar os índices de eficiência dos equipamentos.

O estado do processo de combustão nas chamas turbulentas de spray de etanol, desenvolvido neste trabalho, poderá permitir à indústria e às agências reguladoras uma melhor avaliação de seu processo de combustão. A caracterização detalhada da interação entre turbulência e cinética química dos processos de combustão é objeto de investigação atual no Departamento de Engenharia Mecânica da PUC – Rio, onde já foram feitos estudos experimentais e numéricos como: Alva, 2008 e Caetano, 2012.

Poucos estudos são encontrados sobre chamas turbulentas de etanol na literatura. Nesse sentido, este trabalho propõe a realização de um estudo experimental do comportamento de chamas de etanol mediante o diagnóstico laser. As técnicas de medição que serão empregadas são: (i) a técnica de espalhamento Mie, utilizada para determinar a distribuição das gotículas no spray;

(ii) a técnica de PLIF-OH, destinada a caracterizar a presença do radical hidroxila presente durante o processo de combustão, (este radical determina a zona de reação da combustão turbulenta) (iii) a distribuição da velocidade do ar, obtida com PIV contém informação fundamental para determinar a interação entre cinética química e a turbulência da zona de reação. A simultaneidade do uso das técnicas permitirá descrever o comportamento das gotículas com respeito à zona de reação da chama.

Este trabalho é parte do projeto CAPES-ProEng “ESTUDO EXPERIMENTAL DE CHAMAS TURBULENTAS NÃO PRÉ-MISTURADAS DE ETANOL E AR USANDO DIAGNÓSTICO LASER”.

1.1. Objetivos

O presente trabalho tem como principal objetivo estudar, experimentalmente, utilizando técnicas de diagnóstico laser, uma chama turbulenta não pré-misturada tipo spray de etanol/ar de configuração geométrica simples. O trabalho visa a estudar escoamentos turbulentos, tanto quimicamente inertes quanto reativos, em um queimador de laboratório tipo *bluff-body*, desenvolvido na PUC-Rio. O principal objetivo é aplicar as técnicas de diagnóstico laser em combustão, para medir (i) a distribuição da concentração das gotículas no escoamento; (ii) o mapeamento da zona de reação; e (iii) o campo bidimensional de velocidade do ar. Um objetivo importante é discutir a estrutura do spray e analisar a interação do escoamento turbulento com a zona de reação para caracterizar os diferentes tipos de chama produzidos por este tipo de queimador. Outro objetivo deste trabalho é contribuir para criar um banco de dados experimentais destinados ao desenvolvimento e validação de modelos computacionais.

1.2. Estrutura do texto

O presente trabalho é organizado em cinco capítulos e um apêndice. No primeiro capítulo foi feita a apresentação do tema da dissertação, como também, de seus objetivos e estrutura. Em seguida, no capítulo 2, é apresentada a revisão bibliográfica dos principais resultados e conclusões obtidas a partir da utilização de diagnóstico laser em combustão. Em particular, o foco é a aplicação simultânea das técnicas de espalhamento Mie, fluorescência induzida por plano laser (PLIF-OH) e de velocimetria por imagem de partículas (PIV). No capítulo 3, é fornecida uma breve descrição do novo sistema de alimentação de combustíveis líquidos e do processo de fluorescência induzida por um plano laser (PLIF). O terceiro capítulo também apresenta os parâmetros de operação e descrição dos equipamentos das técnicas lasers utilizado neste trabalho. O capítulo 4 apresenta os resultados e discussões. O capítulo 5 descreve as conclusões das experiências provenientes das medições do diagnóstico laser. Também no capítulo 5, há uma discussão sobre a continuidade deste trabalho. No apêndice A é apresentado o cálculo da incerteza do número de Reynolds.