

5 Conclusões e Sugestões

Neste trabalho foram apresentados os principais resultados da caracterização de escoamentos turbulentos de ar e etanol, através de queimadores tipo obstáculo, em condições quimicamente inertes e reativas.

5.1 Conclusões e contribuições

A principal contribuição deste trabalho foi estudar o processo de combustão de sprays de etanol para diferentes vazões de etanol e de velocidade do ar. As medições realizadas neste estudo empregaram técnicas de diagnóstico laser, PLIF-OH e PIV, para caracterizar as chamas turbulentas de etanol, através da medição dos campos de luminescência do radical hidroxila e de velocidade do ar e das gotas. A distribuição do diâmetro das gotas é um dos muitos parâmetros necessários para uma adequada descrição da combustão de spray. Foram medidos os diâmetros e velocidades de gotas do spray de etanol, mediante técnica laser chamada de “Shadowgraphy”. Trata-se da primeira vez que esta foi empregada no laboratório de combustão e turbulência do departamento de engenharia mecânica da PUC-Rio.

A revisão bibliográfica mostrou alguns trabalhos aplicados a sprays que empregam as mesmas técnicas laser disponíveis. Estes trabalhos permitiram colocar em perspectiva alguns dos resultados obtidos neste estudo. Poucos foram os trabalhos encontrados na bibliografia que utilizam a técnica de “Shadowgraphy”, técnica para a qual a determinação do erro de medição é um problema aberto.

A caracterização da estrutura do escoamento anular de ar formado a jusante do queimador foi realizada para três diferentes números de Reynolds, $Re_a = 15.391$, 30.782 e 45.404 , empregando-se a técnica PIV estéreo. Os resultados demonstram similitude no escoamento turbulento formado na zona de recirculação, a qual inclui um vórtice toroidal situado entre a face do queimador e

um ponto de estagnação em $y \approx 55 \text{ mm}$ sobre a linha central. O incremento do número de Reynolds não leva a modificações apreciáveis dos campos adimensionais de velocidade e tensores de Reynolds, o que está em concordância com trabalho anterior [71], que determinou propriedades turbulentas para números de Reynolds superiores a 1500 e classificou a estes regimes como de “turbulência completa”. As maiores intensidades das flutuações turbulentas foram encontradas na região da esteira. A distribuição das componentes do tensor de Reynolds indica a anisotropia da turbulência. Para o maior valor do número de Reynolds, a distribuição da taxa de deformação média evidenciou cisalhamento máximo da ordem de $\approx 800 \text{ s}^{-1}$, nas regiões adjacentes à borda do queimador. Isto é benéfico para a combustão, pois favorece a mistura parcial dos reagentes e gera chamas parcialmente pré-misturadas. No entanto, valores demasiado elevados também podem levar à extinção local do processo de combustão. Isto foi evidenciado pelas regiões de combustão instável. Os campos de viscosidade turbulentas calculadas a partir da hipótese de Boussinesq mostram diferentes valores para cada componente do tensor de Reynolds, demonstrando que a aplicação dos modelos de viscosidade turbulenta baseados na hipótese de Boussinesq resulta inapropriada. Uma análise da anisotropia das componentes do tensor de Reynolds empregando a teoria de Lumley demonstra que a turbulência é anisotrópica.

Empregou-se a técnica “Shadowgraphy” para medir diâmetros e velocidades de gotas do spray quimicamente inerte de etanol. No caso da maior vazão de etanol e ar estudada, valores do diâmetro SMD na faixa de $60 - 90 \mu\text{m}$ foram encontrados na linha central, mas a maioria das gotas tem diâmetros menores do que $30 \mu\text{m}$, evidenciando um processo de atomização fina. Para $Y = 20\text{mm}$, uma diferença de $16,0 \mu\text{m}$ no diâmetro SMD é encontrada entre os casos de maior e menor velocidade do ar. O aumento da velocidade também incrementa a diferença entre a velocidade das gotas grandes e as pequenas. Isto ocorre pois as gotas maiores respondem mais lentamente a mudanças de velocidade, o que poderia explicar o maior número de gotas grandes observado no histograma da Figura 51, e o conseqüente incremento do diâmetro SMD. As imagens “Shadowgraphy” permitem observar que as gotas não são perfeitamente esféricas nas regiões perto do atomizador, mas sua centricidade incrementa-se quando estas se afastam do obstáculo.

O incremento da velocidade do ar altera a distribuição de diâmetros de gota em regiões perto da desintegração do filme líquido, mais afastadas da linha central do spray. O número de gotas de maior diâmetro e que possuem maior velocidade aumenta com o incremento da velocidade do ar.

As fotografias das chamas permitem dividi-las em três zonas principais, (i) zona de combustão intermitente, (ii) zona de quimiluminescência azul e (iii) zona de fuligem. Apenas a terceira zona é fortemente modificada com a vazão de combustível.

A maioria das imagens instantâneas de PLIF-OH mostra que a frente de chama permanece continua em quase todo o campo, mas é corrugada pela turbulência. Para a menor vazão de etanol, excetuando-se algumas regiões de extinção local, a frente de chama é quase sempre fechada. À maior velocidade do ar corresponde uma maior espessura e proximidade da frente de chama da face do queimador. Isto parece ocorrer devido ao aumento da difusividade turbulenta com o número de Reynolds do ar. As imagens instantâneas do espalhamento Mie mostram padrões semelhantes de distribuição de gotas. Também se podem observar algumas gotas isoladas que conseguem atravessar a frente de chama, evidenciando que o etanol não foi totalmente evaporado. Este regime particular de combustão de spray é conhecido como percolante e deve ser motivo de futuros estudos.

Observa-se que a vazão de etanol determina a forma da frente de chama. Para a maior vazão de etanol, já não é possível observar o fechamento da frente de chama, as extinções locais aumentam e os elementos de chama são mais afetados pela turbulência. Em todos os casos, observa-se que diversas gotas conseguem atravessar a frente de chama.

As imagens médias de espalhamento Mie mostraram que o incremento da velocidade do ar não altera a forma do spray quanto à vazão de etanol é baixa. Acredita-se que o escoamento de ar tem dificuldade arrastar as grandes gotas geradas neste regime. Ao contrario, para a maior vazão de etanol, o padrão típico de cone é alterado para um padrão semelhante ao de cone sólido. As imagens médias de PLIF-OH indicam que a frente de chama mantém sua forma, mas com maior intensidade luminescente, quando o número de Reynolds do ar aumenta, o que é atribuído à maior intensidade turbulenta.

Finalmente, os campos de velocidade das gotas mostram um pequeno incremento em seu valor, para a menor vazão de etanol, quando se incrementa a velocidade do ar. O contrario ocorre para uma maior vazão de etanol, isto é, a velocidade das gotas diminui na zona de recirculação devido a um maior arrasto do ar sobre as gotas e para regiões mais afastadas observa-se que velocidade das gotas na zona central volta a aumentar, influenciada pelo fechamento do spray.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Em trabalho futuros pretende-se melhorar e aprofundar na compreensão dos resultados obtidos. Para este fim, se sugere:

- (i) Realizar uma análise mais detalhada da estrutura das imagens instantâneas da chama e de espalhamento Mie das gotas, de forma a obter quantidades significativas para a validação de modelos de combustão, tais como a espessura da zona de reação, a densidade de superfície de chama, funções densidade de probabilidade, número de gotas presentes antes e depois da frente de chama.
- (ii) Mapear com “shadowgraphy” o diâmetro SMD para todos os casos estudados e comparar seus resultados com PIV estéreo das gotas, para experimentos quimicamente inertes.
- (iii) Aumentar o tempo de aquisição, a fim de medir mais gotas por ponto e, assim, incrementar a confiança estatística dos resultados Shadow.
- (iv) Modificar a linha de fornecimento de etanol para operar com maior faixa de vazões e pressões de injeção, a fim de obter um padrão de atomização completamente desenvolvido.
- (v) A quantidade de etanol não queimado foi elevada em alguns casos, portanto, sugere se selecionar um atomizador do mesmo tipo, mas de uma menor vazão nominal.

Um aporte importante seria empregar PDA para medir o diâmetro de gota em diversos pontos do spray e compara-los com o sinal correspondente de espalhamento Mie, classificando a intensidade por faixa de diâmetro de gota. Desta forma, seria possível calcular a velocidades das gotas para cada faixa de

diâmetros, utilizando PIV [72]. Com isto é possível determinar o campo de velocidade em determinadas faixas de diâmetros de gota.

O campo do SMD também poderia ser medido com a técnica LSD (Laser Sheet drop Sizing) [14], a fim de comparar o resultado com Shadowgraphy. A técnica LSD permite medir completamente o campo do SMD ao combinar a sinal de Mie, das gotas com a fluorescência de um traçador dopado no combustível. Recomenda-se usar acetona como traçador do etanol.