4. Resultados e Discussões

Nesta seção são apresentados os resultados experimentais obtidos no presente trabalho, isto é: (i) do espalhamento Mie para caracterizar o spray no queimador bluff-body em situações quimicamente inerte e reativas, (ii) de OH-PLIF, destinados a caracterizar as chamas, identificar os regimes de combustão e determinar a posição da zona de reação, (iii) de pares de imagens simultâneas OH-PLIF/espalhamento Mie para ilustrar a distribuição de gotículas com relação a zona de reação da combustão, (iv) do campo de velocidade do escoamento de ar obtido com PIV, simultaneamente com OH-PLIF. Assim, serão estudados escoamentos em quatro casos quimicamente inertes e dois casos reativos descritos nas Tabelas 5 e 6, segundo as condições de vazão de combustível e ar. A faixa de vazão de combustível utilizada é limitada, por um lado, pela mínima vazão de combustível que permite obter uma chama estável e por outro lado, pela máxima vazão que leva a uma operação segura do queimador. Será visto mais adiante que grandes vazões de combustível levam a existência de nuvem de gotas em contato com o ar, o que tem potencial de formar mistura reagente. Os parâmetros de operação nos casos inertes foram determinados para estudar o comportamento do spray em condições similares aos casos reativos.

A faixa de vazão de ar utilizada nos casos inertes é definida em função dos valores da frequência de operação do ventilador, em 20 e 40 Hz como mínimo e máximo, respectivamente. O aumento da vazão de ar nos casos reativos foi limitado pelas condições de segurança no laboratório. A velocidade do ar reportada na Tabela 5 foi medida com um anemômetro da marca Wavetek Meterman, modelo TMA10, com 2% de incerteza. A velocidade do ar reportada na Tabela 6 foi medida com a técnica de PIV. Além disso, na Tabela 6 são mostrados os intervalos de tempo entre os quadros da técnica PIV, utilizados para medir a velocidade do escoamento de ar. Os parâmetros de controle do ICCD para os casos reativos medidos utilizando PLIF são: atraso = 675 ns, abertura = 15 ns e ganho = 70%, com um tempo de exposição do CCD de 1 ms.

A possibilidade de realizar teste não reativo com etanol foi descartada por questão de segurança do laboratório.

Caso	Vazão do jato, cm ³ /s (GPH) ± 5%	Velocidade do jato, m/s	N° Reynolds do jato	Velocidade do ar, m/s ± 2%
1	1,05	$5,15 \pm 6,4\%$	2625 ± 13,3%	7,0
	(1,00)			
2	1,05	$5,15 \pm 6,4\%$	$2625 \pm 13,3\%$	3,5
	(1,00)			
3	1,73	$8,\!49\pm5,\!0\%$	4331 ± 12,6%	7,0
	(1,65)			
4	1,73	$8,\!49\pm5,\!0\%$	4331 ± 12,6%	3,5
	(1,65)			

 Tabela 5 Parâmetros do escoamento para os casos inertes com água, com pressão de operação de 4 bar.

Tabela 6 Parâmetros do escoamento para os casos reativos com Spray de etanol, com pressão de operação de 3,7 bar.

Caso	Vazão jato, cm ³ /s (GPH) ± 5%	Velocidade Jato, m/s	N° Reynolds do jato	Velocidade ar, m/s ±2%	t, µs
5	1,05	$2,97\pm9,5\%$	$1015 \pm 15\%$	8,75	80
	(1,00)				
6	1,73	$4,86\pm6,5\%$	$1674 \pm 13\%$	8,50	80
	(1,65)				

4.1. Escoamento quimicamente inerte

O estudo dos casos quimicamente inertes permitirá antecipar o comportamento, quando da combustão, das seguintes propriedades do spray: comprimento, ângulo de espalhamento, concentração de gotas, quebra do filme,

presença de gotículas isoladas. Estas propriedades serão analisadas, também, quando da presença de combustão. Na Figura 47 é mostrada uma imagem direta do escoamento do spray no caso 1, no qual o jato central é composto de água. Esta figura mostra que o spray, situado no plano de detecção das câmeras ICCD e CCD, é vertical e caracterizado por uma pequena dispersão lateral.



Figura 47 Imagem obtida em luz direta do escoamento do spray de água no caso 1.

A Figura 48 apresenta a definição de alguns padrões de desempenho do spray, isto é, o comprimento, o ângulo e a cobertura do spray. O comprimento do spray é uma distância longitudinal (y) máxima, medida a partir do bocal de injeção, onde é possível encontrar um sinal médio do espalhamento Mie, devido às gotículas, maior do que 21% do valor máximo de intensidade de espalhamento médio no campo, isto é onde o valor da intensidade na imagem média corresponde a 800 u.a. O ângulo do spray, que varia com o comprimento do sistema de pulverização, é medido onde é possível encontrar um sinal médio do espalhamento Mie, devido às gotículas, maior do que 21%, do valor máximo de intensidade de espalhamento médio no campo. A cobertura teórica é o comprimento na direção (x), calculado na saída da janela de observação, que é obtido assumindo-se que o ângulo do spray permanece constante ao longo desta janela. O estudo deste parâmetro não é foco do presente trabalho.



Figura 48 Padrões de desempenho para o sistema de pulverização.

A Figura 49 apresenta imagens instantâneas do espalhamento Mie do spray em cada um dos quatro casos quimicamente inertes. O diâmetro inicial das gotículas do spray é resultado do equilíbrio entre a tensão superficial e as forças de inércia do escoamento de liquido na saída do injetor. É possível observar que o spray apresenta, na vizinhança do bico injetor, o comportamento de cone oco em todos os casos. Porém, nos dois primeiros casos, ocorrem fechamentos do filme de liquido sobre si mesmo, em x = 0 e y = 15 mm. A análise das imagens mostra o comprimento e o ângulo de cone do spray aumenta com a velocidade do jato. A densidade das gotículas é maior quando mais próximo o escoamento encontra-se do bocal de injeção. Nos casos 1 e 2, de menor velocidade de jato, podem ser observadas gotas isoladas de grande diâmetro cuja posição é enfatizada por círculos. Cabe ressaltar que estas gotas não são observadas nos casos 3 e 4, indicando melhor atomização. Pacotes com grande densidade de gotas são observados nas zonas afastadas do bocal de injeção nos casos 3 e 4, o que é identificado por um retângulo. A variação da velocidade do ar não exerce um efeito significativo.



Figura 49 Imagens instantâneas do comportamento do Spray em escoamento inerte obtida por espalhamento Mie. Caso (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4.

A Figura 50 mostra as imagens médias obtidas a partir de 500 imagens instantâneas para cada caso não reativo. O ângulo do spray, medido a partir destas figuras é de aproximadamente de 36°, 29°, 53° e 43°, para os casos 1, 2, 3 e 4, respectivamente. A incerteza absoluta correspondente nestas medições é de $\pm 1^{\circ}$. Note-se que o ângulo de spray diminui com a vazão do ar, ou seja, para a mesma vazão do jato o ângulo diminui 7° entre os casos 1 e 2 e para os casos 3 e 4 reduzse de 10°. O comprimento do spray aumenta com o incremento da vazão do jato. Os comprimentos do spray, medidos a partir destas figuras são de aproximadamente de 35, 37, 47, 46 mm para os casos 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Nota-se que os comprimentos do spray praticamente não variam com respeito à vazão de ar. A incerteza absoluta correspondente nestas medições é ± 0.5 mm.



Figura 50 Imagens médias do comportamento do spray em escoamento inerte obtida por espalhamento Mie. Caso (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4.

No que diz respeito às zonas de máxima intensidade, é possível notar, nas imagens médias, que os casos de maior vazão de jato, 3 e 4, têm duas zonas de máxima densidade do spray, representadas na cor branca, (>3800 u.a.). Estas zonas são praticamente simétricas em relação a x = 0 e correspondem à região intermitente de quebra do filme líquido, onde são encontradas gotas de maiores diâmetros. Para os casos 1 e 2 a zona de máxima intensidade acontece na zona central entre 5 mm e 30 mm, o que corresponde à ejeção de gotas que ocorre a partir da coalescência do filme líquido, na vizinhança de x = 0. As Figuras 51 e 52 mostram, em função da coordenada transversal, as intensidades do espalhamento Mie medido em alturas espaçadas regularmente acima da superfície do queimador. Intervalos de 5 mm acima foram empregados nos casos 1 e 2 e intervalos de 10 mm foram usados nos casos 3 e 4. As figuras ímpares trazem o espalhamento em escala natural e os pares em escala logarítmica, o que é feito para permitir o exame da cauda da distribuição.

Na Figura 51 observa-se que a maior intensidade ocorre na zona central do escoamento, de forma quase simétrica para todos os cortes transversais, com exceção da posição y = 5 mm, que mostra duas zonas de máxima intensidade distintas. Esta figura permite confirmar que nos casos 1 e 2 a maior parte do spray situa-se em |x/D| < 0,1, com D = 60 mm.



Figura 51 Evolução da intensidade das imagens média da Figura 50 na direção transversal (x), para posições longitudinais espaçadas de 5 mm a partir da superfície do queimador. — 5, - • • - 10, ••• 15,--- 20, - • - 25 mm. (esquerda) Caso 1, (direita) Caso 2.

Na Figura 52 pode ser constatado que, para |x/D| < 0,04, há mais de uma ordem de grandeza de probabilidade de se encontrar gotas do que em |x/D| >0,1. Cabe ressaltar que a distribuição de intensidade do espalhamento Mie com respeito à x = 0, não é de tipo gaussiano para os casos 1 e 2.

A Figura 53, obtida para os casos 3 e 4, confirma que duas zonas assimétricas de máxima intensidade ocorrem para $y \le 30$ mm. Para $y \ge 40$ mm a distribuição torna-se monomodal e a simetria em torno de x = 0 é praticamente alcançada. A Figura 54 mostra que a evolução logarítmica da intensidade indica

uma assimetria do spray maior no caso 4 do que no caso 3. A origem desta assimetria não foi investigada, mas é provável que ela seja devida ao uso de um bocal injetor comercial, de tolerância dimensional não controlada. Assim, é possível que as gotas tenham uma distribuição mais uniforme nas extremidades do queimador para o caso 3. Essa figura também mostra que a intensidade do espalhamento Mie não é de tipo gaussiano para os casos 3 e 4. Os resultados mostram que a distribuição da intensidade no centro do spray quase não muda com a vazão do ar, para uma vazão de jato constante.



Figura 52 Evolução logarítmica da intensidade das imagens média da Figura 50 na direção transversal (x), para posições longitudinais espaçadas de 5 mm a partir da superfície do queimador. — 5, - • •- 10, ••• 15,--- 20, - • - 25 mm. (esquerda) Caso 1, (direita) Caso 2.

Comparando-se as intensidades para os quatro casos, observa-se que a máxima intensidade acontece nos casos 1 e 2, os quais são de menor vazão de água, enquanto que os casos 3 e 4 apresentam menores intensidades, com maiores velocidades de água. Acredita-se que à maior vazão de líquido corresponde uma melhor atomização e por consequência, um menor sinal de espalhamento Mie. Na Figura 55 apresenta-se a intensidade na linha de centro (x = 0) para os quatro casos inertes. Os casos 1 e 2, mostram um acréscimo de intensidade entre 0 e 5 mm, que permanece constante até 10 mm, seguido de um decréscimo que acontece ao longo do escoamento. A zona central de máxima intensidade ocorre a 5 mm do bocal de injeção para os casos 1 e 2. O gráfico também mostra um rápido decréscimo para os casos de menor velocidade do jato, casos 1 e 2, entre 5

e 25 mm. Nos casos de maior velocidade de jato, casos 3 e 4, o decréscimo é mais suave entre 10 e 60 mm.



Figura 53 Evolução da intensidade das imagens média da Figura 50 na direção transversal (x), para posições longitudinais espaçadas de 10 mm a partir da superfície do queimador. - • • - 10, - • - 20, - - 30, • • • 40, - 50 mm. (esquerda) Caso 3, (direita) Caso 4.



Figura 54 Evolução logarítmica da intensidade das imagens média da Figura 50 na direção transversal (x), para posições longitudinais espaçadas de 10 mm a partir da superfície do queimador. - • • - 10, - • - 20, - - 30, • • • 40, - 50 mm. (esquerda) Caso 3, (direita) Caso 4.



Figura 55 Decréscimo da intensidade na linha de centro do queimador (x = 0) para os quatro casos não reativo com água.

A Figura 56 mostra a evolução em escala logarítmica da Figura 55, para as duas coordenadas da intensidade com a distância longitudinal na linha de centro do queimador. O comportamento inicial da intensidade, quase constante, é ligado à presença do filme líquido (começo do desenvolvimento do spray). Em seguida o decaimento acontece por arraste do ar, ligado a presença de gotas no escoamento. A tendência em lei de potencia $I(y) = Ay^b$ é idêntica para os quatro casos após um comprimento inicial, diferente para cada caso. Para caracterizar o decaimento da intensidade do espalhamento Mie, de maneira referencial, uma reta tangente determina o valor da declividade para o decréscimo da intensidade em y = 10mm. O valor aproximado da declividade da reta em cada caso é apresentado: -100, -83, -50, -60, para os casos 1,2,3, e 4, respectivamente.



Figura 56 Evolução logarítmica do decréscimo da intensidade na linha de centro do queimador (x= 0) para os quatro casos não reativo com água.

Nas Figuras 57 e 58 são mostrados os decréscimos das intensidades dos sinais de espalhamento Mie, para os casos 3 e 4, nas duas direções de máxima intensidade do cone do spray. Isto permite caracterizar o comportamento do spray nas zonas assimétricas de máxima intensidade. Estes gráficos mostram que após uma distância inicial, ocorre um rápido decréscimo do espalhamento Mie com a distância.



Figura 57 Decréscimo nas duas direções de máxima intensidade, nos casos 3 (esquerda) e 4 (direita). As duas zonas de máximas intensidades são representadas por: — intensidade no lado esquerda da chama, e - • - intensidade no lado direito da chama.



Figura 58 Decréscimo nas duas direções de máxima intensidade em escala logarítmica, nos casos 3 (esquerda) e 4 (direita). As duas zonas de máximas intensidades são representadas por: — intensidade no lado esquerda da chama, e - • - intensidade no lado direito da chama.

4.2. Escoamento reativo

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos para duas chamas turbulentas não pré-misturadas de spray de etanol e de ar. Primeiro serão apresentadas às imagens do espalhamento Mie, para o estudo do comportamento do spray. Em seguida, é apresentado o comportamento instantâneo e médio da intensidade de fluorescência do radical OH. Comparam-se, também, a média de intensidade de fluorescência do OH com a média do espalhamento Mie. Finalmente o campo de velocidade do ar, medido com PIV, é analisado simultaneamente com PLIF-OH.

Nas chamas turbulentas de spray a complexidade observada em chamas gasosas é acrescida dos fenômenos de atomização e evaporação do combustível e da possível interação entre chama e spray. No estudo da estrutura do escoamento em combustão considerem-se dois casos, segundo a Tabela 6, nos quais o jato central é composto de etanol hidratado com aproximadamente 8% de água.

Na Figura 59 são apresentadas as fotografias das chamas spray com etanol e ar. Na fotografia é possível notar a quimiluminescência de cor azul, nas proximidades do bocal de injeção, ligeiramente levantada do bico injetor e, também, a presença de fuligem, de cor amarela laranja, nas zonas mais afastadas do bocal de injeção.



Figura 59 Fotografia das chamas turbulentas de spray de etanol. Casos (a) 5 e (b) 6.

A Figura 59(a) mostra o spray é envolvida pela chama e na Figura 59(b) o spray desenvolve-se na direção da chama.

4.2.1. Resultado do espalhamento Mie do spray de etanol

Na Figura 60 apresentam-se duas imagens instantâneas do spray para os dois casos estudados. Ambos correspondem à mesma vazão do ar. Em ambos os casos é possível observar o padrão de comportamento de cone oco do spray. Observa-se que o ângulo do spray aumenta com a vazão do jato, ou seja, no caso 6 o núcleo do spray se desenvolve com um ângulo muito mais aberto que no caso 5. Nos dois casos há presença de gotículas isoladas de grande diâmetro, situadas a grande distância do injetor, representadas com círculos. A evaporação destas gotículas é mais lenta do que a maior parte do spray o que indica que o bico injetor, novamente, não fornece gotas de diâmetro uniforme.



Figura 60 Imagens instantâneas do espalhamento Mie obtidas do spray de etanol em combustão. (a) Re = 1015, (b) Re = 1674.

Cabe ressaltar que na situação clássica da combustão de spray, é a evaporação rápida da gotícula que controla o processo de mistura de ar/combustível para chamas de spray. Nas imediações do bico injetor existem gotas muito próximas umas das outras, formando filmes de líquido, estas são representadas pelas zonas de maior intensidade (cor preta), identificadas por retângulos. No caso 6, o atomizador cria um spray mais denso nas proximidades do plano de injeção, quando comparado com o caso 5, o que dificulta a caracterização do spray nessa região.

A Figura 61 mostra as imagens médias obtidas a partir de 500 imagens instantâneas, para cada caso reativo. O ângulo do spray é aproximadamente de 48° e 61° para os casos 5 e 6. Este ângulo foi medido no limite superior a 21% do valor máximo de intensidade de espalhamento médio. A incerteza absoluta correspondente nestas medições é de \pm 1°. O comprimento do spray no caso 5 é de 70 mm, no caso 6 de 20 mm no lado esquerdo e 30 mm no lado direito, valores estes medidos no limite superior, a 21% do valor máximo de intensidade de espalhamento médio. A incerteza absoluta correspondente nestas medições é de \pm 0,5 mm. Assim, o ângulo do spray aumenta com a vazão do jato, mas o comprimento diminui. É possível notar nas imagens médias de ambos os casos, zonas de máxima intensidade do spray, representada na cor brancas, segundo a legenda (>3800 u.a.).



Figura 61 Imagens médias do comportamento do spray em combustão obtida por espalhamento Mie. (a) Re = 1015, (b) Re = 1674.

As Figura 62 e 63 mostram, em função da coordenada transversal, as intensidades do espalhamento Mie para alturas espaçadas regularmente 10 mm acima da superfície do queimador. Novamente, a primeira e a segunda destas figuras trazem a intensidade em escala natural e logarítmica, respectivamente. Na Figura 62 verifica-se em ambos casos a existência de duas zonas de máxima intensidade, assimétricas com respeito a x = 0, uma mais intensa da que a outra em toda região do escoamento. A assimetria é maior nas proximidades do bocal de injeção. Na Figura 63 pode se perceber que a extensão lateral máxima do spray

é praticamente invariante com y, |x/D| = 0,2 no caso 5. Já no caso 6, a extensão lateral do spray aumenta linearmente com y, chegando a |x/D| = 0,3 em y = 50 mm. A Figura 63 também mostra uma distribuição de espalhamento mais uniforme nas zonas mais afastadas do bocal de injeção, a partir de y = 40 mm para o caso 5.



Figura 62 Evolução da intensidade das imagens médias da Figura 61 na direção transversal (x), para posições longitudinais espaçadas de 10 mm a partir da superfície do queimador. - • • - 10, - - 20, - - 30, - 40, ••• 50 mm. Caso (esquerda) 5, (direita) 6.



Figura 63 Evolução logarítmica da intensidade das imagens médias da Figura 61 na direção transversal (x), para posições longitudinais espaçadas de 10 mm a partir da superfície do queimador. - • • - 10, - - - 20, - - 30, - 40, ••• 50 mm. Caso (esquerda) 5, (direita) 6.

Os resultados mostram que a zona de máxima intensidade é maior para o caso 6, no qual a vazão de jato é maior, comportamento contrário ao do escoamento não reativo. No caso 5 há melhor distribuição do spray que no caso 6.

As Figuras 64 e 65 trazem as variações da intensidade de espalhamento na linha de centro do queimador, (x = 0), para a imagem média dos dois casos reativos. A Figura 64 mostra que o caso 5 é de pouca variação longitudinal quando comparado ao caso 6, onde a intensidade é máxima nas proximidades do bocal de injeção e termina mais rápido perto de 10 mm. A Figura 65 apresenta a evolução logarítmica, da intensidade com a distancia longitudinal na linha de centro do queimador. O comportamento linear na zona de decréscimo é mais notório no caso 6. O valor aproximado da declividade da reta em cada caso é, -66 e -333, para os casos 5 e 6, respectivamente.



Figura 64 Decréscimo da intensidade na linha de centro do queimador (x = 0) para os casos reativos. Caso (esquerda) 5, (direita) 6.



Figura 65 Evolução logarítmica do decréscimo da intensidade na linha de centro do queimador (x = 0) para os casos reativos. Caso (esquerda) 5, (direita) 6.

Nas Figuras 66 e 67 apresentam-se, em escala natural e logarítmica, a evolução do espalhamento Mie das duas zonas de máxima intensidade média, assimétricas na direção do escoamento do spray, para os dois casos reativos. Na Figura 66, o caso 5 de menor velocidade de jato, o decréscimo é mais lento até aproximadamente 70 mm, nas duas zonas de máxima intensidade. O gráfico mostra um rápido decréscimo para o caso 6, de maior velocidade de jato, nas duas zonas de máxima intensidade, até aproximadamente 65 mm. Esta figura permite apreciar a assimetria nos valores de espalhamento Mie, por exemplo, em y = 20 mm o caso 5 é praticamente simétrico, já no caso 6 o sinal de espalhamento médio fornece valores de 600 e 800 u.a. A Figura 67 apresenta a evolução logarítmica da intensidade e a distância longitudinal nas duas direções de máximo sinal do espalhamento Mie do cone de spray. O comportamento linear na zona de decréscimo permite mostrar que no caso 6, ocorre um rápido decréscimo do espalhamento Mie com a distância.



Figura 66 Decréscimo das duas zonas de máxima intensidade na direção do escoamento do spray para os caso 5 (esquerda) e 6 (direita). As duas zonas de máximas intensidades são representadas por: — zona de máxima intensidade no lado direito da chama, e - • - zona de máxima intensidade no lado esquerdo da chama.



Figura 67 Evolução logarítmica do decréscimo das duas zonas de máxima intensidade na direção do escoamento do spray para os caso 5 (esquerda) e 6 (direita). As duas zonas de máximas intensidades são representadas por: — zona de máxima intensidade no lado direito da chama, e - • - zona de máxima intensidade no lado direito da chama, e - • - zona de máxima intensidade no lado esquerdo da chama.

4.2.2. Imagens PLIF da combustão do spray de etanol

Nas Figuras 68 e 69, são mostrados os resultados obtidos, nos casos 5 e 6, respectivamente, do sinal de fluorescência do radical OH. Para cada um dos casos estudados são apresentadas, no plano de simetria do queimador, cinco imagens instantâneas e a média da intensidade de fluorescência de OH. A média é calculada a partir de 500 imagens instantâneas.

Os casos estudados foram escolhidos porque representam chamas com diferentes características que podem ser encontradas em sistemas práticos, ou seja, (i) chama dominada pelo jato; (ii) chamas levantadas com pré-mistura parcial, (iii) chamas em regime de elemento de chama, (iv) chamas em intensa turbulência do escoamento. Conforme descrito no capítulo 2, a região com sinal de fluorescência do OH é admitida como sendo a zona de reação da chama.

4.2.2.1. Caso 5

As imagens instantâneas de fluorescência do radical OH mostradas na Figura 68, obtida para o caso 5, indicam que esta situação possivelmente corresponde ao regime de elementos de chama. A zona de reação é corrugada de maneira considerável pela agitação turbulenta, porém a superfície de chama instantânea permanece contínua a maior parte do tempo. Em quase todos as imagens instantâneas a chama inicia-se a y > 20 mm da superfície do queimador, o que sugere ou (i) a ausência de combustível ou (ii) condições aerodinâmicas que impossibilitam a estabilização da chama. Nas Figuras 68(a) e (b) a zona de reação é contínua, mas a espessura não é uniforme, sendo muito dobrada pela turbulência. A zona de reação é caracterizada por uma espessura variável, na faixa entre 3 mm e 16 mm aproximadamente, e pela presença de regiões cuja curvatura é da mesma ordem de grandeza do que a espessura. Como descrito no capítulo 2, zonas de extinção da chama podem ser provocadas por altas taxas deformação, consequência de altos níveis de turbulência, entretanto, a verificação deste fenômeno requer a medição simultânea da velocidade de jato, o que se encontra fora do escopo do presente estudo. Na Figura 68(c) é possível observar uma região de extinção local na coordenada (20,60) mm. A Figura 68(d) apresenta uma

maior zona de extinção do lado direito da chama, o que possivelmente permite a formação de um bolsão de pré-mistura parcial entre reagentes e produtos de combustão.

A Figura 68(e) apresenta um grande descolamento da chama da superfície do queimador, o que indica que pode estar acontecendo uma pré-mistura parcial entre combustível e ar sem presença de combustão, com mais importância no lado direito da chama. Na chama média da Figura 68(f), a espessura é quase constante, 11 mm aproximadamente, nos dois lados da chama, mas nesta espessura os níveis de intensidade de OH variam. Conforme poderia ser esperado dos instantâneos, a chama média tem uma altura de descolamento de 20 mm. A chama média exibe razoável grau de simetria em torno do eixo x = 0. Acredita-se que, a exceção da região de descolamento da chama, o restante poderia ser descrito por um modelo de elementos de chama.



Figura 68 Imagens de PLIF-OH no caso 5, obtidas para chamas de etanol e ar. (a, b, c, d, e) imagens instantâneas, (f) imagem média, (Re = 1015, Var = 8,75 m/s).

4.2.2.2. Caso 6

A situação experimental correspondente ao caso 6 foi escolhida por ser tratar de um regime que, como será visto abaixo, afasta-se das situações clássicas. Os resultados da fluorescência do radical OH são mostrados na Figura 69. Nesta figura pode ser percebido que a zona de reação instantânea é afetada de maneira considerável pela turbulência. O aumento da velocidade do spray de combustível corresponde a um aumento da irregularidade da zona de reação, a qual é mais interrompida e fortemente perturbada do que no caso 5. Na Figura 69(a) a zona de reação é continua, e a espessura é relativamente uniforme, aproximadamente de 3 mm. Na Figura 69(b) a zona de reação é muito fragmentada e corrugada. Nas Figuras 69(c) e (d) é possível verificar a presença de região de extinção maciça nas imediações de (20,40) mm. Na Figura 69(e) a chama apresenta extinção em ambos os lados, a chama é completamente fragmentada e interrompida. A chama média 69(f) mostra claramente que a interrupção da zona de reação é mais importante o lado direito do que do esquerdo, o que é uma possível consequência da assimetria do spray. A espessura da chama média é não uniforme nos dois lados da chama. A intensidade de OH também varia fortemente. A chama média é menos descolada da superfície do queimador (15 mm) do que no caso 5. Este caso representa uma situação cuja modelagem se anuncia particularmente delicada.

Ambos os casos reativos parecem apresentar um pequeno sinal fluorescência instantâneas nas imediações do bico injetor. Esta fluorescência poder ter duas origens: (i) o etanol pode estar fluorescendo ou (ii) pode estar ocorrendo combustão em torno do spray, com formação de OH. Este sinal é fraco e não afeta o comportamento médio da chama.



Figura 69 Imagens de PLIF-OH no caso 6, obtidas para chamas de etanol e ar. (a, b, c, d, e) imagens instantâneas, (f) imagem media, (Re = 1674, Var = 8,5 m/s).

4.2.2.3. Comparação dos casos 5 e 6

Nas Figuras 70 e 71 são mostradas, em função da coordenada transversal, as intensidades do sinal de fluorescência do PLIF-OH da imagem média e da imagem RMS, para alturas espaçadas regularmente 10 mm acima da superfície do queimador. A primeira e a segunda destas figuras representam os casos 5 e 6, respectivamente. Os valores de RMS serão comparados com os valores de intensidade média a fim de determinar o grau de afastamento das imagens instantâneas respeito à média. O maior grau de afastamento possivelmente determinar posições onde acontecem zonas de extinção da chama.

No gráfico de intensidade da imagem média da Figura 70, caso 5, a assimetria da intensidade não é relevante e os dois lados da chama permanecem quase simétricos ao longo da direção longitudinal do queimador. As máximas intensidades de 17 e 18 u.a. acontecem na zona central da frente de chama entre as posições y = 30 mm e y = 40 mm. A posição lateral da chama desenvolve-se na faixa $0,1 < \left|\frac{x}{D}\right| < 0,5$, além de isso, na posição $\left|\frac{x}{D}\right| < 0,1$ não há presença da fluorescência média do radical de OH. Nesta chama a intensidade média é próxima aos valores de RMS na posição y = 20 mm indicando forte agitação. Nas posições y = 30 mm e y = 40 mm o valor médio é maior do que o RMS, o que sugere que a agitação diminui de montante para jusante, num primeiro momento. Já nas posições y = 50 mm e y = 60 mm o valor RMS é maior do que o médio, indicando que a agitação turbulenta volta a aumentar.

Na Figura 71, caso 6, a assimetria da intensidade leva a maiores valores de OH inicialmente o lado direito da chama na posição y = 20 mm, e para posições mais afastadas do bocal de injeção $y \ge 30$ mm acontece o contrário. As máximas intensidades de 12,5 e 9 u.a. acontecem nas extremidades da chama, nas posições y = 20 mm, e y = 60 mm, respectivamente. Este comportamento não monotônico da intensidade média é consequência de eventos de extinção mais frequentes nas posições y = 30, 40 e 50 mm. A chama tem uma extensão lateral de |x/D| < 0,5, com pontos de máxima intensidade em |x/D| = 0,4.



Figura 70 Evolução da intensidade da imagem média (esquerda) e da imagem RMS (direita) na direção transversal (x), para posições longitudinais espaçadas de 10 mm a partir da superfície do queimador. - • - 20, — 30,- - 40, - • • - 50, ••• 60 mm, para o caso 5.



Figura 71 Evolução da intensidade da imagem média (esquerda) e da imagem RMS (direita) na direção transversal (x), para posições longitudinais espaçadas de 10 mm a partir da superfície do queimador. - • - 20, — 30,- – 40, - • • - 50, ••• 60 mm, para o caso 6.

É possível notar, presença de OH no centro da chama |x/D| < 0,3, com baixa intensidade, na média e no RMS. No caso 6, o valor de RMS é maior do que os valores da média, em particular nas posições mais afastadas do bocal de injeção. O maior afastamento do RMS acontece nas posições y = 30 mm (8 u.a. na média e 13 u.a. no RMS) e y = 40 mm (8,5 u.a. na média e 14 u.a. no RMS), só na posição de y = 20 mm os valores de RMS e a média são próximos (12,5 u.a. na média e 11 u.a. no RMS). Nestas posições pelo qual, a existência de extinção ou apagamento da chama governa o processo de combustão. Nas zonas mais afastadas do bocal de injeção, o comportamento da zona de reação é muito intermitente.

4.2.3. Comparação das imagens PLIF-OH e do espalhamento Mie

A comparação dos resultados das imagens instantâneas do espalhamento Mie e de fluorescência de OH, coloca o caso 5, de menor velocidade de jato, como o escoamento com melhor distribuição das gotas, do ponto de vista da completude do processo de combustão. Para uma comparação dos resultados do espalhamento Mie e PLIF-OH na Figura 72 se superpõem as duas médias correspondentes, para cada caso reativo.





Observa-se o comportamento da zona de reação média (PLIF-OH) e sua interação com a distribuição médias das gotas (espalhamento Mie). Embora as imagens sejam apenas qualitativas, claramente permite evidenciar a distribuição das gotas e os campos de OH, e realçam a interação entre zonas de altas concentrações de gotículas, e as zonas de reação da combustão.

No caso 5 da Figura 72, representa um comportamento clássico para o desenvolvimento e usos de modelos de combustão. A chama média está situada a |x| > 18 mm, além da extensão máxima do spray |x| > 15 mm, ou seja, neste

caso, o spray é completamente envolto pela chama. Comparando as figuras 62 e 70 da intensidade média do espalhamento Mie e fluorescência de OH, respectivamente, é possível afirmar que ocorre uma evaporação completa das gotículas antes do processo de combustão. Entretanto, não é possível determinar se ocorre pré-mistura a montante da base da chama, já para isto é necessário o conhecimento do campo de velocidade ou de distribuição do combustível.

Como se mostra na Figura 72, no caso 6, o comportamento assimétrico do spray domina o processo de combustão, sendo este um caso que se afasta das situações clássicas. No spray ocorrem dois fenômenos semelhante ao observado por Marley et al., 2004 e Gounder et al., 2006 em chamas de etanol e ar:

 (i) O spray claramente atravessa a zona de reação, no lado direito da chama, na posição (30,40) mm,

 (ii) O spray gera zonas de extinção no lado direito da chama, a montante desta região a chama parece se comportar como uma chama de difusão turbulenta.

A jusante acredita-se que ocorrem:

(i) Efeitos transientes, que não podem ser de fato identificados com a cadência dos lasers utilizada,

Queima em zonas com pré-misturas parciais ricas em combustível.
 As chamas pré-misturadas estão associadas à pré-vaporização do combustível e à sua mistura com o ar,

(iii) Queima de gotículas isoladas, produto da não vaporização destas,

 (iv) Extinção da chama por: (a) excesso de combustível, que impossibilita o processo de combustão, (b) resfriamento da chama pelas gotas, consequência da interação destas, com as zonas de reação.

4.2.4. PIV do ar

O conhecimento do campo de velocidade é fundamental para determinar a interação entre reação química e turbulência. A técnica de PIV foi utilizada para medir o campo da velocidade do ar no queimador. A medição da velocidade do restante do escoamento não pode ser realizada, pois não foram colocadas partículas traçadoras no combustível, pela necessidade de fornecer etanol

vaporizado no queimador. O novo sistema de queima de etanol vaporizado descrito no anexo B, será objetivo da continuidade do presente trabalho. Na Figura 73 é mostrada a evolução da velocidade na direção transversal (y), para posições longitudinais espaçadas de 10 mm a partir da superfície do bocal de injeção, nos casos 5 e 6. A medição do escoamento do ar acontece apenas na região de 0,4<|x/D|<0,8, onde é possível encontrar uma boa correlação das partículas traçadoras de TiO₂.



Figura 73 Evolução da velocidade média do ar na direção transversal (y), para posições longitudinais espaçadas de 10 mm a partir da superfície do queimador. ••• 20, - 30, - • - 40, - 50, - • • - 60 mm.

A Figura 73 mostra um comportamento assimétrico em ambos os casos. O maior valor de velocidade é característica do escoamento de ar, o decaimento gradual na direção transversal marca a presença do corpo rombudo.

É possível observar que no lado direito para ambos os casos a velocidade na direção (y) é menor do que no lado esquerdo, produto da assimetria gerada pelas peças de fixação e nivelamento do corpo rombudo no duto anular do queimador. A assimetria não era esperada e será corrigida nos trabalhos futuros, assim a discussão dos resultados obtidos é limitada. Cabe ressaltar que em trabalhos anteriores (Caetano, 2012) os resultados da técnica PIV para medição do escoamento de ar não apresentaram assimetria.

Na Figura 73, no caso 5, a máxima velocidade na direção (y) é de aproximadamente 9,0 m/s, na posição de 20 mm, e de 8,5 m/s, na posição y = 60

mm. No caso 6, as velocidades máximas nas posições 20 e 30 mm, são 8,75 e 8,50 m/s respectivamente.

A Tabela 7 apresenta os principais resultados dos ensaios inertes e reativos, permitindo assim comparar os valores obtidos.

Tabela 7 Resumo comparativo do spray para os ensaios inertes e reativos.

Testes	Inertes		Reativos	
Numero de Reynolds	2625	4331	1015	1674
Ângulo do spray	36° e 29°	53° e 43°	48°	61°
Comprimento do spray (mm)	35 e 37	47 e 46	70	20 (esquerda) 30 (direita)
Assimetria	Menor	Maior	Mínima	Maior
Pico de espalhamento Mie				
Valor pico (u.a.)	3800	2400	2400	(aumento linear).
Posição (x, y) do pico (mm).	(0, 5) e (0, 30)	$(\pm 8, 5) e (0, >40)$	(8,0)	(4, 10) e (22, 50)
Decaimento na	-80 a -100	-50 a -60	-67	-333
linha de centro	(forte)	(suave)	(suave)	(forte)
Formato próximo ao injetor	Fechado	Aberto	Fechado	Aberto