

ANÁLISE VISUAL DO PROCESSO DE MISTURA DOS REAGENTES EM CHAMAS ENRIQUECIDAS NÃO CONFINADAS COM SWIRL

Pedro Teixeira Lacava

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Departamento de Propulsão, Pça Mal. Eduardo Gomes, 50, São José dos Campos – SP, CEP 12228-900, placava@ita.br

Amílcar Porto Pimenta

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Departamento de Propulsão, Pça Mal. Eduardo Gomes, 50, São José dos Campos – SP, CEP 12228-900, amilcar@ita.br

João Andrade de Carvalho Jr.

¹Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá, Departamento de Energia,
Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá – SP, CEP: 12500-000, joão@feg.unesp.br

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Laboratório Associado de Combustão e Propulsão,
Rod. Presidente Dutra, km 40, Cachoeira Paulista – SP, CEP 12700-000

Resumo. No presente trabalho utilizou-se a técnica de tomografia de chama para se avaliar o processo de misturas entre o combustível e o oxidante em chamas de diesel e ar enriquecido com oxigênio puro (porcentagem de O_2 acima dos 21% do ar atmosférico). A configuração do queimador utilizado é típica para aplicação industrial, onde a chama é ancorada com auxílio de um “swirler”. As imagens foram obtidas por câmeras CCD’s com filtros de interferência nos comprimentos de onda 431 nm e 515 nm, corresponde a comprimento da emissão quimiluminescente dos radicais CH e C_2 . Essas imagens sofreram processo de reconstrução tomográfica e através da análise da presença desses radicais foi possível avaliar a distribuição de razão de equivalência ao longo da chama e, consequentemente, o processo de mistura entre os reagentes. Os resultados apontam que o processo de enriquecimento aumenta a intensidade da mistura entre os reagentes.

Palavras chaves: chamas enriquecidas, tomografia de chama.

1. INTRODUÇÃO

A maior parte dos processos industriais que fazem uso da energia térmica liberada pelas reações de combustão utiliza o ar como fonte de oxigênio. No entanto, este representa apenas 21% da composição volumétrica do ar, que ainda contém 78% de nitrogênio e 1% de traços de outros constituintes. Do ponto de vista térmico, o nitrogênio presente é inerte, ou seja, apenas consome parte de energia liberada pelas reações exotérmicas, que poderia estar disponível para o processo em questão. Desta forma, enriquecer o oxidante nada mais é que aumentar a porcentagem volumétrica de O_2 acima dos 21% encontrados no ar. Com isso, a vazão total dos gases de combustão diminui e a eficiência térmica do processo aumenta (Griffith, 1990). Basicamente, o enriquecimento do oxidante encontra espaço em processos industriais que necessitam temperatura elevada e alta eficiência térmica.

Contudo, a eficiência do processo de enriquecimento está intimamente relacionada com a maneira pela qual ocorre a mistura entre os reagentes. Este processo pode-se um tanto crítico em operações de combustão injetando-se combustível líquido como spray. Neste caso, existe uma seqüência de processos físicos que interfere no processo de queima: rompimento do filme líquido em gotas, vaporização das gotas, mistura do combustível vaporizado com o oxidante, ignição e combustão.

Dentro deste contexto, o presente trabalho apresenta resultados experimentais sobre o processo de mistura entre reagentes para combustão não confinada de diesel com ar enriquecido, baseados nas análises visuais de imagens nos comprimentos de onda correspondentes às emissões de radiação quimiluminescentes dos radicais C₂ e CH. Nas chamas de hidrocarbonetos a zona de intensa reação química é marcada pela forte emissão de radiação quimiluminescente devido à presença dos radicais C₂ e CH (Gaydon e Wolfhard, 1979), cujas bandas de emissão são 515 nm e 431 nm, respectivamente. A associação das emissões do C₂ e do CH com o grau de homogeneidade de misturas e com razão de equivalência foi inicialmente reportada na literatura por Gaydon (1957). Em geral, nas misturas ricas a emissão na banda do C₂ é predominante, por outro lado, em regiões da chama onde a concentração de oxigênio é alta, caracterizando misturas pobres, há uma predominância na banda de emissão do CH (Lewis e Von Elbe, 1968, DeSoete e Feugier 1976).

2. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

A chamas foram obtidas através de um queimador onde o oxidante passa por um retentor de chama do tipo “swirler” com oitos pás e ângulo entre elas de 40°, conforme apresenta a Fig. (1a). Ao passar pelo “swirler” o escoamento de oxidante adquire um componente tangencial de velocidade, sendo que, quando o escoamento emerge do queimador, surge uma região de recirculação que facilita a mistura entre o combustível e o oxidante e estabiliza a chama. O ar de combustão e o oxigênio puro são misturados antes da passagem pelo queimador.

A atomização do combustível é feita através de um injetor do tipo “Y-Jet”, onde o filme líquido rompe-se em um fino spray através do impacto com ar em alta velocidade (número de Mach de injeção próximo a um) e vazão mássica dez vezes menor que a vazão do combustível. A Fig. (1b) apresenta um esquema do injetor, que é acoplado ao queimador em uma lança central. As vazões mássicas de combustível, ar de atomização e oxigênio puro foram medidas por rotâmetros e a vazão mássica de ar por um dispositivo tipo placa de orifício. Manteve-se a vazão de diesel constante em 3,11 g/s, o que representa uma potência de 31906 cal/s, e as vazões de ar e de oxigênio foram combinadas para se atingir o nível de enriquecimento desejado, de tal forma que o excesso de oxigênio (b) fosse próximo a 15% para todas condições.

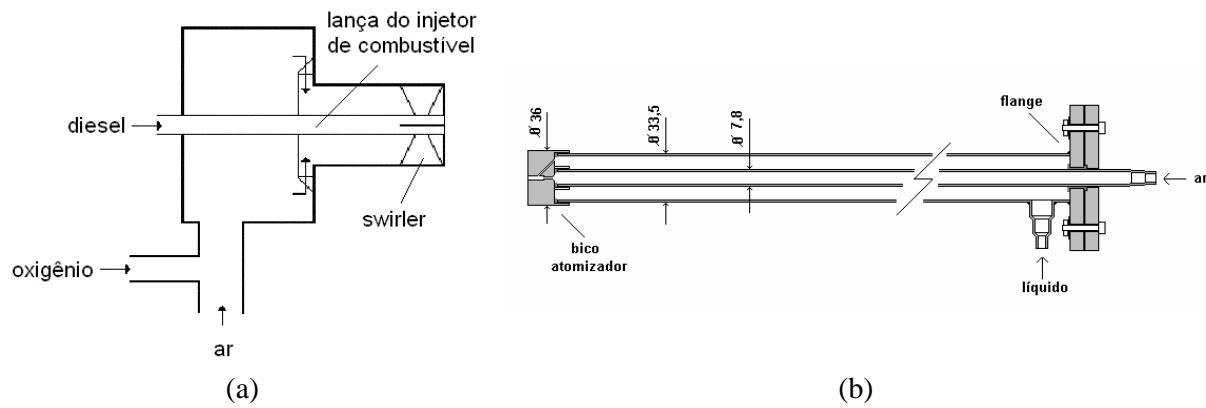


Figura 1 – Esquema do queimador (a) e do injetor de combustível (b).

A visualização da chama foi feita por meio de uma câmera CCD Marshall V-1070-EIA, com resolução espectral de 400 nm a 1100 nm, com controle do tempo de exposição entre 1/10000 e 1/60 segundos. O sensor ótico da câmera possui 811 pixels na horizontal e 510 na vertical, com sensibilidade mínima de 0,03 Lux. A área do sensor possui 7,95 mm (horizontal) x 508 mm (vertical). Acoplado à câmera foi utilizada uma lente Fujinon CF50B, f/1.4, com foco e abertura controlável, adicionando a esta, filtros de interferência nos comprimentos de onda 515,40 nm e 413,09 nm, correspondentes aos comprimentos de onda da emissão quimiluminescente dos radicais C₂ e CH, respectivamente. A transmitância dos filtros é 0,66 para o C₂ e 0,55 para o CH. Quando necessário, o efeito da transmitância foi corrigido no valor numérico em escala de cinza associado à intensidade luminosa captada por cada pixel do CCD. As imagens adquiridas pela câmera foram digitalizadas numa placa de aquisição de imagens Matrox Meteor/RGB com capacidade de taxa de aquisição de até 42Mb/s, instalada em um computador PC-Pentium 133MHz, 32Mb de memória. Os programas de aquisição de imagens foram desenvolvidos em ambiente de programação específico para placa utilizada. O resultado final da aquisição era uma imagem monocromática (em escala de cinza) média de 200 imagens adquiridas em seqüência. A Fig. (2) apresenta um esquema da montagem do sistema óptico.

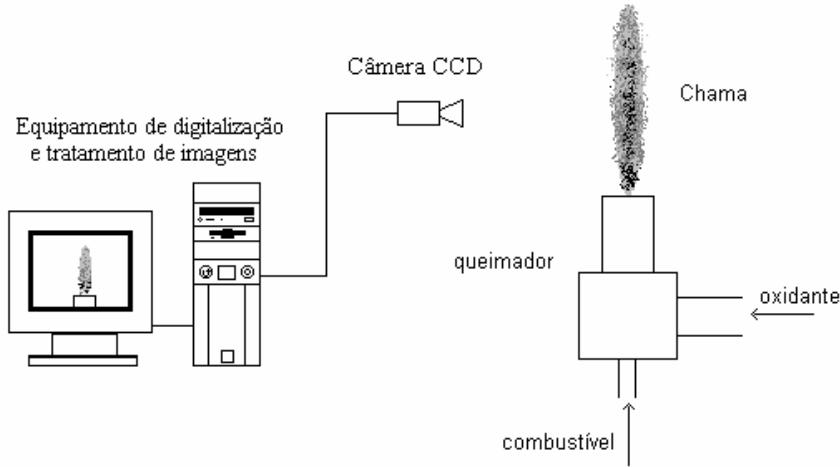


Figura 2 - Esquema da montagem experimental para visualização da chama.

Na análise visual, considera-se que a projeção da chama vista pela câmera de aquisição de imagem representa a integração da chama. O objetivo da reconstrução tomográfica é o processo inverso, ou seja, obter o perfil que, quando integrado numa revolução de 2π radianos, origina a projeção observada. A Fig. (3a) apresenta um esquema deste procedimento. A reconstrução tomográfica empregada segue o algoritmo desenvolvido em ambiente MATLAB por Souza (1998). Tal modelo é aplicável a objetos axissimétricos e considera que cada pixel da câmera CCD integra a radiação emitida pela chama a partir de um caminho ótico conhecido. Em outras palavras, o modelo admite que as dimensões do CCD são da mesma ordem de grandeza do objeto. Além do próprio trabalho desenvolvido por Souza (1998), a aplicação desse algoritmo em combustão ainda pode ser vista nos trabalhos de Costa et al. (1998), Caldeira Pires et al. (1999). Como a chama é considerada axissimétrica, é necessário se conhecer uma das metades da imagem reconstruída. A Fig. (3b) apresenta um exemplo do resultado da média de 200 imagens capturadas pela câmera CCD e o posterior resultado da tomografia de chama.

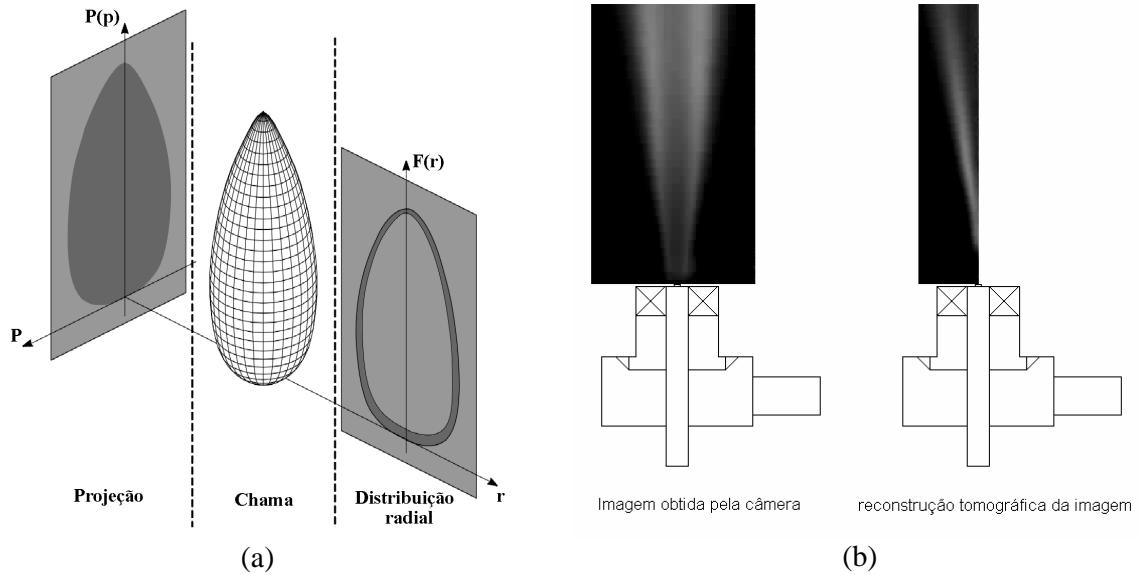


Figura 3 – (a) Esquema da reconstituição axissimétrica da chama. (b) Exemplo de reconstrução de imagem utilizando o algoritmo de Souza (1998).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tab. (1) apresenta a configuração do sistema ótico utilizado para a obtenção das imagens de cada radical.

Tabela 1 – Configuração do sistema ótico.

radical	abertura	foco	filtro de interferência [nm]	transmitância	tempo de exposição [seg]	distância entre o sistema ótico e a chama
C ₂	4	10	515,40	0,66	1/10000	≥ 5 m
CH	4	10	431,09	0,55	1/10000	≥ 5 m

Nas proximidades dos comprimentos de onda 431 e 516 nm, também é possível encontrar como fonte de emissão luminosa a fuligem, principalmente em chamas de spray; desta forma, as análises visuais dos radicais C₂ e CH devem ser limitadas à região onde a presença de fuligem pode ser considerada como de pequena influência. Assim, limitou-se a região de análise das chamas entre a saída do atomizador e a distância 4d (168 mm), onde d é o diâmetro da lança de acoplamento do injetor de combustível ao queimador, ou seja 42 mm. A Fig. (4) apresenta essa região usando como exemplo a chama para combustão do diesel enriquecida a 51,39% de O₂. No final do processo de reconstrução tomográfica, a imagem resultante forma uma matriz com 60 x 280 pixels, onde cada pixel armazena uma informação de intensidade luminosa em escala de cinza. Para analisá-las, estabeleceu-se um sistema de coordenadas (com a escala em número de pixels) onde se definiram as faixas de observação gráfica da intensidade luminosa de ambos radicais, conforme também apresenta a Fig. (4).

Os ensaios foram realizados em quatro combinações de vazões de ar e oxigênio puro, que representam diversos níveis de enriquecimento. A Tab. (2) apresenta as condições para os ensaios e as imagens obtidas para os radicais C₂ e CH após a reconstrução tomográfica. As Fig.'s 5 a 8 mostram a representação gráfica para as faixas analisadas das imagens da Tab. (2).

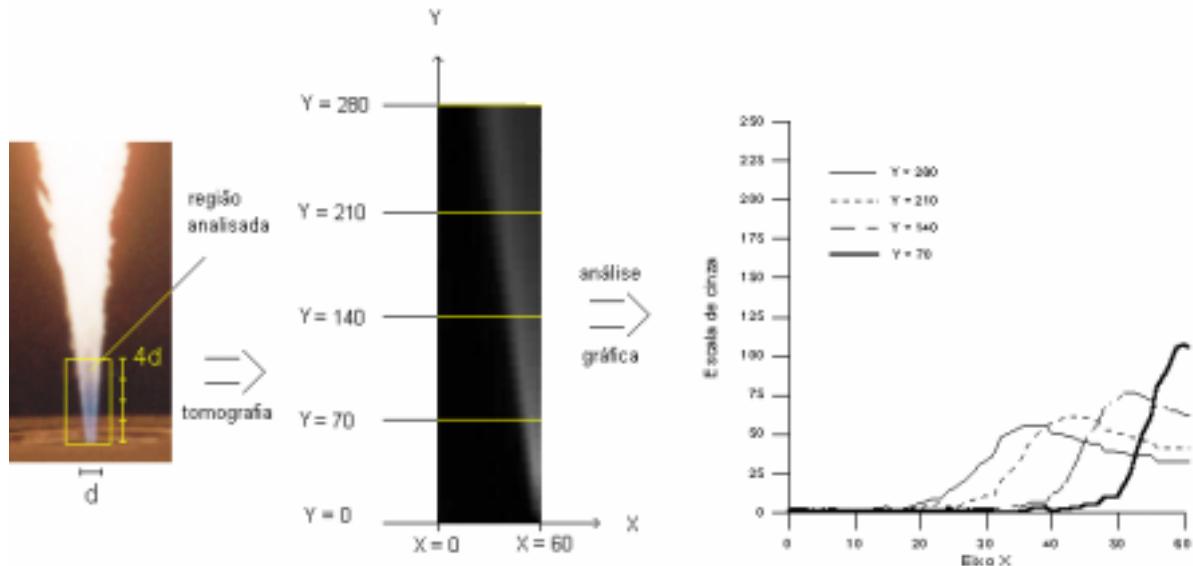


Figura 4 – Região da chama analisada pelo processo de tomografia e representação das faixas estudadas graficamente.

A Fig. (5), com combustão de diesel a 21% de O₂, mostra que para Y = 70 e Y = 140 as curvas de intensidade de emissão do C₂ e do CH apresentam picos em faixas estreitas, indicando que as reações químicas se concentram na região de fronteira do cone do spray. Quanto mais próximo à saída do atomizador de combustível maior é a densidade de gotas do spray e não há penetração suficiente de oxidante no interior do cone para o desenvolvimento das reações, ficando limitadas à fronteira deste com o escoamento de ar. À medida que se deslocam a jusante do atomizador, as gotas evaporam e a densidade de gotas no interior do spray diminui, facilitando a penetração de oxidante em seu interior. A Fig. (5a), ainda com combustão de diesel a 21% de O₂, mostra que já nas posições Y = 210 e Y = 180 há uma melhor distribuição do radical C₂ no interior do cone do spray. No entanto, a Fig. (5b) mostra que o radical CH não acompanha esse comportamento e, mesmo nas posições mais superiores, sua emissão fica restrita à fronteira do cone. Essa predominância do radical C₂ sobre o CH no interior do cone denota que, mesmo havendo uma melhor penetração do oxidante nas partes superiores da chama, a combustão tende a ser acentuadamente rica nessa região.

Analizando a Fig. (6), combustão 30,05 % de O₂, observa-se que apesar de menos acentuada ainda há uma predominância do radical C₂ sobre o CH, mostrando que permanece a tendência de combustão rica no interior do cone de spray. Por outro lado, a Fig. (7) (51,39% de O₂) e Fig. (8) (72,63% de O₂) mostram que mesmo para Y = 210 e Y = 280 as curvas de emissão do CH já não apresentam picos de intensidade, mas um comportamento mais homogêneo no interior do cone, semelhante ao do radical C₂. Isso ocorre em função do aumento da porcentagem de O₂ no oxidante acelerar a taxa de vaporização das gotas, em função da maior temperatura na região de chama, facilitando a mistura entre o combustível vaporizado e o oxidante. Com isso a combustão passa a ser menos rica por toda chama.

As Fig.́s (5) a (8) mostram que tanto a radiação quimiluminescente do C₂ quanto a do CH diminuem a medida que se aumenta o nível de enriquecimento do oxidante. Segundo Gaydon e Wolfhard (1979), para chamas difusiva a baixa pressão as emissões de C₂ e CH são bem mais fortes para uma chama com ar do que para uma chama com oxigênio, devido aos tempos de vida dos radicais serem menores para a chama de oxigênio. No entanto, o comportamento da redução da emissão quimiluminiscente de cada radical, quando se aumenta o nível de enriquecimento, é diferente e depende da natureza do hidrocarboneto utilizado como combustível.

Tabela 2 – Condições para os ensaios e imagens reconstruídas.

m_f [g/s]	3,11	3,11	3,11	3,11
m_{O_2} [g/s]	0	4,75	9,83	11,30
m_{ar} [g/s]	53,87	33,13	13,41	5,40
%O ₂	21,00	30,05	51,39	72,63
b%	15,90	15,14	14,72	15,95
C ₂				
CH				

Obs: m_f = vazão de diesel, m_{O_2} = vazão de oxigênio puro, m_{ar} = vazão de ar, %O₂ = porcentagem total de oxigênio (oxigênio puro + oxigênio do ar) no oxidante, b = excesso de oxidante normalizado.

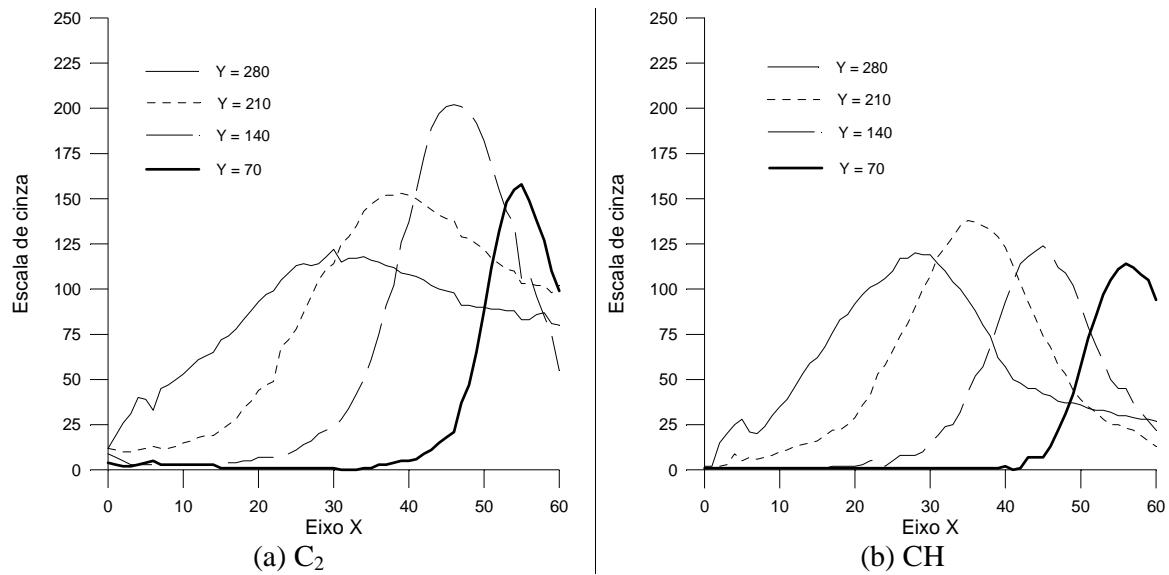


Figura 5 - Análise das imagens do C₂ (a) e CH (b) para 21% de O₂ e b = 15,90%.

Outra maneira de caracterizar o comportamento da mistura entre os reagentes é obtendo a razão entre as intensidades luminosas dos comprimentos de onda do C₂ e CH (I_{C2}/I_{CH}). Chou e Patterson (1995) mostraram que a razão de intensidade I_{C2}/I_{CH} aumenta com o aumento da razão de equivalência, ou seja, quando aumenta a deficiência de oxidante. No presente trabalho essa técnica também foi aplicada para as imagens apresentadas na Tab. (2). Escolheu-se como região de análise a faixa Y = 210, por ser uma região onde a densidade de gotas do spray é menor. A análise também

se restringiu no eixo X, ao intervalo $X = 40$ e $X = 60$, correspondendo à região interna da chama. Para valores mais externos ocorreram discrepâncias acentuadas entre as emissões de C_2 e CH, levando a resultados que não apresentam coerência. Este problema na região externa da chama pode estar associado à presença de reações mais lentas, em comparação com as dos radicais C_2 e CH, envolvendo o CO e o CO_2 com o hidrogênio que emitem radiação luminosa em um espectro contínuo entre 300 a 550nm, segundo Rassweiler e Withrow (1931) (também citados por Chou e Patterson, 1995), causando interferência nas bandas de emissão do C_2 (516 nm) e CH (431 nm). Após a divisão das intensidades luminosas, o resultado de cada situação experimental foi normalizado pela sua maior razão I_{C_2}/I_{CH} no intervalo $X = 40$ a $X = 60$. Com isso foi possível estabelecer a comparação entre situações estudadas. A Fig. (9) apresenta o resultado dessa análise.

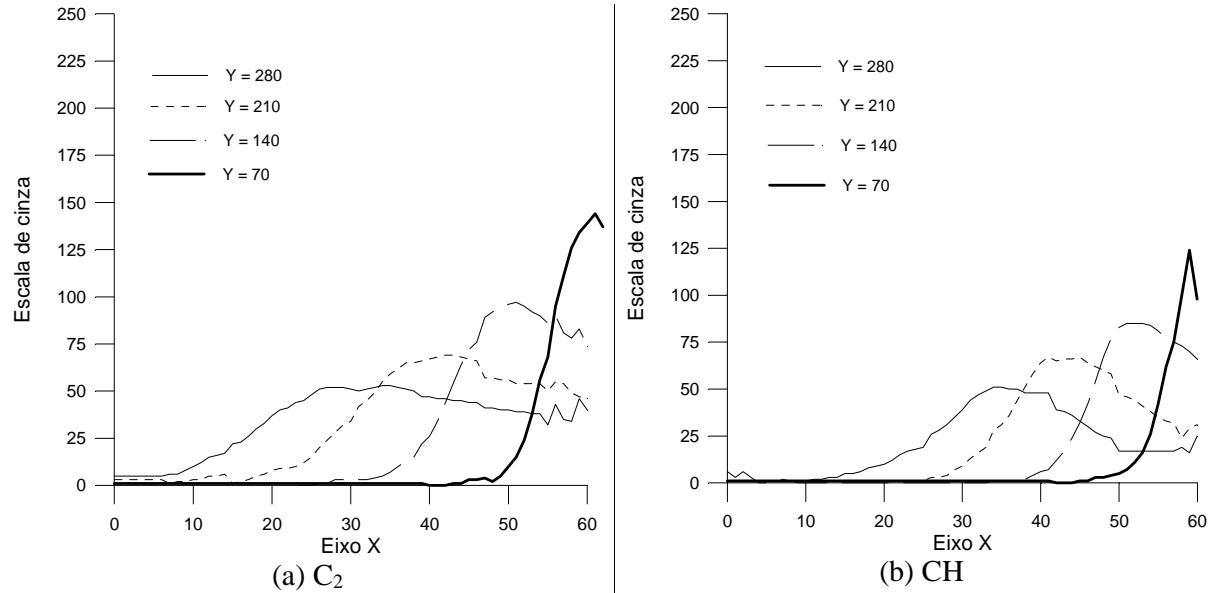


Figura 6 - Análise das imagens do C_2 (a) e CH (b) para 30,05% de O_2 e $b = 15,14\%$.

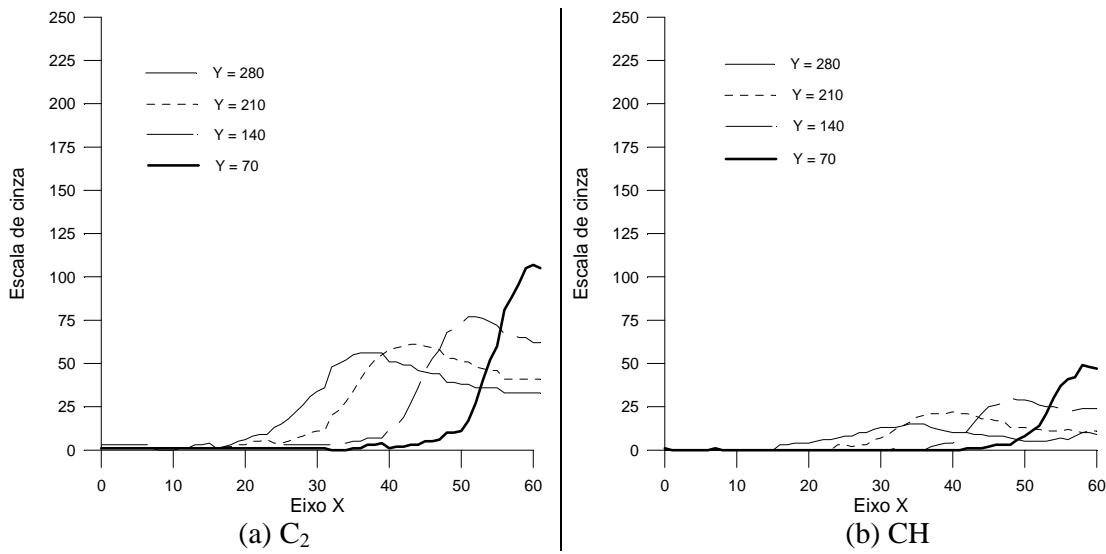


Figura 7 - Análise das imagens do C_2 (a) e CH (b) para 51,39% de O_2 e $b = 14,72\%$.

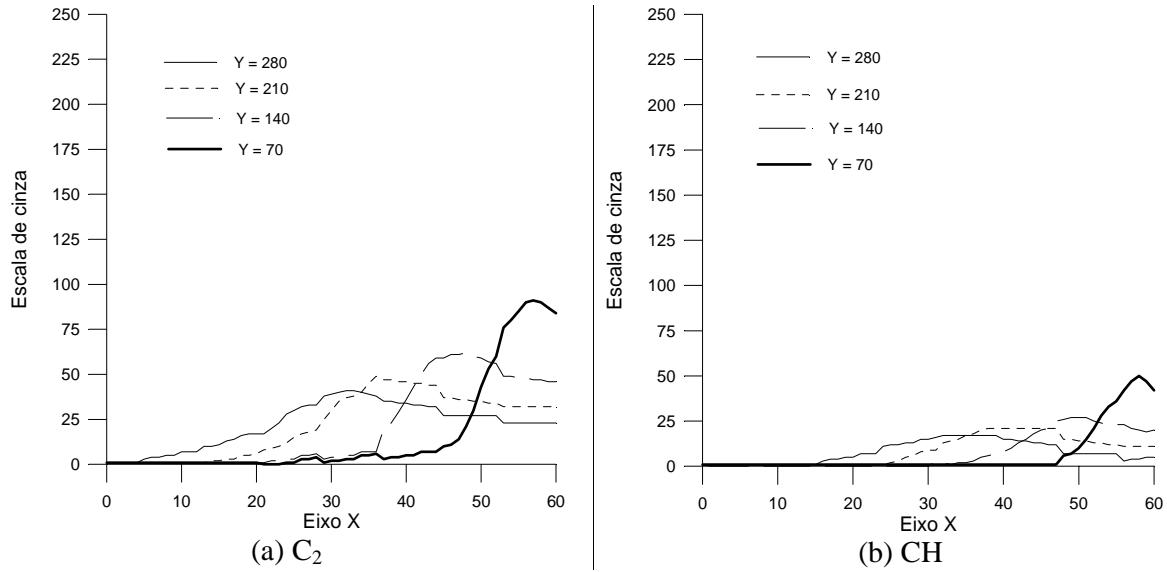


Figura 8 - Análise das imagens do C_2 (a) e CH (b) para 72,63% de O_2 e $b = 15,95\%$.

Os resultados apresentados na Fig. (9) mostram que à medida que se caminha para região central das chamas a razão de intensidade aumenta, o que também representa o aumento na razão de equivalência. A maior dificuldade de penetração do oxidante em regiões mais internas da chama resulta em condições mais ricas de combustão. Por outro lado, o aumento do teor de oxigênio no oxidante minimiza essa situação e tende a propiciar uma distribuição mais homogênea da razão de intensidade, ou da razão de equivalência. Nota-se que a razão I_{C2}/I_{CH} para combustão do diesel com ar varia entre aproximadamente 0,17 e 1, já para combustão com 72,63% de O_2 varia entre 0,66 e 1. Esse comportamento ocorre em função do aumento da taxa de vaporização das gotas do spray com a elevação da temperatura devido à combustão enriquecida.

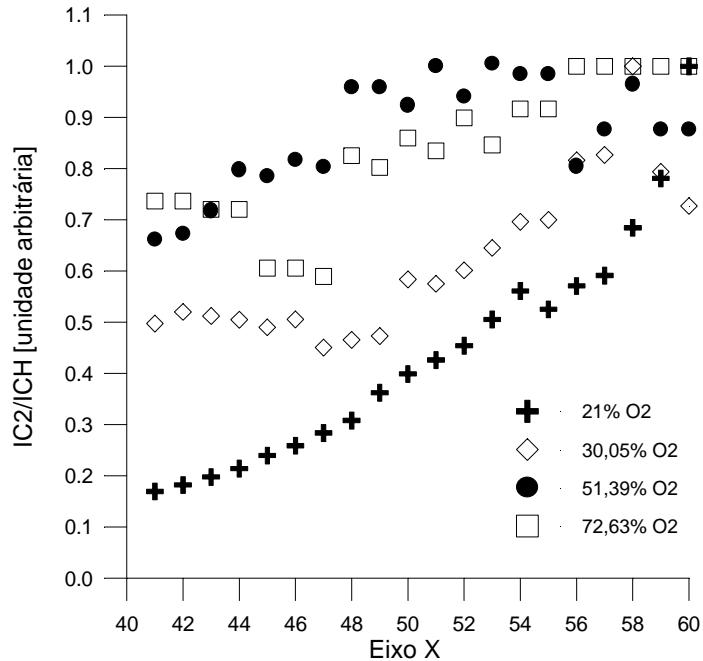


Figura 9 - Comportamento da razão de intensidade I_{C2}/I_{CH} em função da posição.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta resultados experimentais sobre o processo de mistura entre reagentes para combustão não confinada de diesel com ar enriquecido. Os resultados são baseados na análise visual de imagens obtidas nos comprimentos de onda correspondentes às emissões de radiação quimiluminescentes dos radicais C₂ e CH. Nota-se que à medida que se progride para região central da chama há um aumento na razão de equivalência, pois há uma maior dificuldade de penetração do oxidante nas regiões internas, resultando em condições mais ricas de combustão. Por outro lado, o aumento do teor de oxigênio no oxidante minimiza essa situação e tende a propiciar uma distribuição mais homogênea da razão de equivalência.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Caldeira Pires, A.; Anacleto, P.; Costa, F.S.; Lacava, P.T.; Carvalho Jr, J.A., On The Characterization of Air/Fuel Mixture Distribution Through C₂/CH Chemiluminescence Ratio in a LPP Combustor, *15th Brazilian Congress of Mechanical Engineering*, cd, Águas de Lindóia, Brazil 1999.
- Chou, T.; Patterson, D.J., In – Cylinder Measurement of Mixture Maldistribution in a L-Head Engine, *Combustion and Flame*, 101:45-57, 1995.
- Costa, F.S.; Caldeira Pires, A.; Anacleto, P.; Carvalho Jr, J.A., Flames Anaysis through tomography: Characterization of LPP Gas Turbine, *ENCIT98*, Rio de Janeiro, Brazil, 1998.
- DeSoete, G.; Feugier, A., *Aspects Physiques et Chimiques de la Combustion.*, Éditions Technip, 1976.
- Gaydon, A.G., *The Spectroscopy of Flames*, Wiley, New York, 1957.
- Gaydon, A.G.; Wolfhard, H.G., *Flames: their Structure, Radiation and Temperature*, John Wiley & Sons, New York, 1979.
- Lewis, B.; Von Elbe, G., *Combustion, Flames and Explosions of Gases*, Academic Press, 1968.
- Souza, N., *Processamento de Imagem Tomográfico*, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 1998.

VISUAL ANALYSIS OF REACTANTS MIXING PROCESS IN NON- CONFINED SWIRL ENRICHED FLAMES

Pedro Teixeira Lacava

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Departamento de Propulsão, Pça Mal. Eduardo Gomes, 50,
São José dos Campos – SP, CEP 12228-900, placava@ita.br

Amílcar Porto Pimenta

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Departamento de Propulsão, Pça Mal. Eduardo Gomes, 50,
São José dos Campos – SP, CEP 12228-900, amilcar@ita.br

João Andrade de Carvalho Jr.

¹Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá, Departamento de Energia,
Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá – SP, CEP: 12500-000, joão@feg.unesp.br

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Laboratório Associado de Combustão e Propulsão,
Rod. Presidente Dutra, km 40, Cachoeira Paulista – SP, CEP 12700-000

Abstract. In the present work the flame tomographic reconstitution was utilized to analyse the mixing process between fuel and oxidant in diesel and enriched air flames (O_2 higher 21%). The burner configuration is typical of industrial applications, and a swirler stabilizes the flame. CCD's cameras using interferometric filters centred on 431 nm and 515 nm obtained the images, corresponding the chemiluminescence radiation wavelength of CH and C₂ radicals, respectively. The tomographic reconstitution process was applied on spatially integrated time-averaged images for these two wavelengths ranges, and the analyses of the CH and C₂ presence in the flame allowed evaluating the equivalence ratio distribution through the reaction zone, consequently, evaluating the mixing process too. The results show the enrichment process increases the mixing rate between the reactants.

Keywords: enriched flames, flame tomographic reconstitution.