

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ESTUDO EXPERIMENTAL DA QUEIMA DE BIODIESEL EM REGIME DE COMBUSTÃO SEM CHAMA VISÍVEL

Edson Orati da Silva, eng.orati@gmail.com¹
Anton Skyrda Veríssimo, antonskyrda@yahoo.com.br¹
Ana Maura Araujo Rocha, maurarocha@hotmail.com²
Ely Vieira Cortez, evcortez@lcp.inpe.br²
Fernando de Souza Costa, fernando@lcp.inpe.br²
Hélcio José Izário Filho, helcio@dequi.eel.usp.br³
João Andrade de Carvalho Junior, joao@feg.unesp.br¹

¹Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP, Avenida Ariberto Pereira da Cunha, 333, Pedregulho, Guaratinguetá, SP, Brasil,

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, Laboratório Associado de Combustão e Propulsão, Rodovia Presidente Dutra, km 40, Cachoeira Paulista, SP, Brasil,

³Universidade de São Paulo – USP, Escola de Engenharia de Lorena, Departamento de Engenharia Química, Rodovia Itajubá-Lorena, km 74,5, Campinho, Lorena, SP, Brazil.

Resumo: A presente pesquisa tem por objetivo desenvolver uma bancada de testes em escala de laboratório, que seja capaz de operar em vários regimes de combustão, inclusive no regime de combustão sem chama visível, com a queima de combustíveis líquidos, em particular, o biodiesel. A combustão sem chama visível é uma tecnologia baseada na recirculação interna dos gases de combustão para pré-aquecer e diluir o oxigênio molecular, de modo a minimizar a ocorrência de picos de temperatura na chama e inibir o mecanismo térmico de formação de NO_x . Como resultado, as reações de oxidação ocorrem lentamente e a zona de combustão torna-se volumetricamente distribuída com menor gradiente de temperatura. A tecnologia é mais eficiente, levando a reduzir as emissões de carbono. O sistema foi projetado para operar em diferentes taxas de recirculação de gases no interior da câmara com o aumento da vazão mássica de ar e da temperatura de pré-aquecimento do ar, a fim de estabilizar o regime de combustão sem chama visível. O coeficiente de recirculação interna dos produtos de combustão esteve na faixa entre 2,05 e 2,49. Os resultados experimentais apontaram que a operação do sistema em elevados excessos de ar pré-aquecido a 600°C atendem às condições típicas da combustão sem chama visível. Nestas condições, os contornos da chama não foram distinguidos, os ruídos sonoros foram reduzidos, as emissões de fuligem foram eliminadas e as emissões de NO_x e monóxido de carbono (CO) foram consideravelmente pequenas. Por outro lado, a operação do sistema com baixos excessos de ar resultou na presença de uma chama luminosa, amarelada, com grande emissão de fuligem e acompanhada pelo aumento acentuado nas emissões de CO, que são características de uma chama de difusão convencional. Portanto, o sistema desenvolvido opera no regime de combustão sem chama visível, fazendo a queima de biodiesel em excessos de ar elevados e com temperaturas de pré-aquecimento do ar acima de 400°C.

Palavras-chave: 1. combustão sem chama visível, 2. biodiesel, 3. emissões de poluentes, 4. atomizadores mecânico-centrífugos, 5. Redução de CO_2

1. INTRODUÇÃO

A sociedade moderna requer a produção e o uso de fontes de energia, como: o carvão mineral, o gás natural e os derivados de petróleo, para manter o padrão de consumo, em detrimento da preservação dos recursos naturais disponíveis. O setor energético é responsável por dois terços das emissões globais de gases do efeito estufa, segundo informações da Agência Internacional de Energia, World Energy Outlook (2015). As fontes renováveis de energia contribuem para reduzir as emissões de carbono e a dependência mundial pelas fontes fósseis. Apesar disso, o cumprimento dos planos de ações de combate ao aquecimento global pelos países envolvidos em acordos internacionais sobre mudanças climáticas, a substituição de equipamentos obsoletos e novos investimentos em tecnologias mais

eficientes e menos poluidoras são necessários para minimizar o aumento da temperatura média do planeta nas próximas décadas. Neste contexto, a tecnologia de combustão sem chama visível é de grande importância.

Alguns autores Tanaka (1995), Hasegawa (2000) e Tsuji *et al.* (2003) relataram que a tecnologia de combustão sem chama visível oferece grandes vantagens, como a economia de combustível, associada com o ganho de eficiência térmica e a redução das perdas de calor, e as menores emissões de poluentes, como os óxidos de nitrogênio (NO_x), que são responsáveis pela formação de *smog* fotoquímico em grandes centros urbanos e pela destruição da camada de ozônio. Outros autores Weber *et al.* (2005), Arghode *et al.* (2009) e Li *et al.* (2011) afirmaram que a tecnologia tem potencial para operar com combustíveis sólidos, líquidos e gasosos em diversas aplicações.

O presente projeto tem por objetivo desenvolver uma bancada experimental para a queima de biodiesel, que seja capaz de operar em vários regimes de combustão, inclusive no regime de combustão sem chama visível, bem como obter e analisar os resultados experimentais relativos às emissões de poluentes (NO_x e CO) em condições típicas do regime de combustão sem chama visível com a queima de biodiesel.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As pesquisas sobre a combustão sem chama visível foram extensamente realizadas com o uso de combustíveis gasosos e o entendimento dos fundamentos fenomenológicos envolvidos é requerido para aumentar a aplicação da tecnologia com combustíveis líquidos e sólidos. A tecnologia requer o estudo da recirculação de gases no interior de câmaras de combustão. Por este motivo, a aerodinâmica de jatos confinados é abordada para permitir maior compreensão dos efeitos da recirculação na ocorrência do regime, cujas características são tão distintas do regime de combustão convencional, que a combustão sem chama visível é identificada como um novo regime de combustão.

2.1. Aerodinâmica de jatos confinados

Quando um fluido emerge de um ejetor (local no qual o fluido deixa a superfície sólida adjacente), ocorre a formação de um jato, que se expande radialmente e arrasta os gases no meio quiescente através de suas fronteiras. A troca de quantidade de movimento é acompanhada pela alteração do perfil axissimétrico de velocidades, em virtude da existência de tensões de cisalhamento na seção transversal. No entanto, o perfil de velocidades na direção radial permanece estável ao longo da região na qual o jato torna-se completamente desenvolvido.

O comportamento aerodinâmico do jato é melhor descrito pela definição de diâmetro equivalente, que está relacionada com a diferença entre a massa específica do jato e a dos gases no meio quiescente. A intensidade do arrasto dos gases aumenta com a distância proporcional ao diâmetro equivalente, sendo máxima, quando o jato torna-se completamente desenvolvido. A Figura 1 é o esboço de um jato no interior de uma câmara, cujas paredes limitam o arrasto de gases, em relação à condição na qual o jato se expande em um ambiente aberto. Apesar disso, o jato possui a mesma quantidade de movimento inicial. Como resultado, ocorre o fenômeno da recirculação interna dos gases, que é representado pelas linhas de fluxo reverso de velocidades através das fronteiras do jato.

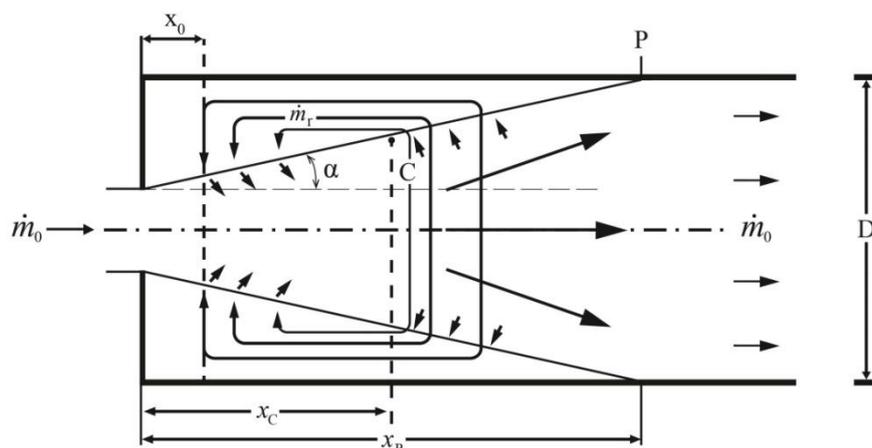


Figura 1. Desenho elaborado para representar o fenômeno da recirculação de gases promovido por um jato turbulento e confinado (Niessen, 2010).

A Equação (1) foi desenvolvida para calcular a vazão mássica de gases recirculados (\dot{m}_r), quando um jato de vazão mássica (\dot{m}_0) e massa específica ρ_0 se expande com uma inclinação α no interior de uma câmara de diâmetro D , arrastando os gases de massa específica ρ_∞ no meio quiescente até colidir hipoteticamente com a parede da câmara no ponto P, cuja posição é x_p a partir de um ejetor de diâmetro físico d_0 . O ponto C é o ponto de máxima recirculação e o ponto de coordenada x_0 é o local a partir do qual teoricamente o jato começa a arrastar os gases na periferia.

$$\frac{\dot{m}_r}{\dot{m}_0} = \frac{0,08}{\tan \alpha} \cdot \left(\frac{D}{d_0}\right) \cdot \left(\frac{\rho_\infty}{\rho_0}\right)^{1/2} - \frac{1}{2} \quad (1)$$

2.2. Fundamentos da combustão sem chama visível

A combustão sem chama visível (no inglês, *flameless combustion*) é um regime de combustão no qual o combustível e o oxidante são aquecidos e diluídos pelo processo de mistura com os produtos de combustão antes de haver a ignição da mistura resultante e as reações subsequentes de oxidação do combustível. A intensidade do movimento de recirculação dos produtos gasosos determina a taxa de diluição dos reagentes e influencia a cinética das reações de combustão. A taxa de recirculação dos produtos gasosos no interior da câmara é descrita pelo coeficiente de recirculação (K_V), conforme a Eq. (2), definido pela razão entre a vazão mássica dos gases recirculados e a soma das vazões mássicas dos reagentes na entrada da câmara.

$$K_V = \frac{\dot{m}_r}{\dot{m}_0} \quad (2)$$

Na prática, o aumento da taxa de recirculação dos gases de combustão pode causar a extinção da chama, uma vez que a redução da concentração de oxigênio molecular (O_2) no interior da câmara provoca a interrupção das reações de oxidação. No entanto, o regime de combustão sem chama visível torna-se estável, quando a temperatura dos reagentes pré-aquecidos é maior do que a temperatura de autoignição da mistura final formada entre o ar, o combustível e os produtos de combustão. Nestas condições, segundo Tsuji *et al.* (2003), a mistura final é inflamável, devido à expansão dos limites de inflamabilidade como resultado do pré-aquecimento do ar. A chama resultante não requer uma fonte externa de ignição para se manter estável, dispensando o uso de ancoradores e queimadores pilotos, exceto se os últimos forem necessários por uma questão de segurança.

O calor liberado nas reações de oxidação é intensamente disperso na massa dos gases recirculados e o campo de temperatura resultante favorece a ocorrência do novo regime, culminando na existência de uma distribuição de temperatura mais uniforme no interior da câmara, quando comparado com os gradientes térmicos do regime de combustão convencional. Portanto, os sistemas de combustão devidamente projetados podem operar com chamas difusivas ou com as chamas de pré-misturas em condições típicas do regime de combustão sem chama visível, desde que os requisitos necessários para estabilizar o regime sejam atendidos, como a distribuição favorável de temperatura e a intensidade de recirculação dos gases de combustão suficientemente elevada no interior da câmara.

Nas últimas duas décadas, a combustão sem chama visível tem sido estudada para entender os aspectos fundamentais deste regime, a fim de possibilitar a extensão da tecnologia para diversos combustíveis. Segundo Wüning e Wüning (1997), o regime de combustão sem chama visível é caracterizado pela ausência de uma chama visível à vista humana desarmada, pela redução acentuada das emissões de NO_x de origem térmica e pela atenuação dos ruídos sonoros durante a operação do sistema. A Figura 2 compara a aparência de uma chama de óleo combustível pesado no regime de combustão sem chama visível, no qual ar é diluído a 12% molar de O_2 e pré-aquecido a $500^\circ C$, com uma chama do mesmo combustível no regime de combustão convencional, no qual o ar contém 21% molar de O_2 e se encontra pré-aquecido a $250^\circ C$.

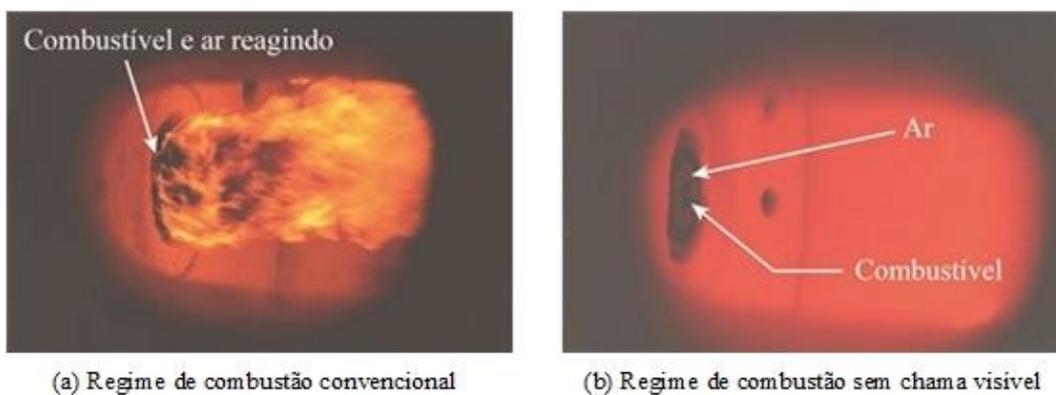


Figura 2. Comparação entre (a) o regime de combustão convencional e (b) o regime de combustão sem chama visível (Milani e Saponaro, 2001).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa teve um caráter experimental e foi dividida nas etapas de projeto e desenvolvimento de uma bancada de testes em escala de laboratório e na etapa de execução dos experimentos.

3.1. Metodologia

O projeto e o desenvolvimento da bancada de testes em escala de laboratório foram baseados no trabalho de Veríssimo, Rocha e Costa (2011), especificamente a escolha das dimensões da câmara de combustão e a seleção dos materiais. Os materiais utilizados no projeto são os aços inoxidáveis austeníticos 316S e 304S. Para a escolha do quartzo, foram consideradas as perdas térmicas e a possibilidade de visualização da chama através do material, que apresenta elevada transmitância espectral hemisférica.

O método de cálculo para o projeto do queimador e da câmara foi estabelecido a partir da teoria de jatos turbulentos em ambientes confinados, a fim de investigar os efeitos da aerodinâmica da câmara no comportamento e nas características da chama, à medida que a vazão mássica de ar aumenta na entrada da câmara. O sistema de combustão permite variar o coeficiente de recirculação interna dos gases de combustão no interior da câmara, de modo a favorecer o alcance e a estabilização de vários regimes de combustão, inclusive o regime de combustão sem chama visível.

As dimensões de projeto foram baseadas na Norma ABNT NBR 9530:1986 - Flanges metálicos para tubulações quanto aos seus tipos e formas de vedação. Os flanges adotados foram de dois tipos: o plano e o sobreposto plano com ressalto, enquanto que a classe de pressão de trabalho foi escolhida ser de 1,034 MPa.

A pesquisa foi conduzida em três etapas. A primeira etapa compreendeu a definição e o projeto dos componentes do sistema, inclusive a configuração e o dimensionamento do queimador e da câmara. A segunda etapa foi dedicada ao projeto mecânico do sistema propriamente dito e à construção de uma bancada de testes em laboratório para investigar o comportamento e as características do spray de biodiesel, em função da temperatura e da pressão de injeção do combustível. A terceira etapa consistiu na realização dos experimentos de combustão.

3.2. Bancada de testes de atomização

Uma bancada de testes de atomização foi construída para estudar os efeitos da temperatura e da pressão de injeção do combustível líquido no comportamento dinâmico e nas características físicas do spray, de modo a simular a operação normal do sistema de combustão, uma vez que o tubo de injeção de combustível encontra-se sujeito ao escoamento de ar pré-aquecido nas vizinhanças. A Figura 3 é uma fotografia da referida bancada no laboratório.



Figura 3. Bancada de testes de atomização no laboratório.

A bancada de testes foi equipada com um sistema de pré-aquecimento e controle da temperatura do combustível por meio de resistores elétricos de 2 kW, um controlador fabricado pela Novus, modelo N1040, e um termopar do tipo K, posicionado na extremidade do tubo de alimentação do combustível, mais próxima do atomizador. O conjunto de resistores foi devidamente isolado com lã de vidro e inserido no interior de um tubo externo para facilitar a fixação e o manuseio no suporte vertical.

Foi utilizada uma bomba de engrenagens, capaz de injetar o combustível sob pressão de até 19 bar e a uma vazão de 19 litros por min (no S.I., aproximadamente $3,2 \cdot 10^{-4}$ m³/s), uma vez que o biodiesel, em particular, é relativamente viscoso e a injeção deste deve ser contínua. Além disso, foi também construído um dispositivo do tipo *by-pass* com duas válvulas esfera e uma válvula globo, que permite variar a pressão e a vazão de injeção de combustível. O combustível líquido foi pulverizado na forma de um spray através de um atomizador mecânico-centrífugo do tipo cone oco (no inglês, *hollow cone pressure swirl*), que é de uso comercial e fabricado pela *Steinen*, com vazão nominal de 0,40 galões por hora (no S.I., aproximadamente $4,2 \cdot 10^{-7}$ m³/s).

Um equipamento da marca *Spraytech*, cujo fabricante é a empresa Malvern, foi empregado para fazer as medidas do diâmetro médio de Sauter da distribuição de gotas no spray de biodiesel. O diâmetro médio de Sauter (no inglês, *Sauter mean diameter*, SMD) é definido como o tamanho de uma gota, que possa representar de forma equivalente a distribuição real de tamanhos das inúmeras gotas em um spray, ou seja, a razão entre o volume e a área superficial desta gota possui o mesmo valor numérico da razão entre o volume e a área superficial de todo o spray.

De acordo com Lacava e Argachoy (2010), a técnica utilizada para medir o SMD é a interferometria a laser, que se baseia na difração de Fraunhofer de um feixe paralelo de luz monocromática causada pela passagem de uma gota em movimento, cujo diâmetro é considerado muito maior do que o comprimento de onda da luz incidente. Quando um

spray atravessa a zona de medição (local de incidência do feixe de luz), ocorre o espalhamento do laser em diferentes direções e intensidades angulares, resultando em um padrão de difração. O padrão de difração é um perfil de distribuição da intensidade da luz espalhada, que depende apenas dos tamanhos das gotas. Cada perfil de distribuição é coletado em diversas posições radiais para originar numerosas séries de anéis concêntricos, que permitem medir a distribuição de tamanhos das gotas em qualquer velocidade no spray e em qualquer posição na zona de medição.

As medidas do SMD do spray de biodiesel foram realizadas com o atomizador posicionado a 80 mm do detector, no qual o feixe de luz é formado, e com vazão de 173 cm³/min. Durante os testes, as pressões de injeção estiveram entre 4 bar e 10 bar, enquanto que a temperatura do combustível, na faixa entre 20°C e 125°C. Um equipamento de sucção posicionado à jusante do spray foi usado para evitar o retorno das gotas suspensas no ar, na tentativa de reduzir a interferência das gotas em fluxo reverso para a zona de medição.

3.3. Descrição do sistema de combustão

O sistema de combustão pode ser dividido em três componentes: o pré-aquecedor, o bloco injetor e a câmara de combustão. A Figura 4 exibe o sistema com a indicação dos três componentes, a configuração do queimador principal e o modo de fixação da câmara.

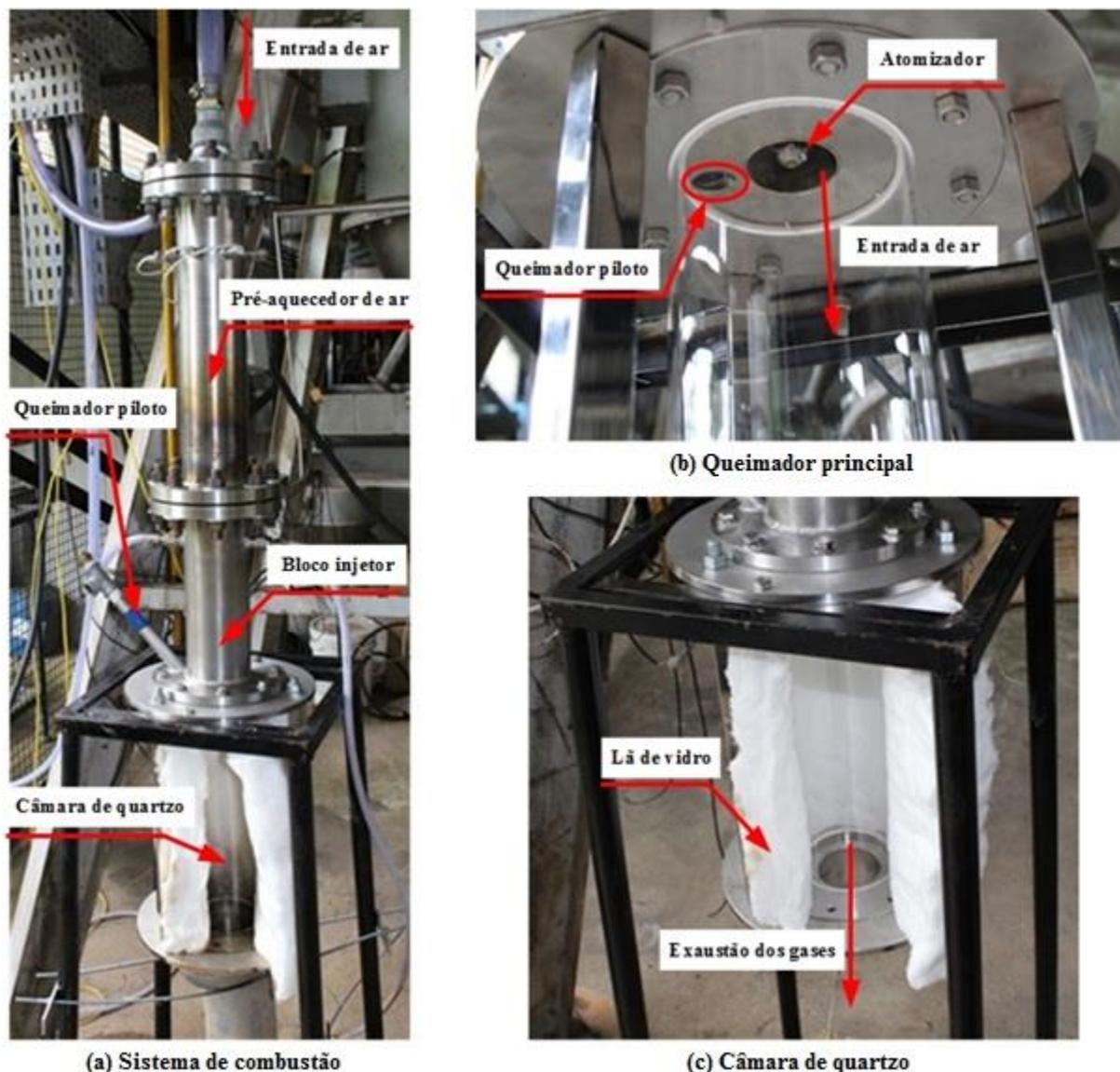


Figura 4. Componentes do sistema de combustão: (a) o sistema com os componentes, (b) o queimador principal e (c) a câmara de quartzo isolada com lã de vidro.

O pré-aquecedor é usado para aquecer o ar antes de entrar no sistema, permitindo fazer o controle da temperatura, de modo a simular um recuperador de calor com capacidade de pré-aquecer o ar até 700°C, operando com vazões de até 0,015 m³/s e pressões de até 3 bar. O bloco injetor possui o sistema de injeção de ar e combustível, o queimador piloto e o queimador principal. A câmara é um tubo de quartzo, cujas dimensões são 110 mm de diâmetro interno, 5 mm de

espessura de parede e 400 mm de comprimento, sendo caracterizada pela exaustão dos gases de combustão na extremidade oposta à posição na qual o ar e o combustível são injetados. Segundo Han e Mungal (2001), a distância mínima requerida para que um jato seja completamente desenvolvido é de treze vezes o diâmetro equivalente do ejetor. Sabendo disso, o comprimento da câmara foi definido, de modo que o jato possa se tornar completamente desenvolvido, permitindo aumentar a parcela da quantidade de movimento inicial do jato utilizada para recircular os gases quentes e, assim, resultar na magnitude da recirculação necessária para estabilizar o regime de combustão sem chama visível.

A Figura 4(a) ilustra o sistema montado na direção vertical com a exaustão voltada para baixo, a fim de evitar uma possível ocorrência de gotejamento de combustível nos resistores elétricos do pré-aquecedor e o acúmulo de combustível na face plana do queimador principal. A Figura 4(b) revela a configuração do queimador principal e o modo de fixação da câmara. A câmara de quartzo foi apoiada em duas camadas de papel cerâmico para reduzir os efeitos de dilatação térmica do aço inoxidável sobre o quartzo, além de ter sido centralizada com um anel centralizador e fixada na vertical com três suportes metálicos para evitar o deslocamento lateral, conforme a Fig. 4(c). O escape de gases pela exaustão foi assegurado pela alimentação contínua de ar através do sistema, cuja operação foi à pressão atmosférica.

A Figura 5 é um desenho esquemático da seção de corte A-A da vista lateral esquerda do sistema, no qual o pré-aquecedor foi suprimido para destacar o bloco injetor e a câmara de quartzo. O queimador piloto é um tubo de aço inoxidável através do qual um eletrodo é fixado para ignizar uma pré-mistura entre o ar e o gás natural, fornecendo a energia necessária para fazer a ignição do spray de biodiesel no início da operação no regime de queima convencional.

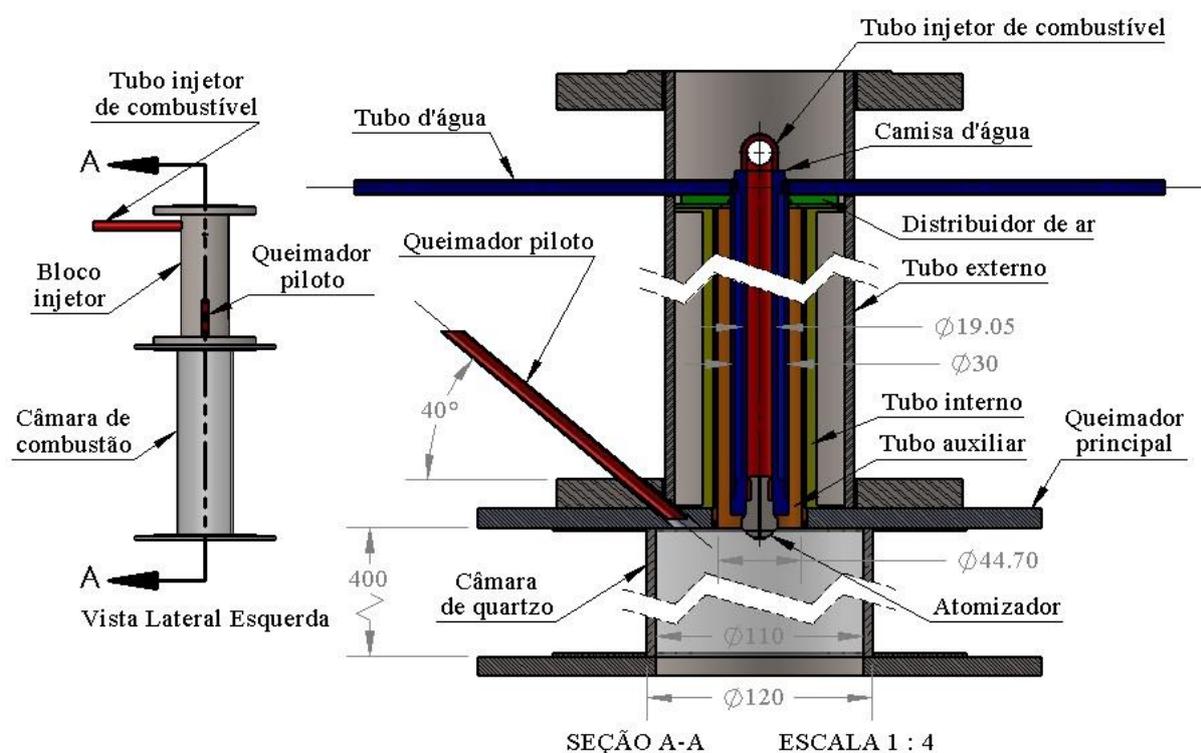


Figura 5. Desenho esquemático da seção de corte A-A da vista lateral esquerda do sistema de combustão.

A Figura 5 revela a configuração do bloco injetor e a posição relativa do queimador piloto, segundo um ângulo de 40 graus com a direção horizontal no sentido horário. O queimador principal compreende uma placa circular de aço inoxidável refratário de 300 mm de diâmetro e 10 mm de espessura. A placa recebe um arranjo tubular concêntrico entre um tubo de 19,05 mm de diâmetro externo (denominado tubo injetor) e um tubo de 44,70 mm de diâmetro interno (denominado tubo auxiliar). O tubo injetor conduz o combustível líquido sob pressão para o atomizador. O ar pré-aquecido é alimentado na região anular entre os dois tubos mencionados. Foi necessária a colocação de uma camisa d'água no tubo injetor de combustível para remover o calor transferido pelo escoamento de ar pré-aquecido nas vizinhanças. Assim, o tubo injetor encamisado obteve 30,0 mm de diâmetro externo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A etapa de realização dos experimentos de combustão foi antecedida pelos testes de atomização com o biodiesel. Na presente pesquisa, o biodiesel foi produzido pela reação de transesterificação de óleos vegetais anteriormente usados na fritura de alimentos com metanol. Nesta seção, os resultados obtidos nos testes de atomização do biodiesel e nos dos experimentos de combustão são apresentados e discutidos.

4.1. Atomização do biodiesel e aspectos visuais da chama

O processo de atomização resulta na formação de um spray polidisperso com gotas, cujos tamanhos influenciam a taxa de evaporação na interface gás/líquido. A taxa de evaporação e a temperatura dos gases quentes no interior da câmara determinam a ocorrência da autoignição. A autoignição é a ignição espontânea de uma mistura inflamável entre o oxidante e os vapores do combustível, quando as reações de oxidação se iniciam na própria mistura sem a necessidade de uma fonte externa de energia, resultando na propagação de uma chama. O intervalo de tempo decorrido antes da autoignição é denominado atraso de ignição, durante o qual os reagentes são misturados entre si e com os gases recirculados. Segundo Warnatz, Maas e Dibble (2006), para a mesma temperatura média dos gases, o atraso de ignição geralmente aumenta com o aumento do diâmetro médio da distribuição de gotas. Portanto, a atomização exerce um papel decisivo na estabilização do regime de combustão sem chama visível.

A combustão sem chama visível com combustíveis líquidos é alcançada, quando a temperatura dos gases quentes é suficientemente elevada (acima da temperatura de autoignição) e o processo de atomização resulta em uma distribuição adequada de tamanhos de gotas no spray, de modo que o aumento da taxa de evaporação das gotas mantenha uma mistura inflamável entre o oxigênio molecular e os vapores de combustível na mesma região durante um intervalo de tempo necessário para que a sequência de reações de oxidação possa levar a mistura diluída entre os reagentes à ignição sucessiva na própria mistura.

Os resultados dos testes de atomização indicaram que, à medida que a temperatura de pré-aquecimento do biodiesel aumenta, o SMD do spray diminui, em virtude da redução da viscosidade e da tensão superficial, mas a variação torna-se modesta a partir de 50°C, quando os efeitos da temperatura são menores. Por outro lado, o SMD do spray sofre uma redução mais acentuada com o aumento da pressão de injeção, devido ao maior fornecimento de energia mecânica para fazer a ruptura do filme líquido. Com base nos resultados dos testes, o valor de SMD a 40°C e 10 bar para o biodiesel esteve entre 36 e 40µm.

Durante a operação normal do sistema, a pressão de injeção adotada foi de 10 bar para reduzir a perda de simetria da chama obtida a partir do spray, enquanto que a temperatura do combustível dentro do tubo injetor encamisado se manteve praticamente constante a 40°C, medida com um termopar do tipo K posicionado próximo do atomizador. A Figura 6 compara a aparência da chama no regime de combustão convencional (a) com a aparência da chama no interior da câmara de quartzo (b) durante os experimentos com o ar pré-aquecido a 600°C e em elevados coeficientes de excessos de ar ($\lambda \geq 2,5$).

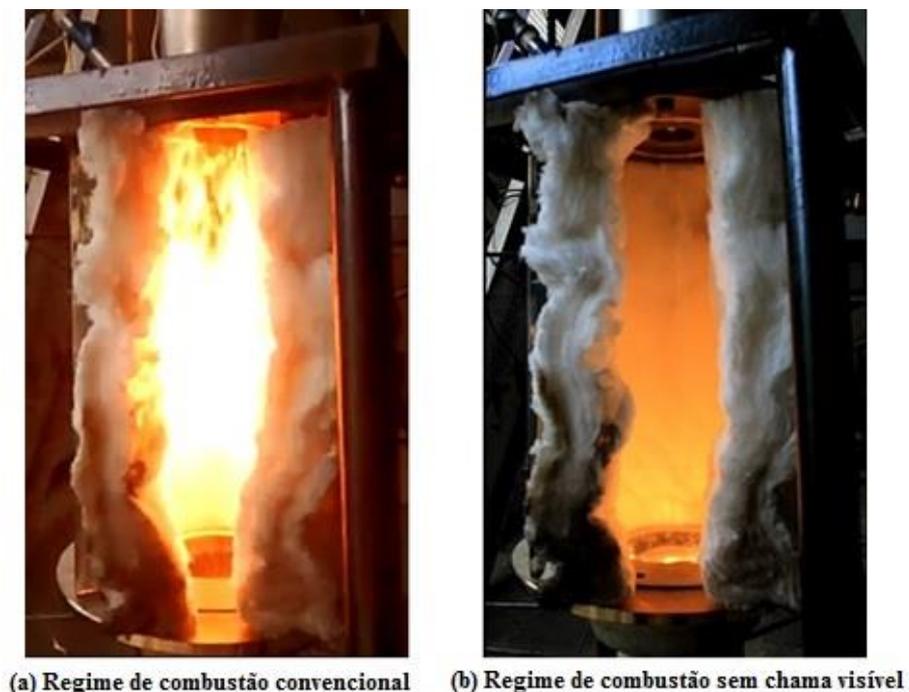


Figura 6. Comparação entre (a) o regime de combustão convencional e (b) o regime de combustão sem chama visível, fazendo a queima de biodiesel.

A Figura 6(a) exibe a operação do sistema com baixos excessos de ar, que resultou na presença de uma chama luminosa e amarelada, que se estendeu desde a injeção até a exaustão, apresentando as características típicas de uma chama com fuligem. Por outro lado, a Figura 6(b) revela que, em condições de elevados excessos de ar pré-aquecido a 600°C, os contornos de uma chama não puderam ser visualizados. Nestas condições, foram observados o aumento da intensidade de radiação térmica, a redução dos ruídos sonoros e a eliminação da fuligem. Apesar disso, a zona de combustão permaneceu levemente amarelada com uma redução acentuada de luminosidade, quando comparada com a

frente de chama no regime de combustão convencional. As observações experimentais indicaram também que, à medida que o excesso de ar foi reduzido, a luminosidade e o comprimento da chama aumentaram.

4.2. Análise das emissões gasosas

Nos testes de combustão, as variáveis manipuladas foram a temperatura de pré-aquecimento do ar e a vazão mássica de ar no sistema, mantendo a vazão e pressão de injeção do combustível. As temperaturas de pré-aquecimento do ar foram definidas em 300°C, 400°C e 600°C com o uso de um termopar do tipo K colocado na entrada da câmara e a partir da medição das temperaturas de entrada e saída da corrente de ar no pré-aquecedor. Nas condições em que os experimentos foram realizados, o coeficiente de recirculação interna dos gases (K_V) esteve entre 2,05 e 2,49.

Para cada experimento, o coeficiente de excesso de ar normalizado (λ) foi calculado a partir dos valores medidos das frações volumétricas de dióxido de carbono (CO_2) e oxigênio molecular (O_2) em base seca. As emissões de CO_2 e O_2 em diferentes valores de λ com o ar pré-aquecido a 400°C e 600°C foram utilizadas para determinar a composição elementar média do biodiesel por meio do ajuste da linha de Grebel aos dois conjuntos de dados. A fórmula química obtida para o biodiesel usado nesta pesquisa foi $\text{C}_{19}\text{H}_{38}\text{O}_2$. Foram realizadas também as observações quantitativas relativas às emissões de NO_x e CO em base seca para caracterizar o regime de combustão sem chama visível, operando com a queima de biodiesel.

4.2.1. Efeitos do excesso de ar

A Figura 7 apresenta as frações volumétricas de NO_x e CO corrigidas a 15% de O_2 nos gases de combustão em função do excesso de ar (λ) para três temperaturas de pré-aquecimento do ar. As emissões de NO_x aumentaram e as de CO (em escala logarítmica) diminuíram, à medida que λ aumentou nos três casos. As emissões de NO_x e CO foram inferiores a 50 ppm e 25 ppm @15% de O_2 , respectivamente, na operação com $\lambda \geq 2,5$ e o ar pré-aquecido a 600°C. Segundo Cerea, Derudi e Rota (2012), o regime combustão sem chama visível pode ser identificado em condições de operação nas quais as emissões de poluentes são muito pequenas, sendo que $\text{NO}_x < 30$ ppm e $\text{CO} < 50$ ppm.

As emissões de NO_x aumentaram com o pré-aquecimento do ar na faixa de valores de λ indicada na Fig.7(a), demonstrando que o mecanismo térmico de formação de NO permaneceu ativo, apesar da intensa taxa de recirculação dos gases ($K_V > 2$). As emissões de CO foram reduzidas com o pré-aquecimento do ar acima de 400°C para $\lambda > 2,3$, conforme a Fig.7(b). Isso significa que a temperatura dos gases na zona de combustão foi suficiente para formar os radicais hidroxila (OH), que são responsáveis pela oxidação do CO, e que a taxa de recirculação dos gases na câmara foi suficientemente elevada para promover a distribuição dos radicais OH e, assim, favorecer a taxa de oxidação do CO.

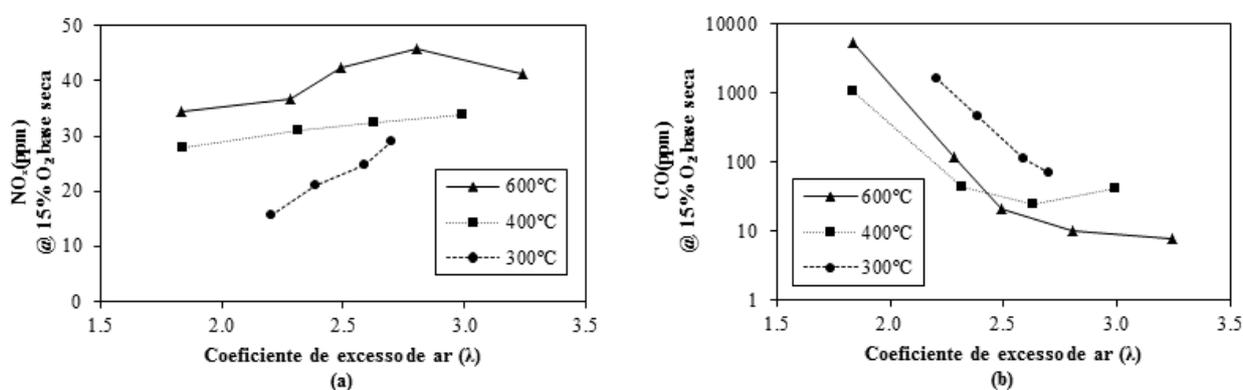


Figura 7. Gráficos de NO_x (a) e CO (b), ambos em ppm, em função de λ para diferentes temperaturas do ar.

Por outro lado, os autores Reddy *et al.* (2014) relataram que as emissões de NO_x e CO foram reduzidas com o aumento da temperatura de pré-aquecimento do ar durante a operação de um combustor de dois estágios em condições pobres. Para o ar pré-aquecido a 400°C, as emissões de NO_x foram reduzidas abaixo de 100 ppm com o aumento de λ , enquanto que as emissões de CO estiveram acima de 1500 ppm numa ampla faixa de valores de λ menores do que 2,2.

Para baixos excessos de ar, houve o escape da chama pela exaustão e as emissões de CO aumentaram rapidamente, conforme indica a Fig.7(b). A presença de uma chama nítida com emissões elevadas de CO e de fuligem foram usados para estabelecer uma referência ao regime de combustão convencional, de modo a distinguir comparativamente as características típicas do regime de combustão sem chama visível durante a operação com excessos de ar elevados.

4.2.2. Efeitos da temperatura de pré-aquecimento do ar

A Figura 8 descreve a relação entre a temperatura de pré-aquecimento do ar e as frações molares de NO_x e CO corrigidas a 15% de O_2 para $\lambda = 2,6$ constante. Os resultados dos experimentos revelaram uma tendência de aumento

das emissões de NO_x , à medida que a temperatura de pré-aquecimento do ar aumentou de 300°C para 600°C , reforçando a condição hipotética de ainda haver alguns picos elevados de temperatura, responsáveis pela formação de NO_x via mecanismo térmico, apesar da intensa taxa de recirculação dos gases na câmara de quartzo. Por outro lado, as emissões de CO foram reduzidas abaixo de 30 ppm @ 15% de O_2 com o aumento da temperatura de pré-aquecimento do ar, que favorece a taxa de oxidação do CO a CO_2 pela formação de uma maior quantidade de radicais OH em uma zona de combustão volumetricamente distribuída.

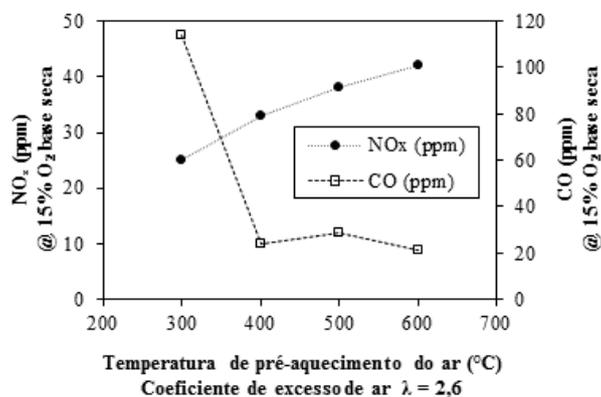


Figura 8. Emissões de NO_x e CO, ambos em ppm, em função da temperatura do ar para $\lambda = 2,6$ constante.

A partir da Figura 8, nota-se que os efeitos da temperatura de pré-aquecimento do ar tornam-se menos relevantes, quando as concentrações de O_2 na zona de combustão são reduzidas. A intensificação da taxa de recirculação dos gases no interior da câmara resulta no aumento da diluição do O_2 e na atenuação dos picos de temperatura, podendo ocorrer inclusive a redução do tempo de residência dos gases na zona de combustão. Como resultado, as emissões de NO_x tornam-se pequenas, abaixo de 45 ppm @ 15% de O_2 , conforme indicadas na Fig.8.

5. CONCLUSÕES

A presente pesquisa envolveu o projeto e o desenvolvimento de uma bancada experimental em escala de laboratório com a queima de combustíveis líquidos, bem como a coleta e a análise das emissões gasosas. Os autores concluíram que o sistema de combustão permite estabelecer uma faixa de valores do coeficiente de recirculação interna dos gases com o aumento da vazão mássica de ar na entrada da câmara, podendo operar em vários regimes de combustão, inclusive no regime de combustão sem chama visível. Os experimentos demonstraram que o sistema de combustão foi capaz de operar em condições típicas do regime de combustão sem chama visível com o uso de biodiesel. As emissões NO_x e CO foram pequenas, quando a operação do sistema foi conduzida em excessos de ar elevados e com temperaturas de pré-aquecimento do ar acima de 400°C , uma vez que o regime de combustão sem chama visível requer elevadas temperaturas dos reagentes acima da temperatura de autoignição da mistura final entre os vapores de combustível, o oxigênio molecular e os gases recirculados e um campo de temperaturas favorável no interior da câmara.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro recebido do projeto Universal CNPq 471342/2013-0 e do Processo FAPESP 2012/12374-0. Todas as etapas da pesquisa foram realizadas no Laboratório de Combustão e Propulsão no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais em Cachoeira Paulista.

7. REFERÊNCIAS

- Arghode, V. K., Gupta, A. K. and Yu, K. H., 2009. "Colorless Distributed Combustion (CDC): Effect of Flowfield Configuration", Aerospace Sciences Meeting, 47th, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Orlando.
- Cerea, M., Derudi, M. and Rota, R., 2012. "Preliminary Study on Mild Combustion Characteristics of a Liquid Biofuel", 35th Meeting of the Italian Section of the Combustion Institute, Milano, pp. 1-6.
- Energy and Climate Change, 2015. "World Energy Outlook Special Briefing for COP 21". Paris: ©OECD/International Energy Agency, 7 p. Disponível em: < <http://www.worldenergyoutlook.org/> > Acesso em: 24 mar. 2016.
- Han, D. and Mungal, M. G., 2001. "Direct Measurement of Entrainment in Reacting/Nonreacting Turbulent Jets", Combustion and Flame, New York, Vol. 124, pp. 370-386.
- Hasegawa, T., 2000. "Environmentally-compatible Regenerative Combustion Heating System", International Seminar on High Temperature Combustion, 2nd, Tokyo: Nippon Furnace Kogyo, Stockholm.
- Li, P., Mi, J., Dally, B. B., Wang, F., Wang, L., Liu, Z., Chen, S. and Zheng, C., 2011. "Progress and recent trend in MILD combustion", Science China Technological Sciences, Vol. 54, pp. 255-269.

- Niessen, W. R., 2010, "Combustion and Incineration Processes: Applications in Environmental Engineering", CRC Press Taylor & Francis Group, Andover, Fourth Edition, Chapter 6, 199-246 p.
- Milani, A. and Saponaro, A., 2001. "Diluted Combustion Technologies", IFRF Combustion Journal, pp. 2-32.
- Reddy, V. M., Biswas, P., Garg, P. and Kumar, S., 2014. "Combustion characteristics of biodiesel fuel in high recirculation conditions", Fuel Processing Technology, Vol. 118, pp. 310-317.
- Tanaka, R., 1995. "New Progress of Energy Saving Technology Toward the 21st Century", Proceedings of IFRF Members Conference, 11th, Frontier of Combustion & Heat Transfer Technology, Noordwijkerhout.
- Tsuji, H., Gupta, A. K., Hasegawa, T., Katsuki, M., Kishimoto, K. and Morita, M., 2003. "High Temperature Air Combustion: From Energy Conservation to Pollution Reduction", CRC Press LLC, Florida, 401 p.
- Veríssimo, A. S., Rocha, A. M. A. and Costa, M., 2011. "Operational, Combustion, and Emission Characteristics of a Small-Scale Combustor", Energy & Fuels, Lisboa, Vol. 25, pp. 2469-2480.
- Warnatz, J., Maas, U. and Dibble, R. W., 2006, "Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation", Springer-Verlag, Heidelberg, Germany, 378 p.
- Weber, R., Smart, J. P. and Kamp, W. V., 2005. "On the (MILD) combustion of gaseous, liquid, and solid fuels in high temperature preheated air", Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 30, No. 2, pp. 2623-2629.
- Wünning, J. A. and Wünning, J.G., 1997. "Flameless oxidation to reduce thermal NO – formation", Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 23, pp. 81-94.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores Edson Orati da Silva, Anton Skyrda Veríssimo, Ana Maura Araujo Rocha, Ely Vieira Cortez, Fernando Costa, Hélcio José Izário Filho e João Andrade de Carvalho Junior são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

EXPERIMENTAL STUDY OF BIODIESEL COMBUSTION UNDER FLAMELESS COMBUSTION REGIME

Edson Orati da Silva, eng.orati@gmail.com¹
Anton Skyrda Veríssimo, antonskyrda@yahoo.com.br¹
Ana Maura Araujo Rocha, maurarocha@hotmail.com²
Ely Vieira Cortez, evcortez@lcp.inpe.br²
Fernando de Souza Costa, fernando@lcp.inpe.br²
Hélcio José Izário Filho, helcio@dequi.eel.usp.br³
João Andrade de Carvalho Junior, joao@feg.unesp.br¹

¹São Paulo State University Júlio de Mesquita Filho – UNESP, Ariberto Pereira da Cunha Avenue, 333, Pedregulho, Guaratinguetá, SP, Brazil,

²National Space Research Institute – INPE, Combustion and Propulsion Associated Laboratory, Presidente Dutra Road, km 40, Cachoeira Paulista, SP, Brazil,

³São Paulo University – USP, Lorena Engineering School, Chemical Engineering Department, Itajubá-Lorena Road, km 74,5, Campinho, Lorena, SP, Brazil.

Abstract. *The present research aims to develop a laboratory scale experimental setup that is capable of operating under various combustion regimes, including the flameless combustion regime by burning liquid fuels, in particular, biodiesel. Flameless combustion is a technology based on the internal recirculation of hot flue gases to preheat and dilute the molecular oxygen in order to minimize the occurrence of hot spots in the flame regions as well as to inhibit the thermal mechanism for NO_x formation. As a result, the oxidation reactions take place slowly and the combustion zone becomes largely distributed over the combustion chamber volume with lower temperature gradients. The technology is more efficient, leading to reduce carbon emissions. The system was designed to operate on different recirculation rates of flue gases inside the chamber with the increase of the air mass flow and the air preheating temperature with the aim of stabilizing the flameless combustion regime. The internal flue gas recirculation coefficient was in the range between 2,05 and 2,49. The experimental outcomes pointed out that the system operation on high excess air preheated at 600°C fits the typical flameless combustion conditions. Under such conditions, the flame boundaries were not distinguished, the noise levels were reduced, the soot emissions were eliminated and the NO_x and CO emissions were considerably low. On the other hand, the system operation with low excess air resulted in the presence of a luminous and yellowish flame with high soot emissions together with an elevated increase of CO emissions that are the conventional diffusive flame characteristics. Therefore, the developed system operates under flameless combustion regime by burning biodiesel fuel at high excess air and with air preheating temperatures above 400°C.*

Keywords: 1. flameless combustion, 2. biodiesel, 3. pollutant emissions, 4. pressure swirl atomizers, 5. CO₂ reduction.