



NOVAS TECNOLOGIAS DE COMBUSTÃO INDUSTRIAL¹

Pedro Teixeira Lacava²
Dener Silva de Almeida³
Julio Cesar Ságas⁴
Fernando Lima de Oliveira⁵

Resumo

Quase 80% da energia utilizada no mundo é proveniente dos processos de combustão, incluindo transporte, atividades industriais, geração de energia elétrica e uso doméstico. Apesar das formas alternativas de geração de energia, como hidráulica e nuclear, a dependência da sociedade com a energia térmica liberada nos processos de combustão, ainda acontecerá durante diversas décadas. O ponto negativo é a emissão de poluentes dos dispositivos de combustão. Nesse contexto, o presente trabalho comenta sobre novas tecnologias que podem minimizar as emissões de poluentes e aumentar a eficiência térmica dos processos, especialmente as em desenvolvimento no Laboratório de Combustão Propulsão e Energia do ITA

Palavras-chave: Emissão de poluentes; Novas tecnologias de combustão.

NEW TECHNOLOGIES FOR INDUSTRIAL COMBUSTION

Abstract

Almost 80% of energy utilized in the world comes from the combustion process, including the transport, industrial processes, electrical energy generation, and domestic uses. In the spite of the alternative forms of energy generation, for example, hydraulic and nuclear, the society dependence of the thermal energy from combustion process will happen during several decades. The negative point is the pollutants emissions from the combustion devices. In this context, the present work comments new combustion technologies that can minimize the pollutant emissions and improve the thermal efficiency of the process, especially that ones in development in the Laboratory of Combustion, Propulsion and Energy of ITA.

Keywords: Pollutant emissions; New combustion technologies.

¹ *Contribuição técnica ao 33º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 27º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 22 a 24 de agosto de 2012, Belo Horizonte, MG.*

² *Eng. Mecânico. Professor Adjunto – Instituto Tecnológico de Engenharia Aeronáutica – ITA*

³ *Eng. Mecânico. Pesquisador – Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA*

⁴ *Físico. Doutorando – Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA*

⁵ *Eng. Mecânico. Professor – Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, Doutorando – Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA*



1 INTRODUÇÃO

Conforme apresentado em Borman e Ragland⁽¹⁾ já em 1860 a combustão apresentava um papel importante no cotidiano humano. Desde então, a forma de utilização da energia térmica e os tipos predominantes de combustível foram se modificando, mas a importância da combustão não. Antes da revolução industrial, a biomassa, liderada pela queima de madeira, era principal fonte de energia. Com a revolução industrial e o descobrimento acentuado das minas de carvão, a utilização desse combustível tornou-se cada vez mais crescente. No início do século vinte, devido principalmente pelo uso automotivo, os derivados do petróleo passaram a ser fundamental para economia de muitos países. Na década de quarenta, amplia-se o uso de gás natural e de outras formas de energia não dependentes da combustão, como a hidráulica e a nuclear. Contudo, hoje, pode-se contextualizar a combustão como: fonte primária de energia térmica para diversos processos, representa 80% da energia primária consumida no mundo (setor de transporte, geração de energia elétrica, uso industrial e uso doméstico) e apresenta como contrapartidas negativas o preço dos combustíveis e as emissões de poluentes.⁽²⁾

Por outro lado, a maneira como o homem e a sociedade lidam com os processos de combustão tem evoluído, a saber:

- até década de 1960: cumprir com as necessidades do processo, sem muita preocupação com a eficiência energética e emissões de poluentes, o preço do combustível, principalmente os derivados do petróleo, eram baixos se comparados com os valores atuais e não haviam restrições e conscientizações sobre impactos ambientais;
- década de 1970: redução do consumo de combustível (crise do petróleo), busca de processos mais eficientes, pouca ação sobre restrições de emissões;
- década de 1980: redução das emissões de poluentes de efeito local (NO_x, CO, UHC, SO₂, particulados, etc.), impactos próximos à fonte emissora;
- década de 1990: redução das emissões de CO₂ e outros gases de efeito estufa; e
- atualmente: eficiência energética (conceito de melhor aproveitamento da energia térmica com baixas emissões), mercado ininterrupto de energia e maior inserção de combustíveis de biomassa.

Assim exposto, as novas tecnologias de combustão necessariamente passam por conciliar melhor eficiência energética, emissões de poluentes e o próprio desempenho do processo que necessita da energia térmica liberada. Essa tarefa não é simples; pois, muitas vezes os parâmetros envolvidos se comportam como contraditórios durante um processo. Uma situação usual encontrada pelos projetistas de novas tecnologias de combustão e conciliar as emissões de poluentes de oxidação parcial como, monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos não queimados (UHC) e fuligem com os óxidos de nitrogênio (NO_x: NO + NO₂). Os poluentes de oxidação parcial na maioria das vezes surgem decorrente de uma qualidade inadequada da mistura entre combustível e oxidante e a temperatura mais elevada pode reduzir as emissões desses, pois aceleram os seus mecanismos reacionais de conversão. Por outro lado, a formação de NO_x, salvo elevadas quantidades de nitrogênio no combustível, ocorre devido a um mecanismo térmico envolvendo a oxidação do nitrogênio em elevadas temperaturas. Assim, as técnicas modernas de combustão devem controlar a temperatura para evitar um nível



proibitivo de emissões de NO_x , mas ao mesmo tempo precisam criar mecanismos para intensificar a misturas dos reagentes para evitar a os poluentes de oxidação parcial.

Dentro desse contexto, o objetivo do presente trabalho é comentar sobre as tecnologias que estão sendo estudas no Brasil, particularmente no Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, para tentar conciliar o uso da combustão em um ambiente mais limpo.

2 COMBUSTÃO SEM CHAMA VISÍVEL - FLAMELESS

A presente seção apresenta uma investigação experimental em um sistema projetado para operar no regime de Combustão sem Chama Visível, ou *Flameless* na língua inglesa. Neste caso, foi projetado e construído um modelo de câmara e de queimador de escala laboratorial que atendesse aos requisitos deste regime. Nesta configuração a entrada dos reagentes e a saída dos gases de combustão ocorrem pela mesma face do queimador, fazendo com que haja uma mistura entre os reagentes e parte dos gases de combustão em recirculação. Durante os experimentos usou-se como combustível o gás natural e como oxidante o ar pré-aquecido. Foram feitas medidas da distribuição de temperatura na câmara em função do tempo de operação, das vazões de combustível e ar, e emissões de NO_x , CO e UHC. A Figura 1 apresenta um esquema do queimador e combustor de escala laboratorial.

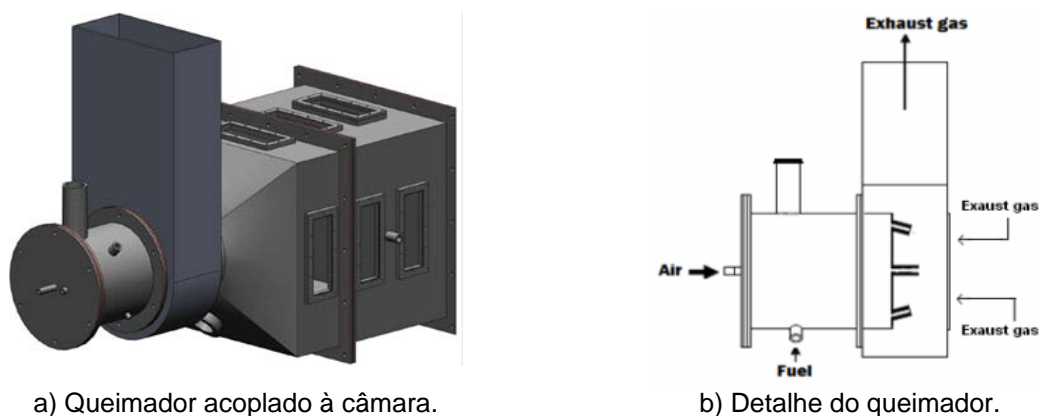


Figura 1. Esquema do queimador *flameless* desenvolvido no ITA.

Diferentemente do que ocorre na chama convencional, uma importante característica da combustão *flameless* é que o oxidante não se mistura diretamente com combustível antes da reação. Ou seja, primeiramente o oxidante se mistura com os gases de exaustão que estão em recirculação dentro da câmara. Após ocorre a mistura com o combustível injetado, neste caso, no centro da câmara, dando origem à zona de reação distribuída. A partir deste momento a chama não pode ser mais vista e a combustão é, na maior parte, distribuída através do volume da câmara de combustão. Isto permite uma baixa temperatura de chama e baixa pressão parcial de oxigênio dentro da zona de reação, e como resultado disto haverá uma baixa formação de NO_x .^(3,4) A Figura 2 (a) apresenta as curvas de temperatura em função das razões de equivalência (razão entre as razões de vazão de combustível e ar para a combustão estequiométrica e para operação em questão). Nota-se que para uma determinada faixa de razão de equivalência a situação de *flameless* é atingida e os valores de temperatura dos termopares

distribuídos pela câmara tornam-se muito próximos. A Figura 2 (b) mostra que quando regime *flameless* é atingido as emissões dos poluentes medidos são reduzidas. A Figura 3 apresenta fotografias das janelas da câmara para se observar a presença ou não de chama visível durante a combustão. A não emissão quimiluminescente é decorrente da temperatura ser mais baixa.

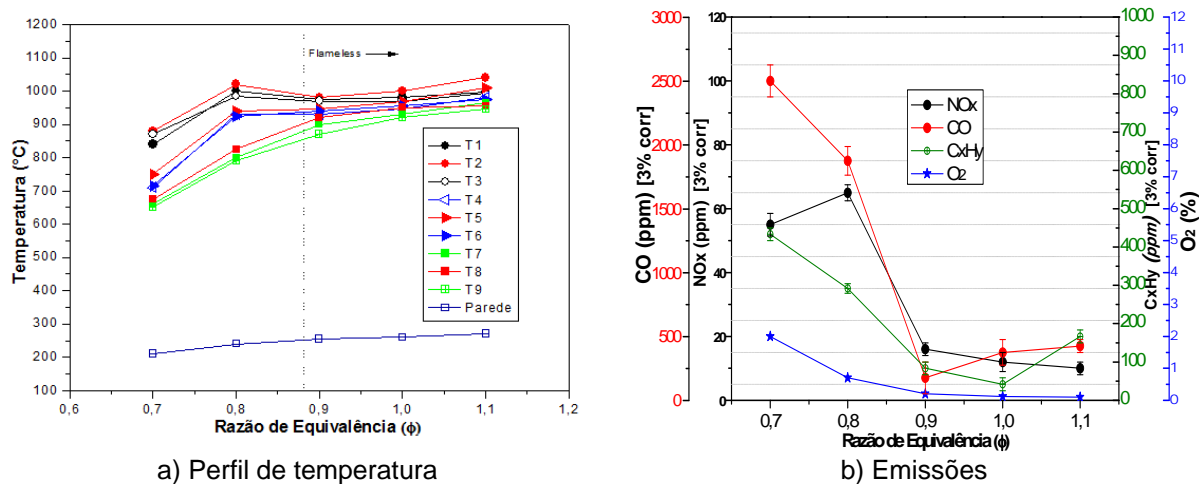


Figura 2. Distribuição de temperatura ao longo do combustor (a), emissões de gases de exaustão (b).



(a) Combustão convencional



(b) Combustão Flameless

Figura 3. Regimes de Combustão.

3 COMBUSTÃO ASSISTIDA A PLASMA

Entende-se por combustão assistida por fonte de plasma o processo de queima de um combustível, ou de vários combustíveis, que apresenta como característica principal o fato de uma parcela de combustível ser dirigida para uma região de descarga elétrica, com a presença de grande quantidade de elétrons energéticos, que colidirão com moléculas neutras, provocando a formação de radicais livres, moléculas energizadas, estados excitados e fótons.⁽⁵⁾

O desenvolvimento apresentado nessa seção é sobre um combustor de baixa emissão de NO_x assistido por uma tocha de plasma tipo vortex. Nesse sistema, parte do combustível (gás natural – GN) é injetada no centro do combustor (50%) e uma chama piloto é estabelecida. No lado oposto, ar e combustível são injetados não pré-misturados e tangenciais a parede do combustor. Então, os escoamentos são forçados a um movimento rotacional em direção da chama piloto, onde uma mistura extremamente pobre é ignitada pela energia liberada pela chama piloto. A Figura 4 mostra esquematicamente a geometria do combustor e como se dão os escoamentos no seu interior. Essa configuração de câmara promove baixíssimas emissões de NO_x ; contudo, as emissões de CO pode aumentar drasticamente



quando se comparada com processos convencionais de combustão. Provavelmente a alta emissão de CO é consequência da baixa temperatura na zona pobre de combustão, reduzindo a velocidade das reações do mecanismo de oxidação do hidrocarboneto.

Uma alternativa para acelerar a oxidação do hidrocarboneto na região pobre é a injeção o combustível piloto através da tocha de plasma votex (*gliding arc discharge*), que opera em regime transacional, atingindo elevada densidade de elétrons e alto grau de não equilíbrio.⁽⁶⁾ Esse tipo de descarga permite a excitação dos níveis energéticos: rotacional e vibracional, favorecendo a ocorrência de espécies químicas específicas. A Figura 5 apresenta o reator a plasma vortex utilizada nesse trabalho.

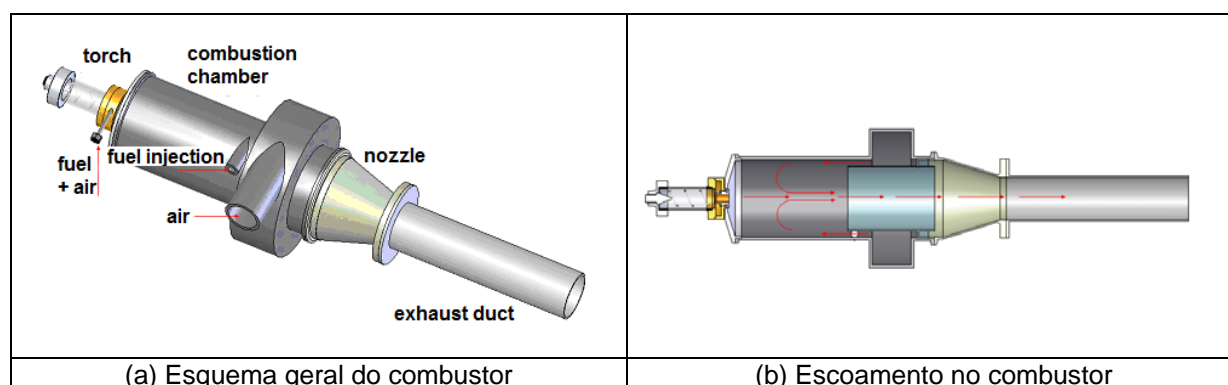


Figura 4. Esquema do combustor.

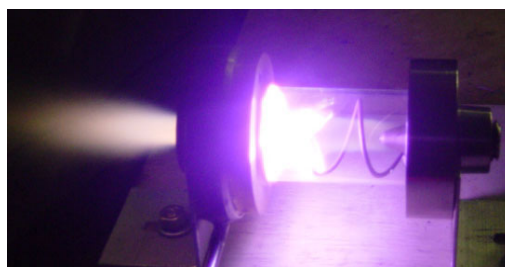


Figura 5. Operação da tocha com mistura ar/gás natural.

Os experimentos foram conduzidos em uma condição estabelecida como padrão: escoamento pré-misturado de 1g/s de NG e 2 g/s de ar através da tocha (com ou sem plasma), 1g/s de GN e 137g/s de ar injetados diretamente no combustor. A razão de equivalência global é de 0,25 e o plasma operando a 4kV e 400 mA. Os resultados mostram as emissões de NO_x são extremamente baixas, menos de 10 ppm; contudo a emissão de CO é consideravelmente alta. Quando a tocha de plasma é acionada, a emissão de NO_x não muda consideravelmente, mas a emissão de CO reduziu cerca de 50%. A Tabela 1 resume os resultados.

Tabela 1 Emissões de gases de combustão

Condição de operação	Emissões*			
	O ₂	CO ₂	CO	NO _x **
sem plasma	17,3%	2,7%	499 ppmv	<10 ppmv
com plasma	17,3%	2,8%	255 ppmv	<10 ppmv

* Emissões em base seca; **Emissões de NO_x foram menos de 10 ppmv, que é a sensibilidade do analisador de gás.



A análise dos gases provenientes da tocha através de um espectrômetro de massa, apresentada na Figura 6, mostra que em adição das espécies esperadas N_2 , O_2 e CH_4 , existe forte presença de H_2 . A injeção de H_2 direta na combustão pobre pode acelerar as reações pelo mecanismo de oxidação do próprio H_2 , que produz espécies hydrogenadas. Assim, a conversão de CO para CO_2 será muito mais rápida através de reações com espécies hydrogenadas (ex: OH), como consequência haverá redução de CO .

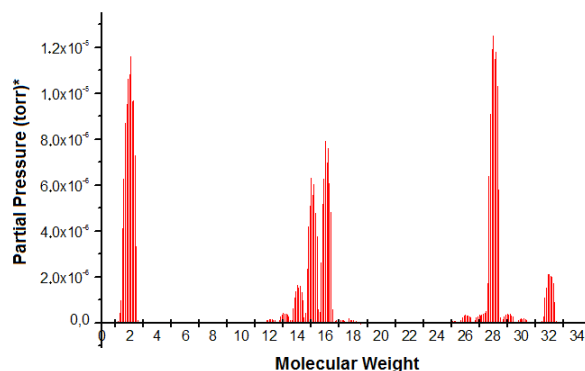


Figura 6. Espectroscopia de massa para os gases produzidos pela tocha.

5 CONCEITO ALTERNATIVO DE COMBUSTÃO RQL

Uma das possíveis técnicas de controle alternativo para as emissões de NO_x é o uso de combustores RQL (*Rich-Quench-Lean* na língua inglesa), ou seja, um processo de queima inicialmente rico, seguido de extinção e uma queima posterior pobre. Apesar desta técnica ainda não ser amplamente utilizada, ela apresenta um grande potencial para o controle da emissão de NO_x , podendo atingir uma redução de até 60%, desde que alguns problemas operacionais sejam resolvidos e é exatamente neste contexto que se concentra a presente proposta de câmara de combustão.

O conceito RQL utiliza a combustão estagiada para atingir baixos níveis de emissão de NO_x . A combustão se inicia em uma zona primária rica em combustível que diminui a formação de NO através da redução de temperatura e disponibilidade de oxidante. As reações de oxidação do hidrocarboneto ocorrem rapidamente nessa região, consumindo logo o oxigênio disponível e impedindo a formação do NO . Quando os produtos de combustão da zona primária rica emergem dessa região, jatos de ar rapidamente reduzem a temperatura desse gás até um nível de temperatura, que apesar da agora disponibilidade de oxidante, é desfavorável à formação de NO . A transição de uma zona de combustão rica em combustível para uma zona de combustão pobre (excesso de oxidante) deve acontecer rapidamente para prevenir a formação do NO_x . A habilidade de atingir uma mistura quase que instantânea entre o ar injetado a jusante da zona primária e os produtos de combustão rica, ou seja, a rápida extinção de um processo de combustão e o início de outro, é a chave do sucesso do conceito RQL. A Figura 7 (a) esquematiza esse conceito.⁽⁷⁾

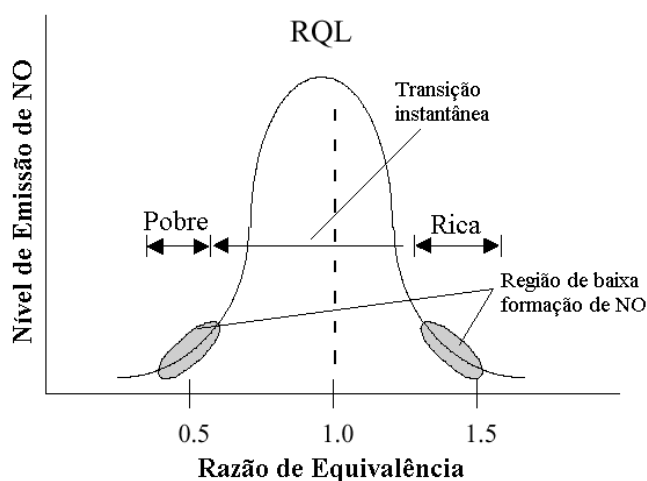
Apesar do conceito ser bastante interessante para controlar a emissão do NO_x , ele esbarra em alguns problemas operacionais, que são listados na sequência):

- Teoricamente a zona primária de combustão rica está limitada à razão de equivalência de até aproximadamente 1,5, pois acima disso o nível de formação de fuligem nessa região seria proibitivo. No entanto, na prática, mesmo para valores de razão de equivalência dessa ordem nota-se

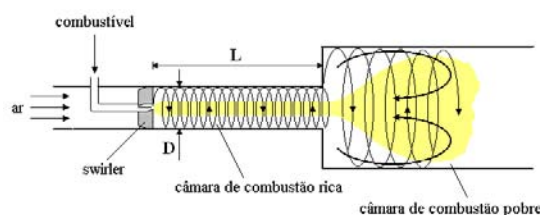


elevada formação de fuligem nessa região, principalmente nas imediações do injetor de combustível, onde há uma maior deficiência de mistura entre o combustível o oxidante.

- Em função dessa elevada presença de fuligem na zona primária, a taxa de transferência de calor para parede da câmara aumenta consideravelmente, necessitando que o sistema de refrigeração da câmara seja bem mais complexo. Esse problema é considerado um dos mais críticos desse tipo do combustor.
- Maior complexidade para adição do ar proveniente do compressor que irá participar da combustão, pois há necessidade de que a injeção de ar seja estagiada. Além disso, o ar que é adicionado entre a duas regiões de queima, precisa propiciar um elevado nível de turbulência para que a transição entre os regimes de combustão seja quase instantânea.
- A combustão na região pobre precisa ter uma distribuição de temperatura, praticamente homogênea. Desta forma, a taxa de mistura entre os reagentes, ou seja, entre os gases de combustão proveniente da zona primária rica e o ar adicionado, deve ser elevada; caso contrário surgirão “bolsões” de temperatura elevada na região de combustão pobre.



(a) Conceito RQL



(b) Proposta de configuração ITA

Figura 7. Conceito do combustor RQL e geometria proposta para o ITA.

O objetivo da presente proposta de câmara é o de uma configuração alternativa para câmaras RQL que minimize os problemas operacionais listados. Nesta nova configuração, o combustível e o ar não seriam injetados de forma estagiada como na configuração convencional, mas ambos em uma mesma câmara primária. Contudo, a maneira de injeção dos reagentes é que irá propiciar um controle da quantidade de ar que se misturará com o combustível e irá conduzir o processo de combustão rica. O restante do ar que não participa da combustão rica formará um *film cooling* entre a chama rica e a parede da câmara.⁽⁸⁾ A Figura 7 (b) apresenta um esquema de como seria essa configuração. O ar combustível é injetado em uma lança central e todo ar que irá participar do processo global de combustão é forçado a passar por um *swirler*, cuja função é criar no escoamento uma componente tangencial de velocidade forte. O diâmetro da coroa do *swirler* tem o mesmo diâmetro da câmara; desta forma, o escoamento de ar ao emergir do *swirler* com a componente tangencial de velocidade extremamente elevada, têm a tendência de se concentrar



entorno da parede cilíndrica da zona primária, apenas uma pequena parte desse escoamento irá se interar com jato de combustível que ocupa a região central da câmara, formando uma chama com combustão rica. Por outro lado, o restante do ar que escoava concentrado nas proximidades da parede da câmara formará o *film cooling* de proteção dessa parede. Ao término dessa zona primária de combustão rica, o diâmetro da câmara aumenta e o escoamento rotativo de ar perde o efeito parede e rapidamente tende a se expandir na direção radial, criando uma zona de baixa pressão na região central da câmara. Essa zona de baixa pressão faz com que boa parte do escoamento de ar se reverta rapidamente, ou seja, cria uma intensa zona de recirculação, misturando rapidamente o ar remanescente com os produtos de combustão da zona rica (efeito *quench*). A zona de recirculação ainda tem o papel de criar uma mistura homogênea de combustão pobre, através da intensa mistura entre os reagentes. A Figura 8 apresenta uma fotografia da câmara de combustão e uma fotografia da chama formada em condição não confinada na zona secundária.



(a) Fotografia do Experimento



(b) Fotografia da chama não confinada

Figura 8. (a) esquema geral da montagem, (b) fotografia da chama formada não confinada.

A Figura 9 mostra os resultados para emissão de CO e NO_x para vários ângulos entre as pás do *swirler*, várias razões de equivalência (F), número de Reynolds do jato de combustível $Re = 15.000$ e razão entre comprimento e diâmetro da zona primária igual $L/D = 3$. Nota-se que as emissões de CO reduzem consideravelmente para razões de equivalência acima de 0,6 e que o aumento do ângulo também ajuda nessa redução. Quanto à emissão de NO_x, também nota-se que baixos valores foram obtidos, menores que 35 ppm.

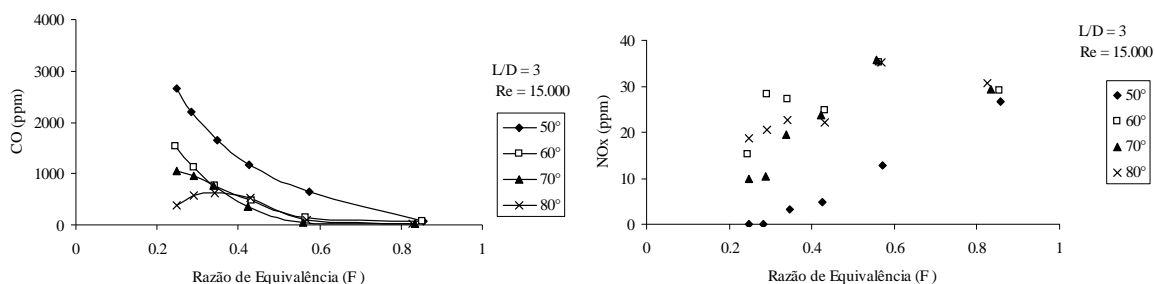


Figura 9. Emissões de CO e NO_x para o combustor RQL.

6 COMBUSTÃO PULSANTE

Na categoria de poluentes de oxidação parcial, em dispositivos onde na zona de combustão existem regiões com deficiência local de oxidante e elevada temperatura, há formação de particulados com tamanho inferior a 0,1 μm (96% de carbono e 4%



como hidrogênio, oxigênio e outros constituintes), denominados por fuligem (soot na língua inglesa). Formação de fuligem está associada a complexas reações de craqueamento dos hidrocarbonetos (reações em fase gasosa que geram núcleos condensados sólidos) que competem com o mecanismo de oxidação do hidrocarboneto. Devido a seu reduzido tamanho as partículas de fuligem dispersão com o movimento do ar atmosférico e causam: ataque aos pulmões (problemas respiratórios); alteram os níveis de radiação solar que atingem o solo (alteram a temperatura do solo e, em razão disso, influenciam o crescimento das plantas); reduzem a visibilidade, podem conter compostos cancerígenos. Mesmo que em um determinado processo haja intensa formação de fuligem, boa parte dela pode ser consumida em regiões posteriores de combustão se houver maior penetração de oxidante e temperatura elevada. Desta forma, recomenda-se que haja uma intensa mistura entre os reagentes durante a combustão evitar a sua formação ou ajudar sua supressão.⁽²⁾

Uma maneira de se obter uma intensa mistura entre os reagentes é através de uma excitação acústica no processo de combustão, também chamada de combustão pulsante, que é definida como o processo de queima que apresenta como característica principal o fato das variáveis de estado que descrevem as condições na zona de queima ocorrerem sob condições oscilatórias, isto é, mudando periodicamente com tempo. A condição pulsada pode ser alcançada por algum dispositivo que induz oscilações ao escoamento, como, por exemplo, um alto-falante estrategicamente posicionado no queimador ou na própria câmara de combustão.

A presença das oscilações aumenta a taxa de mistura entre o combustível e o oxidante, o que favorece a menor emissão dos poluentes de oxidação parcial, CO, UHC e fuligem e aumenta a eficiência de combustão, conseqüentemente, diminui o consumo de combustível. Para apresentar o potencial dessa técnica, a Figura 10 mostra o comportamento da presença da fuligem na chama em diferentes alturas e no eixo de centro de um queimador de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP). A chama foi excitada por um alto-falante na frequência de 650 Hz e em diferentes amplitudes (pressão acústica). Para detectar a presença de fuligem utilizou-se a técnica de incandescência induzida por laser e o sinal observado pelo sistema é em mV. Nota-se que acima de 32,5 mbar não há mais presença de fuligem na chama. Visualmente também é possível notar que há uma transformação acentuada na estrutura da chama, de uma situação amarelada fuliginosa, para uma chama azulada e sem presença de fuligem.

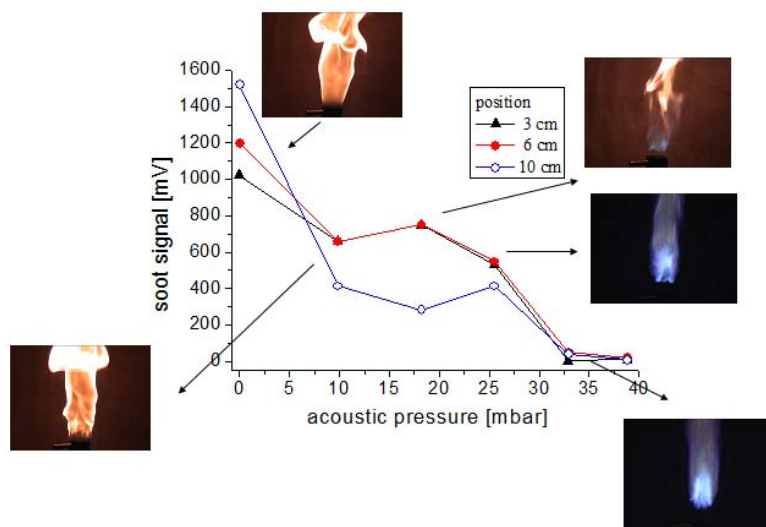


Figura 10. Efeito da excitação acústica na presença de fuligem em uma chama.

Alguns trabalhos como o de Ferreira et al.⁽⁹⁾ mostram que o CO também reduz com a presença do campo acústico. Já para o NO_x, o trabalho de Rocha, Carvalho Junior e Lacava⁽¹⁰⁾ indica que a redução desse poluente com a presença do campo acústico ocorre em condições específicas de frequência e amplitude.

7 CONCLUSÕES

No presente trabalho procurou-se comentar sobre algumas tecnologias que estão sendo desenvolvidas para conciliar as necessidades dos processos de combustão; sobretudo quanto ao controle de emissões de poluentes. Como exemplo foram apresentados resultados obtidos em pesquisas e desenvolvimentos tecnológicos realizados no Laboratório de Combustão, Propulsão e Energia – LCPE do Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA.

Foram apresentados resultados sobre as técnicas Flameless, Combustão Assistida a Plasma, RQL e Combustão Pulsante. Todas mostraram que são promissoras sobre a redução de emissão de poluentes; contudo, são dispositivos complexos que necessitam de profundo conhecimento sobre os fenômenos envolvidos para que sejam aplicadas em situações práticas de dispositivos que utilizam a energia térmica liberada pelas reações de combustão.

REFERÊNCIAS

- 1 BORMAN, G. L.; RAGLAND, K. W., Combustion Engineering, Mc Graw-Hill, 1998.
- 2 CARVALHO JR, J.A.; LACAVA, P.T. Emissões em processos de combustão. 1.ed. São Paulo, Ed.UNESP, 2003.
- 3 DELACROIX, F. "The flameless oxidation mode": an efficient combustion device leading also to very low NO_x emission levels. ADEME (French Agency for energy and environment management), BP 406, 49004 Angers, France, 2005.
- 4 MASSON, E., TAUPIN, B. An experimental facility at laboratory scale to assess the effect of confinement o flameless combustion regime. Proceedings of the European Combustion Meeting, 2005.
- 5 LUO, J., SUIB, S. L., MARQUEZ, M., HAYASHI, Y., AND MATSUMOTO, H., "Decomposition of NO_x with Low-Temperature Plasmas at Atmospheric Pressure:



- Neat and in the Presence of Oxidants, Reductants, Water, and Carbon Dioxide,” J. Phys. Chem. A, 102:954, 1998.
- 6 CROSBY R., “Plasma Torch Ignition for Low NO_x Combustion Turbine Combustor with Monitoring Means and Plasma Generation Control Means,” USA Patent Number 5,640,841, 1997.
 - 7 CHO, E. S.; CHUNG, S.H. Improvement of Flame Stability and NO_x Reduction in Hydrogen-Added Ultra Lean Premixed Combustion. Journal of Mechanical Science and Technology, v. 23, p. 650-658, 2009.
 - 8 ALMEIDA, D.S.; LACAVA, P.T.; MARTINS, C.A. Detection of Combustion Instabilities in Gas Turbine RQL Combustor. Proceedings of the 20th International Congress of Mechanical Engineering, 2009.
 - 9 FERREIRA, DANIEL SILVA, LACAVA, PEDRO TEIXEIRA;; CARVALHO JR., JOÃO ANDRADE DE; FERREIRA, MARCO AURÉLIO. Experimental Aspects of Partially Premixed Pulsating Combustion. In: 3RD International Energy Conversion Engineering Conference, 2005, San Francisco. Proceedings of 3rd International Energy Conversion Engineering Conference. AIAA, 2005. v. 1
 - 10 ROCHA, ANA MAURA ARAUJO; CARVALHO JR., JOÃO ANDRADE DE; LACAVA, PEDRO TEIXEIRA. Desenvolvimento de um Queimador de Gás Natural com Excitação Acústica. In: XXVI Seminário De Balanços Energéticos Globais E Utilidades, 2005, Slavador. Anais XXVI Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005. v. 1.