

DESENVOLVIMENTO DE CÂMARAS DE COMBUSTÃO RQL PARA QUEIMA DE GÁS NATURAL ¹

*Pedro Teixeira Lacava ²
Said Arafat Gomes Garcia³
José Hilarion Aponte Perez⁴
Cristiane Aparecida Martins⁵*

Resumo

O presente trabalho apresenta um sistema de combustão que propicia uma queima do tipo RQL (do inglês “Rich – Quench – Lean”) para o gás natural, ou seja, uma combustão em duas fases, a primeira onde a queima é com deficiência de oxidante, e a segunda onde há excesso de oxidante. Esse tipo de estrutura de combustão permite conciliar baixas emissões de NO_x com baixas emissões de poluentes de oxidação parcial, como CO, hidrocarbonetos não queimados e fuligem. O conceito das câmaras de combustão RQL tradicionais está baseado na injeção estagiada dos reagentes ao longo da câmara, criando regiões de combustão desfavoráveis para formação de NO_x. Neste novo conceito de câmara, essa condição de combustão desfavorável para formação de NO_x não é atingida através da injeção estagiada dos reagentes, mas através do controle da dinâmica do processo de mistura dos reagentes no interior da câmara, propiciando algumas vantagens em relação ao processo tradicional. No presente trabalho são apresentados resultados sobre a primeira fase do projeto, onde se identificou como os parâmetros controladores da câmara alteram a geometria da chama e os limites de operação da combustão.

Palavras-chave: Combustão; Gás natural; Combustão RQL.

DEVELOPMENT OF RQL CHAMBER FOR NATURAL GAS COMBUSTION

Abstract

The present work shows a new Rich – Quench – Lean – RQL combustion system for natural gas. The combustion happens in two phases; the first one with oxidant deficiency, or fuel rich combustion, and the second one is a fuel lean combustion. This combustion structure allows the conciliation of low NO_x emissions and partial oxidation combustion products, as carbon monoxide, unburned hydrocarbons and soot. The idea of the traditional RQL combustors is the staged reactants injections through the chamber, providing some unfavorable regions for NO_x formation. But in the new concept proposed here, these unfavorable combustion conditions for NO_x formation are reached through the dynamic control of reactants mixing process into the chamber, favoring some advantages in relation of traditional RQL process. The present work shows the results for how the control parameters change the flame shape and the combustion limits.

Key words: Combustion; Natural gas; RQL combustion.

¹ *Contribuição técnica ao XXVII Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades da ABM, Porto Alegre, RS, 16 a 18 de agosto de 2006.*

² *Prof. Adjunto - ITA – São José dos Campos*

³ *Mestrando – ITA – São José dos Campos*

⁴ *Graduando – UNEFA - Venezuela*

⁵ *Prof. Adjunto - ITA – São José dos Campos*

1 INTRODUÇÃO

O gás natural é um combustível que cada vez mais ganha espaço na matriz energética nacional, devido aos programas de massificação do seu uso, ao preço competitivo e às vantagens ambientais. Apesar de sua aparente vantagem, a simples utilização do gás natural não significa que não haverá emissão de poluentes. Faz-se necessário adotar estratégias operacionais para que realmente seja possível se beneficiar da potencialidade do gás natural em ser um combustível com menor impacto ambiental. Isso dependerá muito dos processos físicos e químicos que se desenrolam na câmara de combustão, ou seja, de como os reagentes são adicionados a essa.⁽¹⁾ Desta forma, o presente trabalho pretendeu investigar um novo conceito de câmara de combustão do tipo RQL (*Rich-Quench-lean*) para aplicação processos de combustão que utilizam gás natural como combustível. O conceito das câmaras de combustão RQL tradicionais está baseado na injeção estagiada dos reagentes ao longo da câmara, criando regiões de combustão desfavoráveis para formação de NO_x .⁽²⁾ Neste novo conceito de câmara, essa condição de combustão desfavorável para formação de NO_x não é atingida através da injeção estagiada dos reagentes, mas através do controle da dinâmica do processo de mistura dos reagentes no interior da câmara, propiciando algumas vantagens em relação ao processo tradicional.

O objetivo do presente trabalho foi propor e estudar experimental uma configuração alternativa para câmaras RQL que minimize os problemas operacionais desse tipo de equipamento. Nesta nova configuração, o combustível e o ar não são injetados de forma estagiada como na configuração convencional, mas ambos em uma mesma câmara primária. Contudo, a maneira de injeção dos reagentes é que propiciará 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. A Figura 1 apresenta um esquema de como é essa configuração. O 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* terá 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 escoar 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 recirculação ainda tem o papel de criar uma mistura homogênea de combustão pobre, através da intensa mistura entre os reagentes.⁽³⁾

Basicamente três parâmetros adimensionais controlam a dinâmica dos escoamentos, o número de Reynolds do jato de gás combustível (Re_j),⁽⁴⁾ o número de *swirl* do escoamento de ar (S) e a razão comprimento / diâmetro da câmara

primária (L/D), conforme Figura 1. O número de Reynolds caracteriza o nível de turbulência do jato de combustível, o número de *swirl* caracteriza a intensidade da quantidade de movimento tangencial do escoamento e a razão L/D a disponibilidade espacial para mistura dos reagentes na zona de combustão rica primária.

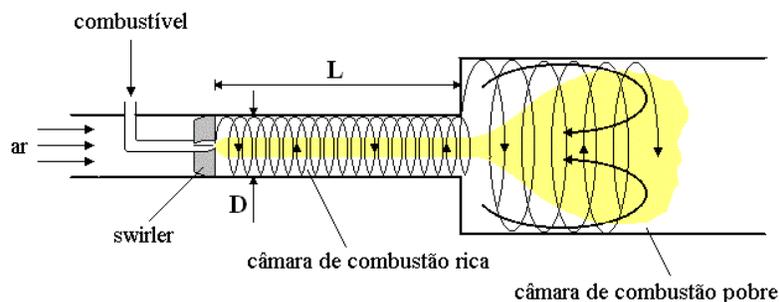


Figura 1. Proposta de configuração para câmaras de combustão RQL's.

No presente trabalho são apresentados os resultados da primeira fase desse projeto, onde se analisou como os parâmetros que controlam a dinâmica dos escoamentos dos reagentes afetam a configuração da chama e o envelope de operação da combustão.

2 MONTAGEM EXPERIMENTAL

Construiu-se um combustor de escala laboratorial de aço inox com comprimento máximo de 30 cm e diâmetro de 10 cm para zona primária (combustão rica) e 50 cm de comprimento e 20 centímetros de diâmetro para zona secundária (combustão pobre). A zona primária foi construída de forma modular para que a razão L/D possa ser variada. Para os ensaios de visualização de chama, utilizaram-se câmaras cilíndricas de boro-silicato como zona primária.

A vazão de gás natural de 1g/s é obtida através de cilindros pressurizados de gás natural veicular (GNV). A pressão no interior do cilindro é de 200 atm e um sistema de três válvulas reguladoras de pressão realiza a queda de pressão escalonada até a pressão da linha de combustível de 3 atm. O ar é alimentado por um compressor radial CR8 que para essa montagem atinge a vazão máxima de 100g/s. A vazão de ambos fluidos de operação é medida por placas de orifícios.

A influência do número de Reynolds (Re_j) para um determinado número de *swirl* (S) e razão L/D pode ser observada variando esse parâmetro através da troca do diâmetro do orifício de saída do injetor de gás natural (no caso utilizou-se diâmetros de 2,35mm ($Re = 54.000$), 3,20mm ($Re = 40.000$) e 7,8mm ($Re = 15.500$)). Desta forma, a vazão de combustível não precisa ser alterada, nem a potência teórica liberada. Da mesma forma, o número de *swirl* pode ser modificado através da alteração do ângulo entre as pás do *swirler*, não sendo necessário alterar a vazão de ar que passa por esse dispositivo. A influência da razão L/D é observada alterando o comprimento L da zona primária ($L = 10, 20$ e 30 cm), para isso a essa região da câmara foi construída em módulos de 10 cm. A Figura 2 apresenta uma fotografia da vista frontal da câmara em operação e a Figura 3 um esquema geral da câmara de combustão.

3 RESULTADOS

A dinâmica dos escoamentos de combustível e ar, influenciada pelo comprimento da câmara primária, número de Reynolds do jato e intensidade da

rotação tangencial do escoamento de ar, terá papel fundamental sobre como serão as condições de combustão e, conseqüentemente, sobre a estrutura da chama.



Figura 2. Vista frontal da montagem em operação.

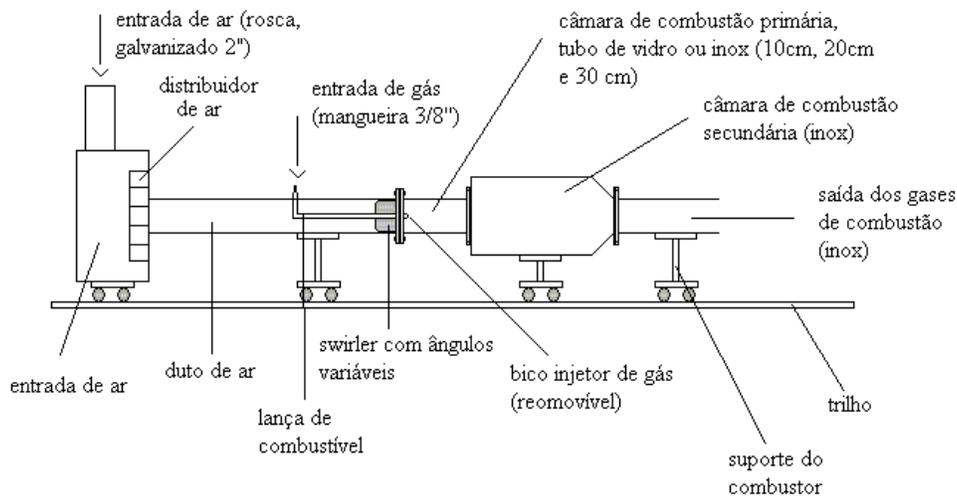


Figura 3. Esquema geral da câmara de combustão.

Assim, foram conduzidos ensaios com a presença da câmara primária de boro-silicato para visualização da chama, nos comprimentos 10cm, 20cm e 30 cm, ou seja, L/D igual a 1, 2 e 3 respectivamente. A injeção de combustível foi feita utilizando-se três diâmetros diferentes, para propiciar os seguintes números de Reynolds: 54.000, 40.000 e 15.500. O ângulo entre pás do swirler foi mantido em $\alpha = 80^\circ$ e a intensidade da rotação tangencial do escoamento de ar foi variada através das vazões de ar m_{ar} de 50g/s e 100g/s. A Figura 4 mostra o esquema geral de uma chama e do escoamento na zona primária e em sua saída, tomando como referência a condição $L/D = 3$, $d_i = 7,2\text{mm}$, $\alpha = 80^\circ$ e $m_{ar} = 100\text{g/s}$. A Figura 5 mostra a quatro regiões da chama que se destacam.

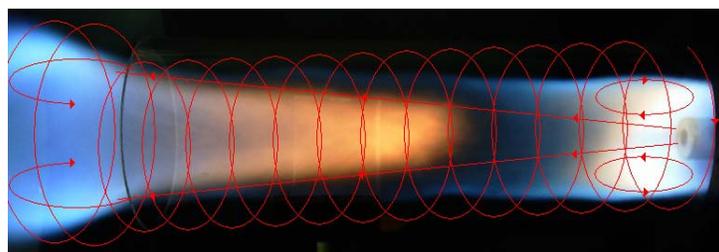


Figura 4. Esquema geral da chama e do escoamento na zona primária.

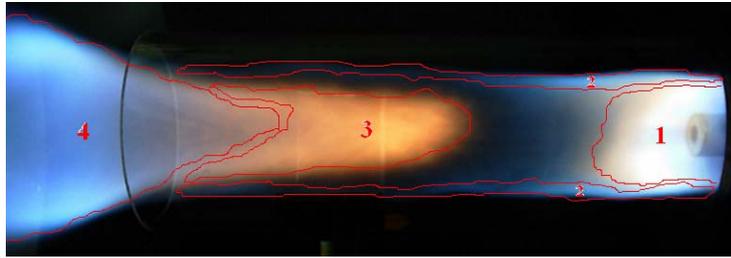


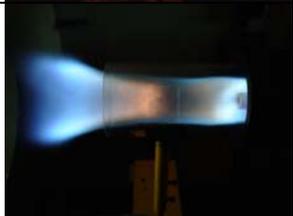
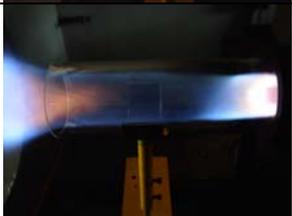
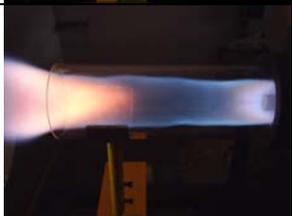
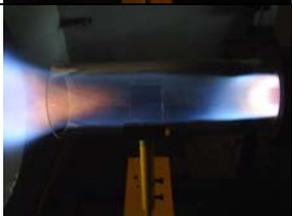
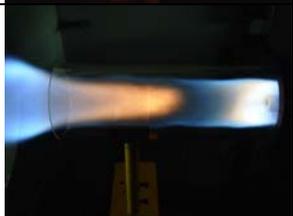
Figura 5. Regiões de Combustão.

Das Figuras 4 e 5 pode-se identificar quatro regiões de intensa reação química na chama. A região 1 se forma nas proximidades do swirler e do jato de gás natural, em uma estrutura de recirculação que surge devido ao efeito de carregamento do ar nas proximidades do jato de gás natural em razão da baixa pressão nessa região e o ar emergindo do swirler com elevada componente tangencial de velocidade. Aparentemente, pouco ar consegue penetrar nessa estrutura e a tendência é de combustão rica. A região 2 surge entre o escoamento rotativo de ar e o jato de gás natural, provavelmente parte do gás é carregado pelo escoamento junto com o movimento de rotação do ar. Quando o escoamento rotativo de ar emerge da câmara primária, como não há mais o efeito parede o escoamento tende a se desenvolver radialmente e a pressão na região central diminui, fazendo com que o escoamento de ar se reverta e parte dele se mistura com os produtos de oxidação parcial da chama 3 e o restante do combustível, formando a região de chama 4. A região 3 da chama se dá basicamente no encontro da penetração da estrutura de recirculação formada na região 4 para o interior da zona primária com o jato de gás natural, sendo que a tendência é o de um processo de combustão rica.

Obviamente que as mudanças na estrutura da chama dependerão de alterações no Re do jato, na intensidade da rotação do ar e da razão L/D . A Tabela 1 apresenta diferentes alterações da estrutura de chama tomada como de referência na Figuras 4 e 5. O número de Re foi alterado colocando-se injetores de diferentes diâmetros e a intensidade da zona de recirculação alterando a vazão de 50g/s para 100g/s.

Tomando como base as imagens da Tabela 1, alguns comentários preliminares podem ser extraídos. A região 1 da chama sempre surgiu apesar das variações de Re , m_{ar} e L/D , mesmo na situação mais crítica para estabelecer a chama na câmara primária, ou sejam $L/D = 3$, $m_{ar} = 50$ g/s e $Re = 54.000$ ($d_i = 2,35$ mm). Já a região 2 da chama não se apresenta tão estável como região 1, muito pelo contrário, ou seja, enfraquece bastante com o aumento de L/D e Re , chegando a se extinguir em alguns casos; além disso, a situação se agrava quando há redução de vazão de ar. Aparentemente a região 2 é extremamente dependente da presença de intensa de rotação do ar e menor velocidade para o jato de gás natural.

Tabela 1. Estruturas da chama.

L/D	m_{ar} [g/s]	$d_i = 2,35\text{mm}$	$d_i = 3,2\text{mm}$	$d_i = 7,8\text{mm}$
1	50			
	100			
2	50			
	100			
3	50			
	100			

Para vazão de 50g/s de ar a zona de recirculação a montante da câmara primária se enfraquece, conseqüentemente, também diminuindo sua penetração na câmara primária; sendo que, quando o Re aumenta a região de chama 3 pode ser completamente extinta. Já para a vazão de ar de 100g/s, a zona de recirculação se fortalece e essa região de chama reaparece. No caso de $L/D = 1$ e $m_{ar} = 100 \text{ g/s}$, há praticamente uma fusão entre as regiões 1 e 3 da chama.

Finalmente, a região 4 sempre aparece com sendo a estrutura final da chama. Contudo, um efeito um tanto contraditório surge nessa região. Quando a vazão de ar é mais alta, 100g/s, a tendência é que a região 4 torne-se mais azulada,

indicando quase que uma pré-mistura, quando o Re do jato de gás natural aumenta. Por outro lado, o efeito é contrário para vazão de ar de 50g/s, ou seja, aumentando-se o Re do jato a região 4 da chama torna-se mais amarela há maior presença de fuligem.

Além da geometria da chama, também foram realizados ensaios para se determinar os limites de operação da câmara de combustão. Assim, mantendo a vazão de combustível em 1g/s e diferentes combinações de número de Reynolds (variando o diâmetro de injeção), de comprimento da câmara primária e de ângulo de swirler foram avaliadas. Para uma determinada combinação dos parâmetros citados reduziu-se a vazão de ar até a não ser mais possível estabilizar a chama. As situações mais críticas observadas foram para a câmara primária de 10cm ($L/D = 1$) e Reynolds do jato de gás natural de 54.000 ($d_i = 2,35\text{mm}$). Nessa situação a estabilização da chama é extremamente sensível à vazão de ar. A Figura 6 mostra o mínimo de ar necessário para estabilizar a chama em função do ângulo do swirler.

Nota-se que à medida que o ângulo do swirler diminui, a vazão mínima de ar necessário para ancorar a chama aumenta; isso ocorre para compensar a tendência de redução da estrutura de recirculação (região 1 da chama conforme Figuras 4 e 5) em função do menor ângulo do swirler. Contudo, essa compensação só ocorre até o ângulo igual a 40° , pois a intensidade da zona de recirculação (região 1 da chama) depende muito mais do ângulo do que da vazão de ar. A Figura 6 mostra que para o ângulo de 40° é necessário ar em proporção em quantidade elevada, chegando atingir razão de equivalência inferior a 0,5. Por outro lado, para o ângulo 80° pode-se atingir regimes de combustão extremamente ricos.

Por outro lado, na determinação da máxima vazão mássica de ar chegou-se ao limite da vazão do compressor radial de 100g/s com chama ancorada em qualquer combinação de número de Reynolds, ângulo do swirler e comprimento de câmara. Baseado nesses resultados pôde-se concluir que se adotando ângulos maiores, próximos a 80° , a câmara torna-se versátil podendo operar nos mais diversos regimes. Sendo assim, esse tipo de configuração será mais bem explorado nos ensaios futuros.

Outro resultado importante observado durante os ensaios foi a ocorrência de instabilidades acústicas de combustão. Tal fenômeno surge em função de uma interação entre a forma da distribuição de liberação de energia na câmara e as características aero-acústicas da câmara. Este é um fenômeno complexo e difícil de se prever. Para a vazão de 1g/s de gás a vazão de ar onde esse fenômeno ocorre depende da combinação número de Reynolds, ângulo do swirler e razão L/D . Aparentemente aumentando ou diminuindo a vazão de ar onde a instabilidade acústica surge, ela é atenuada ou eliminada. Como exemplo a Figura 8 mostra a vazão de ar onde as instabilidades acontecem para o número de Reynolds do jato de 15.500, ângulo de swirler 80° e $L/D = 3$. Esse resultado ainda é bastante preliminar, pois as ocorrências de instabilidades foram detectadas através de observações visuais na câmara primária e presença de som em baixa frequência. Assim, pretende-se utilizar sensores de pressão piezelétricos estrategicamente posicionados na câmara para detectar a ocorrência das oscilações e qual a frequência e amplitude desta.

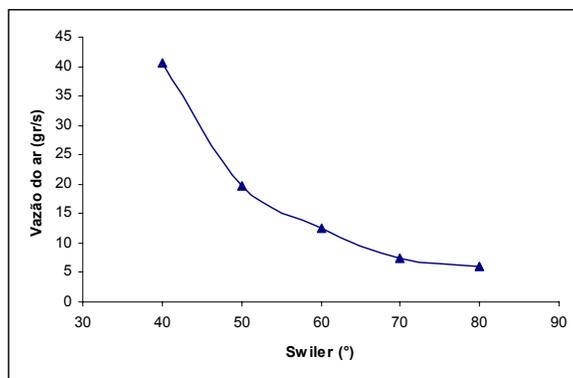


Figura 6. Vazão mínima de ar para manter a chama ancorada em $Re = 54.000$ e $L/D = 1$.

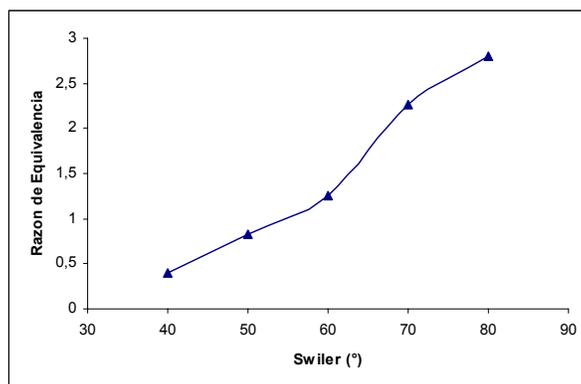


Figura 7. Razão de equivalência máxima para manter a chama ancorada em $Re = 54.000$ e $L/D = 1$.

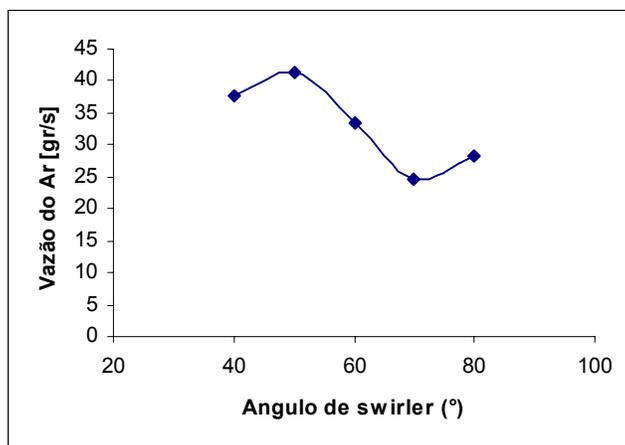


Figura 8. Vazão de ar onde há ocorrência de instabilidades acústicas para condição número de Reynolds do jato de 15.500 , ângulo de swirler 80° e $L/D = 3$.

A principal consequência negativa da presença das pulsações acústica é o aumento transferência de calor principalmente por convecção para parede da câmara. A Figura 9(a) apresenta uma fotografia da montagem operando em uma condição livre de pulsações acústicas, já a Figura 9(b) mostra a situação com a presença das pulsações, nota-se a cor rubra na câmara secundária em função do maior aquecimento.



Figura 9. (a) Câmara operando sem oscilação acústica. (b) Câmara operando com oscilação acústica.

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho mostrou que a chama formada na configuração de combustão proposta apresenta características extremamente sensíveis à geometria do dispositivo, ou seja, ao ângulo do swirler (a) e a razão L/D da zona primária; além da condição de operação dos reagentes, Re de injeção do combustível e vazão de ar. A dinâmica dos escoamentos de combustível e ar ao longo das zonas primária e secundária de combustão, bem como o processo de mistura entre os reagentes, irão influenciar os mecanismos de formação de poluentes, como NO_x e fuligem. Desta forma, esta fase de observação das características da chama antes da fase de análise dos poluentes foi extremamente importante para o entendimento de como as características do dispositivo de combustão afetam essas emissões.

A configuração de combustão proposta mostrou-se extremamente versátil do ponto de vista de possibilidade de operação com diferentes excessos de ar, bem acima do que teoricamente se prevê como limite de excesso de ar de combustão para o gás natural. Isso é graças à possibilidade de operação com elevado ângulo de swirler.

Os ensaios realizados nessa fase do projeto mostraram que o maior gargalo para esse tipo de configuração de combustor é o surgimento de instabilidades acústicas de combustão quando operada com elevados excessos de ar, ou seja, para situação de combustão extremamente pobre.

O presente trabalho apresentou o estudo preliminar sobre operação de uma nova configuração de câmara RQL, que ainda requer ensaios sobre a análise de emissão de poluentes para que se tenha condição de avaliar sua eficiência no combate de emissão de poluentes, sobretudo sobre a eficiência de conciliar as emissões de NO_x e de produtos de oxidação da combustão, como monóxido de carbono, hidrocarbonetos não queimados e fuligem.

REFERÊNCIAS

- 1 Lyons, V.J., Fuel/Air Nonuniformity – Effect on Nitric Oxide Emissions, *AIAA Journal*, 20(5):660–665, 1982.
- 2 Wood, S.C., NO_x Control, *Chemical Engineering Progress*, 90(1):31-38, 1994.
- 3 Lacava, P.T, *Investigação Experimental do Enriquecimento do Ar na Incineração de Resíduos Aquosos*, Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José do Campos, 2000.

- 4 Lacava, P.T, Câmara de Combustão RQL Para Turbinas a Gás que Utilizam Gás Natutal como Combustível, *IV Feira e Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração Aquecimento e Ventilação do Mercosul*, Anais do Congresso em Cd, Curitiba, 2004.