

## **PROJETO DE UM QUEIMADOR E CÂMARA DE COMBUSTÃO FLAMELESS PARA REDUÇÃO DO NO<sub>x</sub>**

**Fernando Lima de Oliveira, flima@ita.br<sup>1</sup>**  
**Pedro Teixeira Laçava, placava@ita.br<sup>2</sup>**  
**Luis Gilberto Barreta, barreta@ieav.cta.br<sup>3</sup>**  
**Giuliano Gardolinski Venson, venson@ita.br<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, Divisão de Eng. Aeronáutica Pça. Mal. Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias, São José dos Campos, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, Divisão de Eng. Aeronáutica Pça. Mal. Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias, São José dos Campos, SP, Brasil.

<sup>3</sup> Instituto de Estudos Avançados – IEAV, Divisão Aerodinâmica e Hipersônica, Rodovia dos Tamoios, km 5,5 Torrão de Ouro, São José dos Campos, SP, Brasil.

<sup>4</sup> Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, Divisão de Eng. Aeronáutica Pça. Mal. Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias, São José dos Campos, SP, Brasil.

**Resumo:** *O presente trabalho irá reportar-se sobre os parâmetros de projeto e construção de um modelo de câmara e de queimador utilizados para aplicação de um novo modelo de combustão, chamada: Combustão Flameless (combustão sem chama). É um regime de combustão estável sem a presença de chama visível, sendo definida pela recirculação dos produtos de combustão quentes dentro do volume da câmara. Diferentemente dos processos de combustão convencional, nesta, durante a reação não há chamas estabilizadas, ou seja, não é possível visualizar a presença visível da chama dentro do volume de combustão, e, além disso, não ocorre o aparecimento dos picos de temperaturas, resultando numa considerada redução da emissão de NO<sub>x</sub> e outros poluentes de oxidação parcial. Geralmente queimadores utilizados para este fim são de geometrias complexas o que dificulta a simplificação do processo. Neste caso, o presente trabalho propõe descrever um estudo da combustão flameless para se conhecer e entender os fatores (fenômenos físicos e químicos) que influenciam a mistura e o comportamento padrão deste regime de combustão em escala laboratorial, e, descrever e apresentar o projeto de um queimador e de uma câmara de combustão flameless para investigação experimental. Para realização do projeto e construção do sistema foi feito um largo estudo bibliográfico baseado em pesquisas experimentais que mostram modelos de projetos e estudos da técnica, observando as normas e metodologias para funcionamento do sistema. Os resultados apresentam uma configuração capaz de atender os requisitos de funcionamento da técnica e que possibilita a redução de poluentes, especificamente do NO<sub>x</sub>. Geralmente estes tipos de experimentos demonstram ser esta uma tecnologia eficiente, promovendo distribuição uniforme do fluxo de calor dentro da câmara, e reduzindo a emissão do NO<sub>x</sub>.*

**Palavras-Chave:** 1. Projeto 2. Queimador 3. Câmara 4. Combustão Flameless

### **1. INTRODUÇÃO**

Atualmente devido a escassez dos recursos que se soma aos problemas ambientais oriundos da utilização de energia e extração de produtos naturais, observa-se uma crescente preocupação com a busca de maior racionalidade no uso da energia, além da procura de processos com menor impacto ambiental. No Brasil, como em todo o mundo, o setor energético vem sofrendo profundas transformações motivadas não apenas por questões de ordem técnica e econômica, mas também por pressões da sociedade.

Sendo a nossa sociedade sustentada pelos processos de combustão, esta possui como contrapartida negativa as emissões de poluentes atmosféricos. Uma reversão desse quadro exigirá muitas décadas para que a matriz energética mundial reduza consideravelmente sua dependência dos processos de combustão.

Apesar da ampla utilização da energia térmica liberada pelas reações de combustão, cada vez mais surgem pesquisas e desenvolvimento tecnológicos para que o uso desta fonte de energia seja o mais racional possível. Percebe-se também que na história recente do uso da combustão, o conceito de aproveitamento da energia térmica da combustão tem se expandido buscando soluções através de ações da eficiência energética (melhor aproveitamento da energia térmica com baixas emissões), maior inserção de combustíveis de biomassa, uso de hidrogênio e preocupações com os demais gases e efeito estufa, como o metano e NO<sub>x</sub>.

Recentemente, o controle destas emissões, principalmente monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NOx), tornou-se também a mais importante meta no projeto de câmaras de combustão e dos queimadores industriais, sendo a última década testemunha de rápidas mudanças nas normas e tecnologias objetivando tal controle.

Especificamente para o caso do NOx, a maior parte das estratégias de controle nos processos de combustão é baseada em três variáveis: tempo de permanência, temperatura e disponibilidade de oxigênio. Estas estratégias visam à redução do pico de temperatura, manter o tempo de permanência e a baixa concentração de oxigênio em altas zonas de temperaturas. Para isto, usualmente aplicam-se duas técnicas para se alcançar estes objetivos: a) Modificar o processo de queima através de queimadores adequados, que atuam no mecanismo de formação dos poluentes; b) tratamento dos gases de exaustão, atuando no mecanismo de destruição dos poluentes (Lefebvre, 1983).

Apesar destas estratégias existentes, a crescente demanda mundial de energia fomenta o desenvolvimento de sistemas de combustão que sejam mais eficientes e de baixa poluição.

Neste cenário, uma tecnologia que vem ganhando interesse nas pesquisas atuais como uma promissora técnica de combustão para minimização das emissões e controle do NOx e de outros poluentes é a Combustão flameless (combustão sem chama visível). Esta técnica trata de um novo modelo de combustão que através de modificações do processo altera as características da zona de reação e conseqüentemente na formação dos produtos da combustão.

Apesar de ser uma técnica recentemente descoberta e pouca conhecida, atualmente, a combustão flameless vem ganhando destaque no meio científico devido às grandes vantagens que apresenta no seu uso quando comparada com a combustão convencional. As principais vantagens apresentadas pela combustão flameless são: significantes reduções na formação poluentes, principalmente do NOx e CO, maior eficiência térmica, oxidação do combustível e sua distribuição por todo o volume da câmara, consideradas reduções do gradiente de temperatura e de concentração das espécies, etc.

Para a implementação prática desta tecnologia, ainda se necessita de uma melhor atenção sobre os fenômenos envolvidos durante a combustão. Neste caso, um melhor conhecimento sobre os processos físicos e químicos da combustão flameless poderá contribuir de maneira significativa tanto para o avanço de sua aplicação, como para sua melhor eficiência.

Baseados neste contexto, o presente trabalho visa apresentar os resultados de um projeto conduzido com intuito de identificar uma configuração de um queimador e câmara de combustão que funcione de acordo com o conceito da tecnologia flameless e que forneça condições dinâmicas e praticidade operacional em escala laboratorial.

## 2. FUNDAMENTOS DA COMBUSTÃO FLAMELESS

A combustão flameless (conhecida na literatura como Oxidação Flameless ou simplesmente Flox) é um regime de combustão identificado na década de 90, e que apresenta significativas vantagens em relação aos processos de combustão convencionais.

Segundo Wüning (1997) a combustão flameless pode ser conceituada como um regime de combustão estável sem a presença de chama visível e definida pela recirculação dos produtos de combustão quentes. Este regime é obtido por meio de sofisticadas operações de alto nível de turbulência entre os produtos de combustão e os gases de recirculação interna. A priori durante a sua operação a temperatura do oxidante dever ser superior à temperatura de auto-ignição da mistura do ar e combustível.

De acordo com Wüning (2004), o fenômeno foi observado durante experimentos com queimadores recuperativos. O experimento funcionava com o forno a temperaturas de 1000°C e com ar pré-aquecido em 650°C. Observou-se que com a combinação de determinados parâmetros de entrada e de projeto (Re, Razão de equivalência, espaço entre orifícios de entrada e outros) o sistema passou a reagir em condições diferentes do convencional. Essa diferença é mostrada na Fig. (1). Na primeira imagem (a) tem-se uma reação convencional (flame) e em (b) o sistema operando em condições flameless.

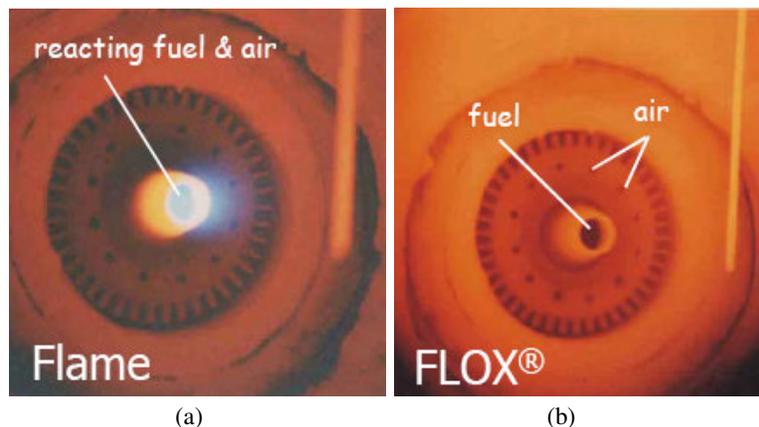


Figura 1. Combustão: (a) Convencional e (b) Flameless (Wüning, 2004)

Observou-se que quando o regime operava em condições flameless, nenhuma chama pôde ser vista e nenhum sinal UV pôde ser detectado. Contudo, o combustível foi completamente consumido. Percebeu-se também que o CO contido nos gases de exaustão reduziu-se para abaixo de 1ppm. A emissão de NOx foi próxima de zero. Além disso, a combustão permaneceu estável e de forma suave, sem a existência de instabilidade na chama.

Durante o regime de combustão, ar e combustível são injetados diretamente dentro da câmara de combustão em elevada velocidade ('estágios' extremos) ajudando a criar uma estrutura de carregamento dos gases queimados. Ou seja, os reagentes são gradativamente misturados com uma larga quantidade de gases de recirculação interna, desse modo, reduz a temperatura de chama adiabática da mistura e promove o aquecimento do ar e combustível ou ar/combustível ao mesmo tempo.

Diferentemente do que ocorre na chama convencional uma importante característica da combustão flameless é que não há ar adicionado para a linha central do combustível antes da reação. A recirculação dos gases de exaustão é misturada antecipadamente dentro do ar de combustão. Em seguida esta mistura antecipada reage com o combustível injetado no centro, dando origem à zona de reação. Os reagentes misturam-se e reage a uma determinada distância do ponto de injeção. A chama, a partir de então, 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 nitrogênio (Wang, 2006).

De acordo com Delacroix (2005), a geometria do queimador e da câmara de combustão e a alta velocidade de injeção são fatores determinantes para a recirculação interna dos produtos de combustão na câmara. A alta temperatura dos produtos de combustão em recirculação (> 850°C) é usada para iniciar e manter a estabilidade de operação do sistema. Esta temperatura deve ser superior à temperatura de auto-ignição da mistura do ar e combustível.

A estabilidade da combustão flameless se comporta como uma função da quantidade de gases em recirculação no volume da câmara definido como taxa de recirculação. A Fig. (2) mostra os limites de estabilidade para diferentes modos de combustão como função temperatura de reação e a recirculação dos gases de exaustão para o gás metano. A taxa dos gases de recirculação é definida de acordo com a Eq. (1).

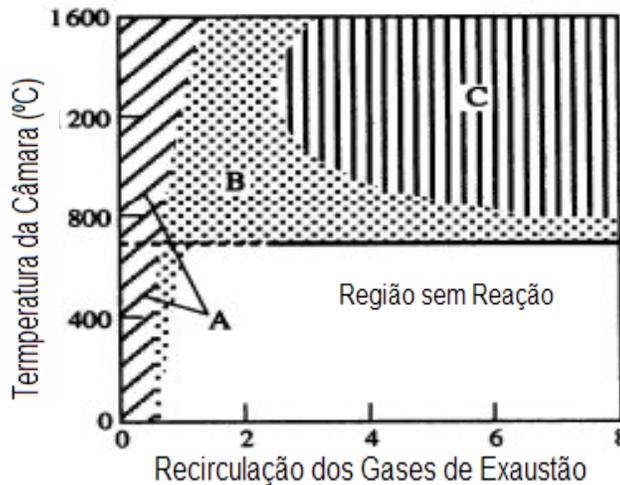


Figura 2. Diagrama de Estabilidade de Chama (Wüning, 1997)

$$K_v = \frac{\dot{M}_E}{\dot{M}_F + \dot{M}_A}$$

Onde:  $K_v$  – Taxa de recirculação dos gases;  $\dot{M}_E$  - gases de exaustão;  $\dot{M}_F$  – massa de combustível;  $\dot{M}_A$  – massa de ar de combustão.

A região A ( $K_v < 3$ ) corresponde à região de estabilidade das chamas convencional. A região intermediária B representa uma combustão instável (lift flame). É a região de transição para o próximo regime; porém, em caso de temperaturas abaixo da linha de auto-ignição a chama se desloca e se apaga. Se a temperatura do forno e a recirculação dos gases de combustão forem suficientemente altas ( $K_v > 4$ ), o combustível reage regularmente de forma estável dando origem à região C chamada de Combustão Flameless.

A principal motivação para o uso da combustão flameless está associada na redução das emissões de NOx que é obtido por meio do controle da temperatura dos produtos de combustão e do grau de mistura das reações. Além disso, a maioria das operações industriais que funcionam em regime flameless pode melhorar sua performance operacional fazendo uso do ar pré-aquecido. Pois, o ar pré-aquecido além trazer a economia de energia, a sua diluição com os gases de exaustão resultam numa menor emissão de NOx, o que é consideravelmente importante (Wüning, 1997).

De acordo com Wüning (2004) com o desenvolvimento e a pesquisa desta técnica no setor industrial, outras vantagens puderam ser constatadas, tais como: construção de fornos em menor proporção para a mesma capacidade de produção; maior rendimento térmico acompanhado de menor consumo de energia; uso de queimadores mais compactos, o que facilita a manutenção e instalação.

As principais aplicações desta técnica encontram-se: nas indústrias de aço e de metais. A indústria do aço foi a pioneira na implementação destes tipos de queimadores. Sua aplicação ocorre em: linhas de recozimento e forjamento, galvanização, reaquecimento de tubos, linhas de produção de fitas de aço-silício com queimadores recuperativos, etc. Além desta, outras aplicações e pesquisas estão sendo realizadas, tais como: na indústria de vidros e cerâmicas; na indústria química; na geração de energia, por exemplo: mini-reformadores para produção de  $H_2$ , combustores de turbinas a gás; na incineração de produtos orgânicos; transportes, etc.

Baseados neste contexto, o presente trabalho apresenta uma investigação e os resultados de um projeto conduzidos com intuito de identificar uma configuração de queimador e câmara de combustão fundamentados nos princípios da tecnologia flameless e que seja capaz de propiciar as condições dinâmicas deste regime de combustão, e que possa ser implementado experimentalmente em escala laboratorial para verificar a redução do  $NO_x$  e outros poluentes durante a operação do sistema.

### 3. METODOLOGIA DO PROJETO

No geral, existem poucos modelos experimentais de câmaras de combustão e queimadores flameless descrito na literatura, e, além disto, a maioria das pesquisas existentes apresenta poucos detalhes dos parâmetros de projeto e de funcionamento da técnica. Com isto trabalhos e pesquisas realizados por Plessing, *et al.*, (1998) e Szegö *et al.* (2009) serviram como diretriz para orientação dos das diferentes características e geometria da câmara de combustão e do queimador adotados neste trabalho.

Inicialmente após unir o máximo de detalhes e informações importantes dos parâmetros operacionais da técnica definiu-se a configuração de câmara e queimador que atendessem às exigências para funcionamento da técnica em diversas condições de operação. Estas configurações são mostradas nos capítulos a seguir.

De modo geral, as etapas do projeto foram a seguinte: a) definição do modelo de câmara, b) definição de tipo de queimador, c) definir corretamente os principais parâmetros operacionais da configuração do queimador e câmara, tais como: relativa posição entre os orifícios de ar e combustível (espaço e ângulo); diâmetro dos orifícios de injeção dos reagentes; quantidade e forma de distribuição dos jatos de ar e/ou combustível; razão de equivalência ( $\Phi$ ); potência do queimador; temperatura de entrada do ar, etc.

Szegö (2005) comenta que os diferentes parâmetros são importantes no controle da dinâmica da combustão e no carregamento dos produtos da combustão nas linhas de combustível e de ar antes da reação; ainda afirma que os parâmetros de projetos mais comuns nos queimadores é o momentum (quantidade de movimento), ângulo de inclinação, e a distância de alimentação do ar e do combustível.

Kuo (1986) comenta que a zona de recirculação a jusante do queimador influencia fortemente o processo de queima e, conseqüentemente também vai influenciar a emissão de poluentes e propõe que no projeto de câmaras de combustão é de caráter fundamental o dimensionamento correto do distribuidor de ar e do sistema de retenção da chama, pois, como conseqüência disso, tem-se uma otimização do consumo de combustível, uma minimização da produção de  $CO$  e  $NO_x$  e controle da dinâmica e das dimensões da chama.

### 4. RESULTADOS DO PROJETO

Conforme mencionado, existem poucos modelos de câmara e queimadores utilizados para identificar a funcionalidade deste regime de combustão, sendo necessário alcançar uma configuração de queimador e câmara que efetive a mistura de combustível e ar com gases de recirculação dentro de uma faixa de condições operacionais estabelecidas.

De acordo com Maruta, *et al.* (2000) o desempenho é assegurado baseado na uniformidade do perfil de temperatura, taxa de liberação de calor e flexibilidade operacional. Portanto, baseado nestes critérios e nos parâmetros de projeto, a seguir são apresentados como resultados o protótipo do queimador e da câmara de escala laboratorial que servirão para testes da técnica.

#### 4.1. Queimador

O presente queimador é definido dentro de uma categoria de queimadores chamados regenerativos. Neste tipo de queimador os gases de exaustão quentes pré-aquecem o ar de combustão através da troca de calor regenerativa. Ou seja, os gases de combustão são extraídos através do próprio queimador, com isso, o ar de combustão é pré-aquecido pela contracorrente enquanto resfria os gases de combustão. É um queimador diferenciado dos convencionais e a escolha do tipo de queimador influencia no funcionamento do regime de combustão flameless. Szegö (2005) diz que a geometria do queimador e da câmara de combustão e a alta velocidade de injeção dos reagentes são fatores determinantes para a recirculação interna dos produtos de combustão na câmara.

Os parâmetros de projeto a serem definidos foram: a) quantidade e forma de distribuição dos jatos de ar e/ou combustível; b) relativa posição entre os orifícios de ar e combustível (espaço e ângulo); c) diâmetro dos orifícios de injeção dos reagentes; d) posição da saída dos gases de exaustão.

A Figura (3) mostra a imagem com algumas medidas do queimador concebido no presente trabalho.

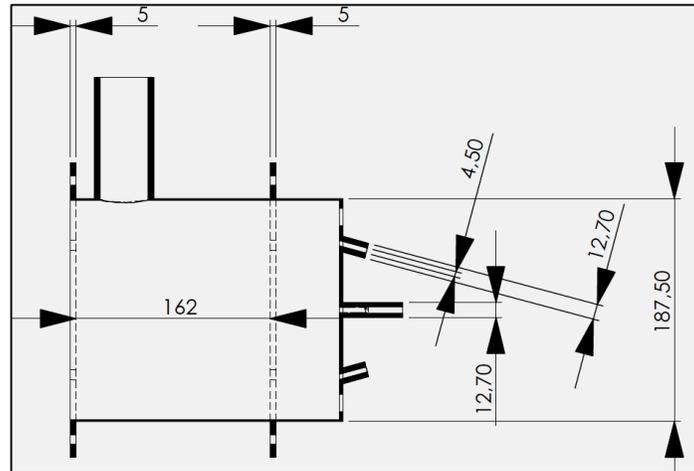


Figura 3. Características e Medidas do Queimador Flameless

Na definição da quantidade de jatos, observou-se que geralmente um grande número de jatos diminuiu a quantidade de movimento de entrada de ar; logo para garantir uma boa mistura do jato de ar com os gases de recirculação, adotamos uma configuração que melhor atendesse esta exigência. Szegö *et al.* (2009) a partir modelos numéricos concluíram que a quantidade máxima de quatro orifícios é uma quantidade ideal de entradas de ar. Esse valor favorece a recirculação de maior quantidade de gases no volume de combustão.

Conforme se observa na fig. (3) o combustível e o ar são injetados de forma separados. Na face frontal, o queimador é composto de uma lança de combustível centralizado e quatro entradas de ar dispostos simetricamente e equidistante do centro. Em cada saída dos reagentes existe um alongamento (ressalto) de comprimento característico. O ressalto do combustível promove o lançamento em regiões mais distantes da face do queimador, criando condições necessárias às condições flameless, ou seja, retarda a mistura dos reagentes (Coelho, *et al.*, 2001).

O espaço e os ângulos de injeção variam de acordo com as características do modelo da câmara e queimador. Szegö *et al.* (2009) usou um ângulo de injeção de 15° na linha combustível o que resultou nas condições de operações desejadas. Com o referido ângulo observou que houve uma supressão da mistura do ar e combustível nas proximidades de entrada do queimador, fazendo com que ambos se misturassem à jusante do queimador. Isso possibilitou que gases de combustão tivessem tempo de se misturarem com a linha de combustível antes de se misturarem com a linha central de ar e entrasse em reação.

Neste trabalho, ambos os injetores de ar são deslocados cerca de 15° graus em relação ao eixo central. A posição de cada jato de ar e combustível e o deslocamento do ângulo de injeção na saída de ar foi determinada de forma que os reagentes se misturassem no eixo central da câmara e numa distância de 220 mm a jusante do queimador. Conforme mencionado anteriormente, a alta velocidade de entrada dos reagentes, os ângulos de injeção dos injetores de ar e a relativa distância entre os bicos injetores são consideravelmente características fundamentais para favorecer a recirculação dos gases de combustão (Szegö, 2005).

O ressalto do injetor do combustível é do mesmo material do queimador e tem comprimento de 50 mm e diâmetro interno de 9,5mm. Para a saída de ar o ressalto é de 22 mm, com diâmetro interno de 4,5 mm. A face externa de cada ressalto é rosqueada onde são colocados os bicos injetores com diâmetro variados.

Outra característica importante é a posição de saída dos gases de exaustão. Aqui, os gases são extraídos pela mesma face de entrada dos reagentes ou pelo corpo do próprio queimador. A fig. (4) mostra quatro saídas para os gases de combustão; estas saídas estão posicionadas de forma equidistante do eixo central do queimador (orifícios externos aos orifícios de entrada do ar).

Para recuperação dos gases de combustão, foi acoplada uma pequena “chaminé” no corpo do queimador. Neste tipo de operação é comum os modelos apresentarem a saída dos gases na mesma face de entrada dos reagentes. Essa característica favorece grandemente o retorno dos gases de recirculação necessário para manter o regime em operação. Isso garante ainda uma melhor alternativa para diluição dos reagentes no volume de combustão (Wüning, 1997; Szegö *et al.*, 2009; Nishimura *et al.*, 1997).



Figura 4. Queimador Flameless

Resumidamente a Tab. (1) mostra os valores de alguns das principais características do queimador utilizado.

Tabela 1. Parâmetros das Características do Queimador

Parâmetros	Quantidade	Unidades
Número de jatos de combustível	1	-
Número de jatos de ar	4	-
Ângulo dos jatos de ar	15	°
Diâmetro do Combustível	4	mm
Diâmetro do Ar	5	mm
Diâmetro do orifício de exaustão	15	mm
Distância entre os eixos centrais do orifício do ar	80	mm
Diâmetro interno da tubulação e saída dos gases	40	mm

Na saída dos gases de exaustão tem instalada uma sonda de captação dos gases de combustão para análise contínua de sua composição. A sonda foi posicionada na chaminé a 30 cm acima do queimador. dimensões da câmara, carga térmica.

#### 4.2 Câmara de Combustão

Na câmara de combustão, os principais parâmetros de projetos a serem definidos foram: a) modelo e dimensões da câmara; b) acesso ótico; c) isolamento térmico.

A câmara foi construída com chapas de aço de carbono de forma retangular, projetada para ser montada horizontalmente. A câmara tem dimensões internas de 286 x 286 mm<sup>2</sup> de seção transversal e 470 mm de comprimento e é composta de dois módulos.

O primeiro módulo da câmara possui uma seção reta onde é acoplado o queimador e uma parte cônica. O modo de acendimento da câmara é feito por uma chama piloto e quando a câmara alcançar uma temperatura maior que 850°C será acionado a entrada de ar e combustível principal para que o sistema comece operar em regime flameless. Conforme comentado, são necessárias altas temperaturas (> 850°C) dos produtos de combustão em recirculação para se iniciar e manter a estabilidade de operação do sistema.

A câmara de combustão possui nove janelas para acessos óticos (janelas de quartzo) distribuídos ao longo da seção transversal nas três faces. Cada janela possui uma área de 100 x 50 mm. Os visores foram instalados a 200; 350; 448 mm a partir da face frontal da câmara (medidas relativas aos centros das janelas). Com o acesso ótico será possível fazer medidas em regiões estratégicas do escoamento e observar as modificações na estrutura de reação quando algum parâmetro operacional for alterado.

A Fig. (5) mostra o desenho com as dimensões características e detalhes de cada um dos módulos.

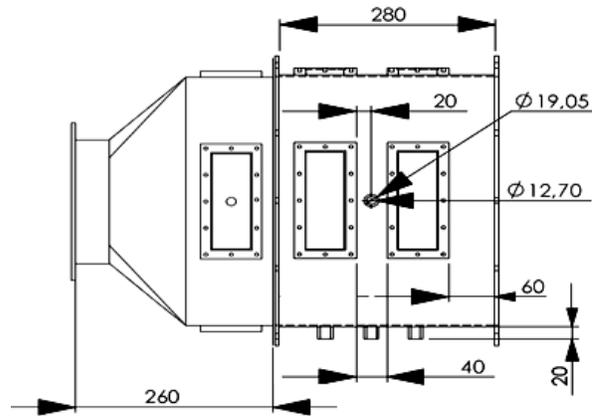


Figura 5. Características da Câmara de Combustão

Devido a importância da minimização da perda de calor para a vizinhança o interior da câmara é revestido com uma parede de bloco refratário de 50 mm de espessura. Espera-se que a temperatura máxima na câmara permaneça na faixa de 1200°C. Ao longo da câmara serão instalados termopares para diversas funções. Na parte inferior da câmara serão posicionados nove termopares para analisar o campo de temperatura ao longo da câmara durante a operação. Outros serão instalados para verificar a temperatura de queima a montante do queimador e para verificar a temperatura de parede.

#### 4.3 Etapa final do projeto

O resultado deste trabalho engloba a montagem final do queimador e câmara proposto nesta pesquisa. Esse sistema foi desenvolvido especialmente para a realização de teste experimentais laboratoriais no intuito de entender os fenômenos (físicos e químicos) da combustão flameless e analisar a redução da emissão do NOx durante a operação. Sendo aqui no presente trabalho apresentado as etapas de seu projeto e confecção.

A câmara foi construída nas dependências do Laboratório de Combustão e Propulsão (LCP) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em Cachoeira Paulista, SP, sendo posteriormente instalada no prédio de ensaios do Laboratório de combustão e Propulsão do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). A Fig. (6.a) apresenta a imagem isométrica da montagem do sistema, queimador e câmara de combustão flameless e a Fig. (6.b) a imagem do sistema montado na bancada no laboratório.

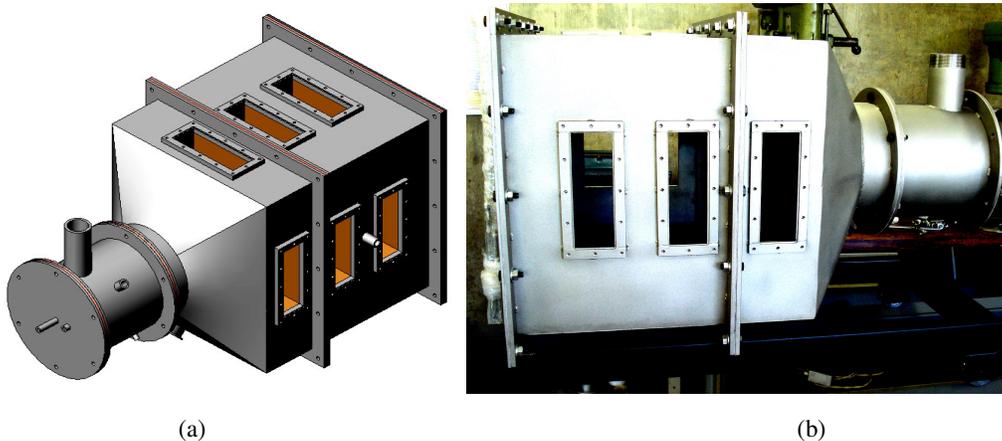
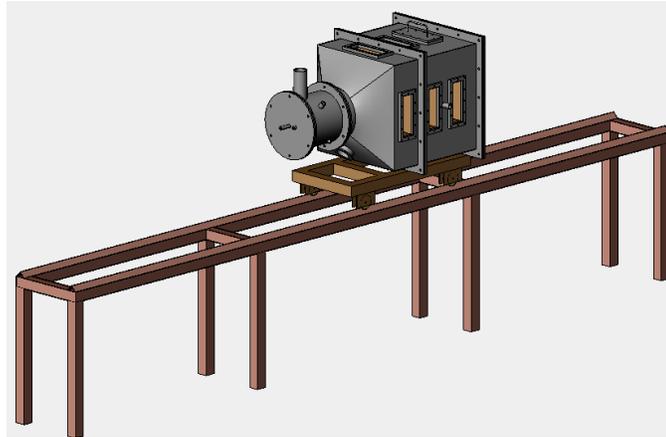


Figura 6. Câmara e Queimador de Combustão Flameless

A Figura (7) mostra parte da montagem experimental permanente capaz de atender às necessidades do trabalho. Basicamente os tipos de ensaios que serão realizados nesse estudo serão: a) velocimetria a laser para escoamentos a frio (velocimetria a frio); b) análise do campo de temperatura e c) análise das emissões de poluentes. As condições dos ensaios experimentais serão todas realizadas nas condições ambientes.



**Figura 7. Bancada Parcial do Experimento**

A velocidade do campo de escoamento será realizada pela velocimetria por imagem de partículas PIV. É um método de medição indireta do campo de velocidade do escoamento em meios gasosos ou líquidos. Ao fluxo serão adicionados particulados não intrusivos (acompanham o escoamento), chamados de traçadores, e é através destes traçadores que se consegue detectar o campo de velocidade e avaliar se o escoamento está uniforme no interior da câmara.

Para as medidas de temperatura em pontos fixos da câmara e no duto de saída dos gases de combustão, serão instalados termopares comerciais tipo “K”, com isolamento mineral, junta isolada e bainha de cerâmica, suportando a temperatura máxima de 1300°C.

A composição dos gases é de especial interesse para avaliar as alterações no processo de combustão e verificar a formação de poluentes. Nos experimentos serão realizadas análises contínuas do CO, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> e especificamente do NO<sub>x</sub>. A captação dos gases será feita por uma sonda refrigerada fixada no duto de exaustão do combustor. Essas medidas apontarão a concentração total de cada gás nos produtos de combustão.

As etapas finais de complemento do projeto serão a bancada experimental com os seguintes aparatos: câmara de combustão, queimador; sistema de aquisição de dados: sistema PIV, transdutor de pressão; além dos instrumentos de operação, painel de rotâmetros, cilindro de GNV e demais acessórios de instrumentação.

## 5. CONCLUSÕES

Sumariamente, as principais conclusões deste presente trabalho são:

a) De modo geral teve-se uma visão geral dos princípios desta modalidade de combustão, as vantagens sobre emissões e produtividade do NO<sub>x</sub>, tipos de queimadores e câmaras mais utilizados e suas promissoras aplicações em diversos setores industriais;

b) Os projetos de queimador e câmara para esta modalidade de combustão possuem uma relativa complexidade, precisando-se de profundo entendimento dos fatores (fenômenos físicos e químicos) que influenciam a mistura e o comportamento padrão deste regime de combustão em escala laboratorial;

c) O desenvolvimento do conjunto experimental (queimador e câmara de combustão) possui uma relativa flexibilidade possibilitando mobilidade dos parâmetros de projeto (pode-se variar os bicos injetores, usar diversos combustíveis, ar frio ou pré-aquecido, etc.) durante testes em bancadas experimentais;

d) Precisa-se ainda de informações apropriadas para se conhecer os mecanismos controladores da combustão “flameless” e que permitam a recomendação de atitudes para projetos práticos de dispositivos térmicos que possam utilizar essa tecnologia;

e) O presente trabalho possibilita adaptar uma montagem experimental capaz de atender às necessidades do projeto a nível laboratorial e que sirva de referência para o estudo desta técnica no Brasil.

## 6. REFERÊNCIAS

- Coelho, P. J., Peters N., 2001, “Numerical simulation of a Mild Combustion burner”, *Combustion and Flame*; Vol. 124, Lisboa, Portugal, pp.503–18.
- Delacroix, F., 2005, “The flameless oxidation mode: an efficient combustion device leading also to very low nox emission levels”. ADEME (French Agency for energy and environment management) 2, square La Fayette, Angers, France, pp.188-195.
- Kuo, K. K., 1986, *Principles of combustion*, Wiley.
- Lefebvre, A.H., 1983, *Gas turbine combustion*, New York, USA, Taylor & Francis.
- Maruta, K., Muso, K., Takeda, K., and Niioka, T., 2000, “Reaction Zone Structure in Flameless Combustion”.

- Proceeding of the Combustion Institute, Vol. 28, pp. 2117-2123.
- Nishimura, M., Suzuki, T., Nakanishi, R., 1997, "Low-nox combustion under high preheated air temperature condition in an industrial furnace", Energy Conversion and Management. Vol. 38, p.1353–1363, 1997.
- Plessing, T., Peters, N., Wüning, J. G., 1998, "Laser Optical Investigation of Highly Preheated Combustion with Strong Exhaust Gas Recirculation", Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, pp. 3197–3204.
- Szego, G.G., Dally, B.B., Nathan, G.J., 2009, "Operational Characteristics of a Parallel jet MILD Combustion Burner System", Combustion and Flame. Vol.156, Australia, pp. 429-438.
- Szego, G.G., Dally, B.B., and Nathan, G.J., 2005, "Scaling of NOx emissions from a laboratory-scale mild combustion furnace", Combustion and Flame. Vol.156, Australia, pp. 281-295.
- Wüning, J.A., and Wüning J.G., 1997, "Flameless Oxidation to reduce thermal NO formation", Progress Energy Combustion Science, vol. 23, pp. 81-94.
- Wüning, J.A., 2004, "Flameless Combustion and its Applications", 14th IFRF Members Conference, Noordwijkerhout, Germany, pp. 285-292.
- Wang Y.D., Huang Y., McIlveen-Wright, D., McMullan, J., Hewitt, N., Eames, P., Rezvani, S., 2006, "A techno-economic analysis of the application of continuous staged-combustion and flameless oxidation to the combustor design in gas turbines", Fuel Processing Technology, Vol. 87, USA, pp. 727–736.

## 7. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio financeiro dispensado ao projeto. A montagem da bancada está instalada no prédio de ensaios do Laboratório de Combustão e Propulsão do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA).

## 8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores Fernando Lima de Oliveira; Pedro Teixeira Lacava; Luis Gilberto Barreta; Giuliano Gardolinski Venson, são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

# DESIGN OF A BURNER AND FLAMELESS COMBUSTION CHAMBER FOR NO<sub>x</sub> REDUCTION

**Fernando Lima de Oliveira, flima@ita.br<sup>1</sup>**

**Pedro Teixeira Laçava, placava@ita.br<sup>2</sup>**

**Luis Gilberto Barreta, barreta@ieav.cta.br<sup>3</sup>**

**Giuliano Gardolinski Venson, venson@ita.br<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Aeronautical Institute of Tecnology – ITA, 50,Pça. Mal. E. Gomes St, Vila das Acácias, S. J. Campos, SP, Brazil

<sup>2</sup>Aeronautical Institute of Tecnology – ITA, 50,Pça. Mal. E. Gomes St, Vila das Acácias, S. J. Campos, SP, Brazil

<sup>3</sup>IEAv - Institute for Advanced Studies, Rod. dos Tamoios, km 5,5 – Torrão de Ouro São José dos Campos, SP, Brazil

<sup>4</sup>Aeronautical Institute of Tecnology – ITA, 50,Pça. Mal. E. Gomes St, Vila das Acácias, S. J. Campos, SP, Brazil

**Abstract.** *This paper reports the design parameters and construction of a model chamber and a burner that were used to implement a new type of combustion, called "Flameless Combustion". It is a system of stable combustion without the presence of visible flame, defined by the recirculation of the hot products of combustion inside the chamber volume. Unlike conventional combustion processes, in this type of combustion no flames are stabilized during the reaction, i.e. you cannot see visible presence of flame inside the combustion volume, and, in addition, temperature peaks do not appear, resulting considered reduction of NO<sub>x</sub> and other pollutants from partial oxidation. Burners used for this purpose usually have a complex geometry, and as a consequence, it is difficult to simplify this process. In this case, this paper purports to describe a study of flameless combustion to know and understand the physical and chemical phenomena that influence the blend and the standard behavior of this regime of combustion in laboratory scale. This work also describes and shows the design of a burner and a flameless combustion chamber for experimental research. To perform the design and construction of the system, a broad-based bibliographic research of experimental works was made, which shows design models and studies of the technique observing the rules and methodologies for the system. The results show a configuration able of achieving the operational requirements of the technique, allowing the reduction of pollutants, specifically NO<sub>x</sub>. These experiments generally demonstrate that this technology is efficient, decreasing the emission of NO<sub>x</sub>, and displaying uniform distribution of heat flow inside the chamber.*

**Palavras-Chave:** 1. Design 2. Burner 3. Chamber 4. Flameless Combustion

The authors Fernando Lima de Oliveira; Pedro Teixeira Lacava; Luis Gilberto Barreta; Giuliano Gardolinski Venson, are the only responsible for the printed material included in this paper.