



21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO EXPERIMENTAL PARA O ESTUDO DA CORRELAÇÃO DA OEC E EXCITAÇÃO ACÚSTICA EM CHAMAS CONFINADAS DE GÁS NATURAL.

Astério Ricardo Barros Pereira, asteriopereira@yahoo.com.br¹

Alex Álisson Bandeira Santos, alex.santos@fieb.org.br¹

Marcelo Cabral Liberato de Mattos Filho, mmcabl12@gmail.com¹

¹SENAI CIMATEC, Avenida Orlando Gomes, 1845, Salvador/BA, Brasil, 41.650-010

Resumo: O uso da combustão nas atividades industrial e humana é de suma importância para o desenvolvimento econômico e social. Mesmo com o fomento às alternativas energéticas para a redução do uso da combustão, esta será um mecanismo de geração de energia ainda muito utilizado, seja pelo uso do gás natural como combustível menos poluente, como também a partir do uso de gases de síntese provenientes da gaseificação da biomassa. Contudo, as reações de combustão são as principais fontes de emissão de poluentes atmosféricos, tais como CO, NO_x, compostos orgânicos voláteis e material particulado. Diante desta realidade, faz-se necessário o estudo de novas técnicas, bem como a correlação entre elas com o objetivo de trazer maior sustentabilidade à combustão. O objetivo deste trabalho é apresentar o desenvolvimento de um protótipo experimental com um sistema de atuação acústica e enriquecimento do oxidante, que será utilizado para avaliar a influência acoplada das técnicas de OEC - Oxygen-Enhanced Combustion e Chama Pulsante na combustão de gás natural em uma chama difusa e confinada, mais difundida em sistemas industriais. No trabalho é também apresentado o planejamento experimental para identificação da condição operacional que otimize em conjunto a avaliação dos efeitos da transferência de calor por radiação da chama como também da emissão de poluentes nas chamas estudadas.

Palavras-chave: Chama pulsante, OEC, Combustão.

1. INTRODUÇÃO

A eficiência energética é um dos pontos fundamentais para a redução de gases estufas, emitidos dos processos de combustão industrial. Os queimadores industriais são, portanto, um dos principais equipamentos que devem ter a sua eficiência térmica aumentada a fim de diminuir o consumo de combustíveis, como também reduzir a emissão de gases poluentes e de efeito estufa. Inúmeras técnicas são usadas para tal, como queima estagiada, queimadores com injeção de ar com swirl, recirculação de gases, combustão em leito fluidizado etc. Todavia, nem sempre a eficiência energética conseguida é suficiente para diminuir o consumo de combustíveis necessários para a realidade atual.

No final da década de 90 surgiu o processo de combustão enriquecida por oxigênio (OEC – Oxygen Enhanced Combustion), que consiste no processo controlado que provoca o aumento da concentração de O₂ na corrente oxidante convencional (ar atmosférico), constituído aproximadamente de 79% de N₂ e 21% de O₂ (em volume).

A escolha do nível de enriquecimento (Ω) depende de vários fatores. Altos ($\Omega > 0,90$) e médios ($0,30 < \Omega < 0,90$) níveis de enriquecimento somente são recomendados para situações que exijam altas temperaturas. O uso de um $\Omega < 0,30$ é bastante recomendado para aplicações de retrofit, devido aos pequenos custos envolvidos para a modificação dos sistemas existentes e do baixo suprimento de oxigênio necessário (Baukal, 1998). Segundo Santos (2010) e Santos *et al.* (2011), na maioria dos casos, queimadores podem operar com sucesso utilizando ar de combustão enriquecido com O₂ até 28% em volume no oxidante, sem modificações no equipamento.

Segundo Baukal (1998), a técnica de OEC traz resultados interessantes, como o aumento de produtividade, eficiência térmica, menor volume de gases de exaustão, redução nas emissões de poluentes, maior eficiência dos processos de transferência de calor e redução do consumo de combustível. Esta é uma técnica já difundida em processos que trabalham com altas temperaturas como siderurgias, indústria de materiais cerâmicos e em incineradores de resíduos, todavia sem registros de utilização em plantas termoeletricas e na indústria de petróleo e gás.

O uso desta técnica associada a queimadores pode trazer uma maior formação de fuligem em certas regiões da chama (Santos *et al.*, 2009) e, sendo a fuligem um meio participante importante na radiação térmica, pode com a sua interação devidamente controlada com a OEC, trazer o aumento de eficiência térmica nos queimadores, aumentando a transferência de calor das chamas para as superfícies de aquecimento através da radiação térmica.

Pode ocorrer um incremento na emissão de NOx em sistemas enriquecidos com oxigênio, devido ao aumento da temperatura adiabática de chama. Entretanto existem dois fatores concorrentes: o aumento da concentração de NOx com a elevação da temperatura e a diminuição da formação do NOx em função da menor quantidade de nitrogênio disponível no oxidante com o maior nível de enriquecimento (Baukal, 1998).

Combustão pulsante pode ser definida como o processo de queima onde temperatura, pressão ou outras variáveis de estado variam com o tempo, caracterizando uma condição oscilatória (Zinn, 1986). A técnica vem sendo estudada desde o século dezoito e tem se mostrado uma interessante ferramenta aplicada a sistemas de combustão, pois oferece algumas vantagens sobre o processo de combustão convencional devido a uma maior taxa de mistura entre o combustível e o oxidante, aumentando a turbulência na região de chama, o que gera uma queima mais eficiente e, conseqüentemente, uma redução na quantidade de combustível utilizada. Ocorre ainda diminuição nas emissões de poluentes gasosos de oxidação parcial e particulados, aumenta a transferência de calor no combustor e há necessidade de um menor investimento de capital para esse processo, se comparado aos processos convencionais (Carvalho *et al.*, 1987).

Segundo Tyndall (1970), a chama musical ou cantante “*singing flame*”, relatada por Byron Higgins em 1777, seria o primeiro exemplo conhecido de combustão pulsante. O mesmo observou que som era produzido quando uma chama difusiva é ancorada em um queimador de gás colocado dentro de um tubo. O som gerado é devido à excitação do modo acústico fundamental ou de um dos harmônicos do tubo.

Um tipo de combustor pulsante que tem sido alvo de diversos estudos ultimamente é o tipo tubo de Rijke. O tubo de Rijke foi descoberto em 1859 por Rijke, o mesmo notou que fortes oscilações acústicas eram excitadas quando uma tela metálica aquecida era colocada na metade inferior de um tubo vertical aberto em ambas as extremidades, dentro do qual escoava ar frio, de baixo para cima (Lord Rayleigh, 1945; Feldman, 1968).

Carvalho *et al.* (1987) compararam as diferenças entre a combustão pulsante e a não pulsante na queima de carvão em um combustor tipo tubo de Rijke e concluíram que as pulsações aumentam não só a taxa de reação entre combustível e oxidante, como também a transferência de calor dos gases quentes para a parede do combustor; ainda verificou-se uma baixa emissão de particulados.

Combustores tipo tubo de Rijke são projetados de forma que o próprio processo de combustão é o responsável pelo surgimento das oscilações acústicas (Martins *et al.*, 2006). Já para projetos convencionais de câmaras de combustão são necessários atuadores externos para induzir as oscilações, como por exemplo, o uso de alto-falantes estrategicamente posicionados. Uma vantagem da atuação direta é o melhor controle do processo, pois quando se tem a excitação natural, proveniente da combustão, as oscilações surgem em condições específicas, o que limita a operacionalidade do combustor. Desta forma, através da atuação de uma fonte externa, é possível controlar as frequências e ou amplitudes de oscilações impostas a câmara de combustão (Rocha *et al.*, 2008).

Papadopoulos *et al.* (2001) e Farhat *et al.* (2005) estudaram os efeitos da excitação externa sobre uma chama em um tubo cilíndrico. Os resultados indicaram que as propriedades da chama são sensíveis às frequências e amplitudes de excitação acústica.

Não há registros de trabalhos que acoplem a excitação acústica de chamas e sua influência associada à combustão de gases a utilização da OEC. A melhoria proporcionada da utilização do enriquecimento do oxigênio na combustão, como também os efeitos benéficos da combustão gerados com a acústica na redução da emissão permitem inferir que a correlação dessas metodologias possa trazer benefícios à combustão de gases.

O trabalho se propõe a apresentar o desenvolvimento de um dispositivo experimental com sistema de atuação acústica e enriquecimento do oxidante com O₂, que será utilizado na avaliação da correlação da OEC, da combustão de gás natural e da excitação acústica e sua influência no aumento da transferência de calor por radiação térmica, como também na emissão de poluentes como NOx, CO₂, CO.

2. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Conforme citado anteriormente, o objetivo do trabalho é apresentar o desenvolvimento de um protótipo experimental para realização de testes para estudo da atuação acoplada da técnica de chama pulsante com a OEC em chamas confinadas difusas de gás natural. Pelos estudos anteriores, a OEC produz um aumento da formação da fuligem em certas regiões da chama, o que, como meio participante da radiação, pode aumentar a transferência de calor da chama para superfícies a serem aquecidas, além de proporcionar uma redução nas emissões de poluentes. A combustão pulsante melhora a taxa de mistura entre o combustível e o oxidante, aumentando a turbulência na região de chama, o que gera uma queima mais eficiente e, conseqüentemente, uma redução na quantidade de combustível utilizada, ocorre ainda diminuição nas emissões de poluentes gasosos de oxidação parcial e particulados, aumenta a transferência de

calor no combustor. É esperado que a aplicação das técnicas de combustão de forma simultâneas a um queimador, pode potencializar as características positivas obtidas com a aplicação das técnicas aplicadas isoladamente.

O queimador experimental apresentado foi inspirado no dispositivo de combustão desenvolvido no trabalho de Ferreira (2001), que foi concebido com sistema de atuação sonora através de uma fonte externa (alto-falante), e também possui características do combustor desenvolvido no trabalho de Santos (2010), que foi projetado com sistema de enriquecimento de O_2 na corrente do ar de combustão.

2.1. Câmara de combustão e queimador

O projeto em CAD do equipamento desenvolvido para realização do experimento e o detalhe da câmara de combustão são apresentados na Figura 1. A câmara de combustão apresenta uma configuração cilíndrica e foi fabricada em aço inox 304 e revestida internamente com concreto refratário, uma janela para visualização da chama além de tomadas para instalação de 10 termopares ao longo do comprimento da chama, 10 pontos de coleta da intensidade de radiação térmica com um radiômetro, três pontos para instalação de transdutores de pressão sonora. No topo da câmara de combustão existe uma câmara de desacoplagem onde serão coletados os gases da combustão para análise sem que o ar externo penetre no combustor através de sua saída, e sem que haja alterações nas características acústicas da câmara de combustão, que simula um tubo aberto para a atmosfera. A excitação sonora será realizada através de um alto-falante instalado estrategicamente na parte inferior do dispositivo experimental.

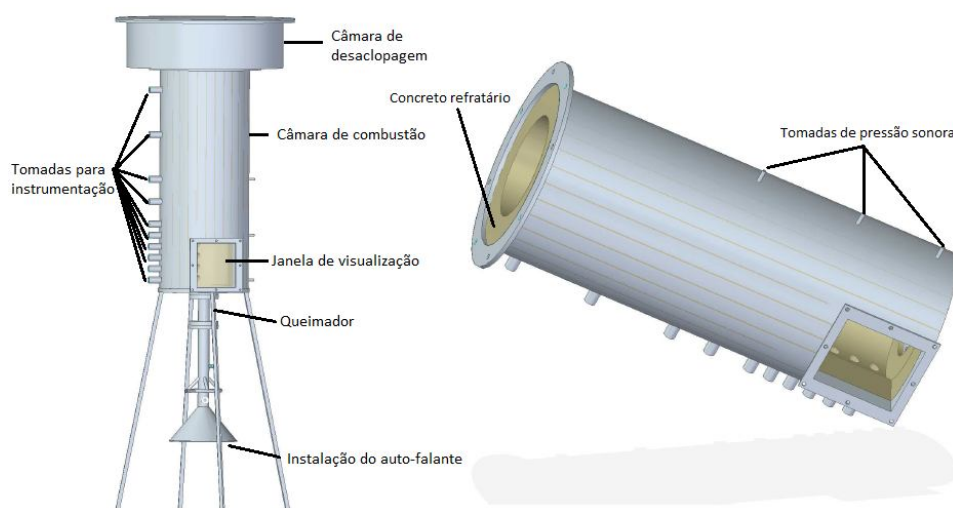


Figura 1. Montagem do dispositivo experimental e detalhe da câmara de combustão.

O queimador é acoplado na parte inferior da câmara de combustão e possibilita o fluxo de combustível e comburente de forma anular onde o fluxo de gás natural é pelo centro do queimador por um canal de 6mm de diâmetro, conforme apresentado na figura 2. A chama é acessa através de um ignitor na saída do combustível. Acoplado ao queimador temos uma peça onde é localizada a entrada do gás natural e do oxidante que foi concebida para possibilitar um fluxo equalizado e sem causar turbulências indesejadas, fato que pode interferir nos resultados do experimento, foi colocada uma tomada de pressão sonora neste ponto para medição dessa grandeza no fluxo de oxidante.

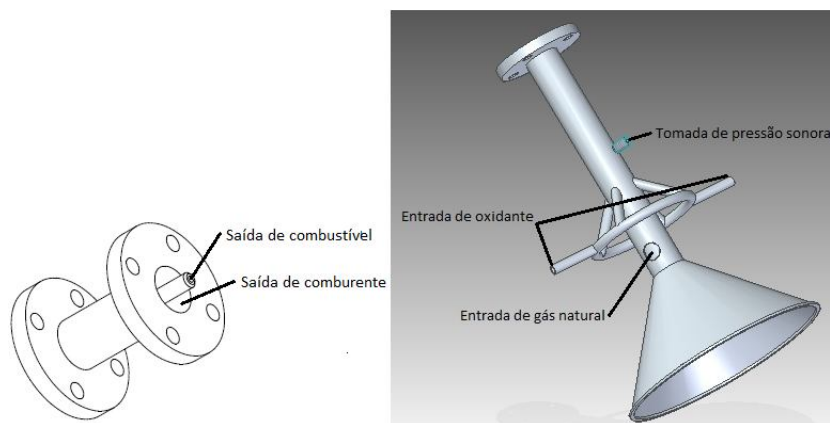


Figura 2. Detalhe do queimador e entrada de gás e oxidante

2.2. Sistema de excitação sonora e de enriquecimento do oxidante

A fonte do campo acústico é o alto-falante Natts, modelo nw 12147 bt de 12", com impedância nominal de 8 ohms e 400W de potência, responsável pela excitação acústica imposta à combustão, suportando uma tensão de até 30V, monitorada por multímetro. O sinal eletrônico responsável pela forma da onda (senoidal) e pela frequência é gerado em um gerador de funções, com amplitude de 1,4 Vrms (1,98 V de pico). Antes de ser injetado no circuito do alto-falante, o sinal eletrônico passa por um amplificador. Para se verificar a amplitude de pressão do ar excitado, colocou-se um transdutor de pressão piezoelétrico de marca Warme e modelo WTP-4010, com um range de 0 a 200mBar, que converte o sinal de pressão acústica em sinal elétrico. Para processamento dos dados coletados, foi utilizada uma plataforma de aquisição de dados da National Instruments denominada Compact Dek, modelo cDAQ-9172 com módulo NI-9205.

O enriquecimento do oxidante é feito através da injeção de O_2 puro na linha do oxidante, onde o mesmo é misturado ao ar atmosférico através do pré-misturador. O pré-misturador de enriquecimento foi concebido para enriquecer com oxigênio o ar fornecido da linha de alimentação para o sistema de queima de combustível. Ele foi confeccionado com aço carbono, possuindo três conexões em rosca também em aço carbono, sendo três bocais de alimentação de ar, oxigênio e nitrogênio (para limpeza e inertização) e um para a descarga de ar enriquecido, conforme a Figura 3. A mistura e homogeneização do oxigênio com o ar é realizada dentro do pré-misturador através de chicanas montadas em seu corpo.



Figura 3. Dispositivo de enriquecimento do ar de combustão

A medição de vazão, especificando as condições de teste no experimento, tanto para o gás natural, ar e oxigênio, foi controlada através de rotâmetros. Os rotâmetros possuem o ar como referência. Para a utilização dos gases em questão é necessário fazer as correções de densidade para a correta medição de vazão. Suas características técnicas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características técnicas dos rotâmetros.

Rotâmetro	Uso	Fabricante	Gás Referência	Faixa de Vazão	Incerteza
1	Ar	OMEL	Ar 25°C 7bar	0-500 L/min	$\pm 2,5$ L/min
2	Ar	OMEL	Ar 22,5°C 7bar	0-1.000 L/min	$\pm 2,5$ L/min
3	O_2	OMEL	Ar 25°C 7bar	0-300 L/min	$\pm 2,5$ L/min
4	Gás Natural e Acetileno	OMEL	Ar 25°C 7bar	0-100 L/min	$\pm 0,5$ L/min

Na Figura 4 é apresentado um diagrama esquemático do sistema de excitação sonora e enriquecimento do ar de combustão com O_2 , além de apresentar como será feita a aquisição dos dados para interpretação dos resultados.

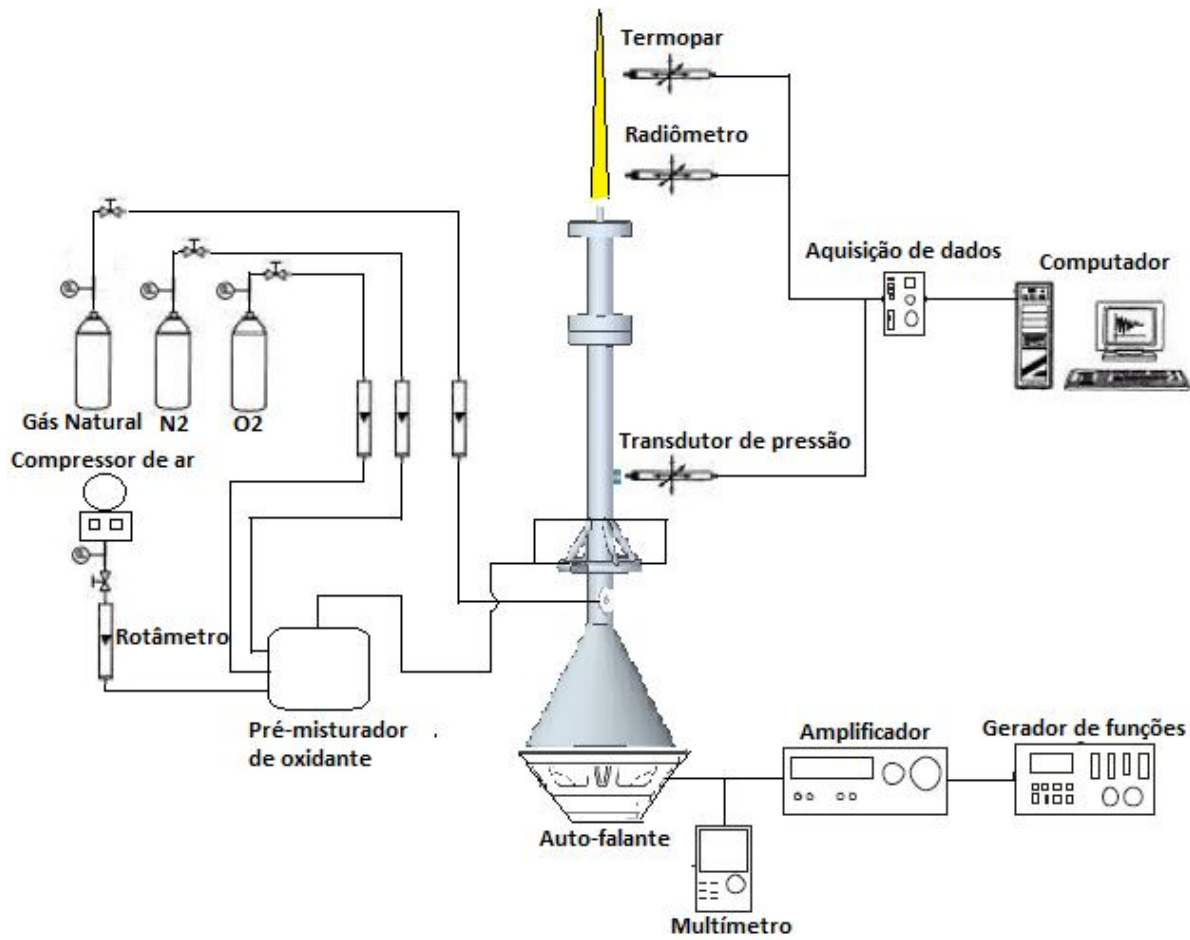


Figura 4. Diagrama esquemático do funcionamento do protótipo experimental.

A medição do fluxo de radiação térmica na câmara de combustão foi executada através de um dispositivo de medição desta grandeza conhecido como radiômetro. O mesmo foi fabricado para detectar radiação na faixa espectral de 0,6- 3 μm . O ângulo de vista é 150°. A faixa de medição é de 0- 10 kW/m^2 com uma incerteza de 3%. Os sinais gerados no radiômetro são transmitidos para o sistema de aquisição de dados. O radiômetro é fabricado pela MEDTHERM modelo 64P-1-22.

Os gases de exaustão são analisados utilizando um analisador de gases do tipo portátil com células de medição. O instrumento é do modelo TEMPSET 100 de fabricação da Telegan Monitoring Ltd. Este permite a medição dos seguintes gases na exaustão: oxigênio (O₂), monóxido de Carbono (CO), óxidos de nitrogênio - NO_x (óxido nítrico - NO e dióxido de nitrogênio - NO₂), dióxido de enxofre (SO₂), sulfeto de hidrogênio (H₂S). Na Tabela 2 é apresentada a faixa de medição e faixa de incerteza.

Tabela 2. Características técnicas do analisador de gases.

Gás Monitorado	Faixa de Medição	Incerteza
Oxigênio (O ₂)	0 -25%	$\pm 0,2\%$
Monóxido de Carbono (CO)	0 - 10.000 ppm	± 5 ppm
Óxido Nítrico (NO)	0 - 1.000 ppm	± 5 ppm
Dióxido de Nitrogênio (NO ₂)	0 - 200 ppm	± 5 ppm

3. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Na figura 5 é apresentado um diagrama espinha de peixe do experimento, onde o objetivo é identificar os fatores que podem interferir nas variáveis de resposta do experimento.

Para realização do experimento serão considerados três fatores controlados de entrada: frequência sonora, grau de enriquecimento do oxidante e o fator de equivalência ar/combustível. Sendo que a “frequência sonora” é uma característica específica da técnica de combustão excitada com ondas sonoras, o “grau de enriquecimento do oxidante” um fator característico da técnica de combustão enriquecida com oxigênio (OEC) e o “fator de equivalência ar/combustível” é uma variável comum no estudo do fenômeno de combustão que dá uma referência do excesso de ar envolvido na queima.

Serão considerados fixos os seguintes fatores: equipamento, composição química do combustível, temperatura de entrada dos gases, lotes de matéria prima.

As respostas a serem analisadas são: radiação térmica, concentração de CO e concentração de NOx.

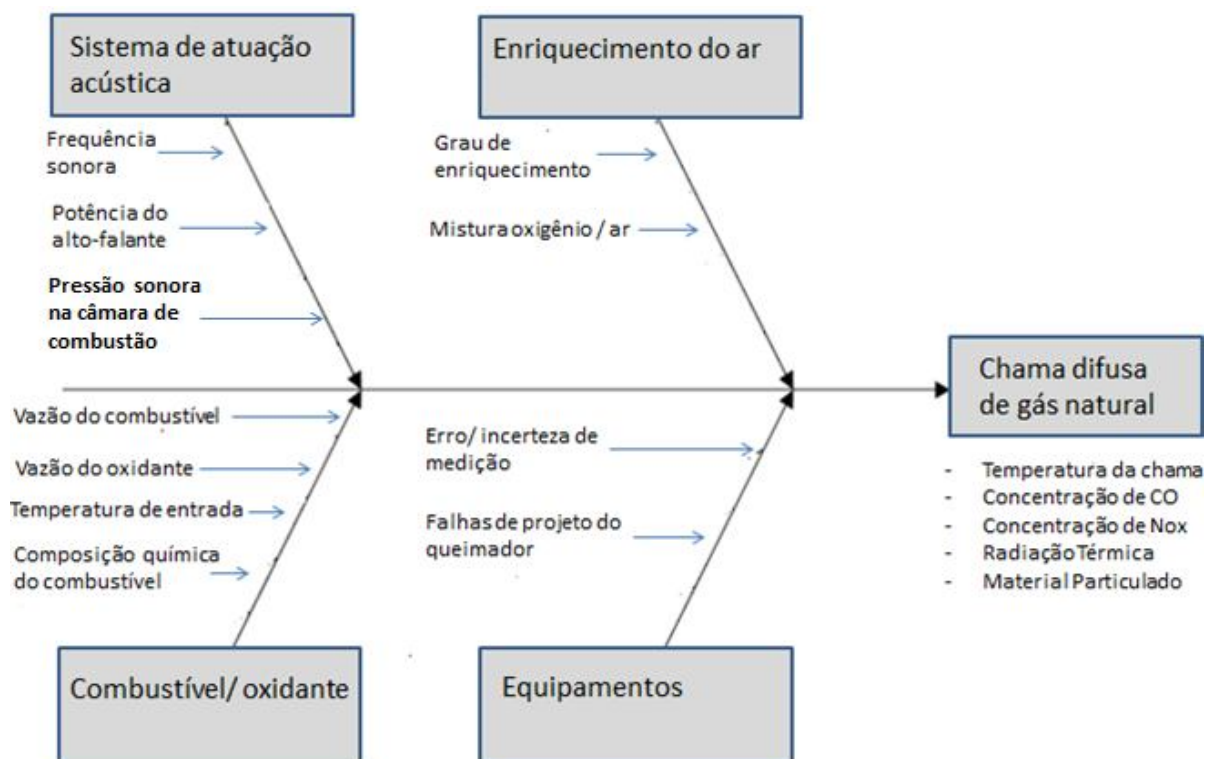


Figura 5. Diagrama espinha de peixe representando o experimento.

O experimento a ser conduzido seguirá a metodologia do DOE - design of experiments proposta por Montgomery (2012), o experimento trata-se de um fatorial de dois níveis de cada um dos três fatores controláveis de entrada, com o objetivo de identificar, através da análise de variância, quais fatores e combinação deles tem maior interferência em cada variável resposta do processo, bem como, obter um modelo de equação que represente com confiança o fenômeno em estudo, na Tabela 3 é apresentado um resumo do experimento a ser realizado.

A combinação de cada nível dos três fatores de entrada nos fornece oito condições diferentes de ensaio, que serão realizados de forma randomizada conforme apresentado na Tabela 3. As oito condições de ensaio serão repetidas uma vez totalizando 16 amostragens a serem realizadas, divididas em dois blocos de oito, cada bloco realizado em dias diferentes. O software estatístico Minitab será utilizado para auxiliar na análise e interpretação dos resultados.

Na análise dos resultados caso o modelo para alguma das variáveis resposta não estejam com uma confiabilidade aceitável, será necessário adicionar pontos de análise, como: (adicionar pontos centrais às variáveis de entrada, adicionar pontos axiais etc.).

Por fim, após ajustados os modelos, será utilizado a ferramenta de otimização da plataforma estatística Minitab para os seguintes objetivos para cada resposta: radiação térmica (maximizar), concentração de CO (minimizar), concentração de NOx (minimizar), será possível com isso identificar a condição operacional em que o queimador pode trabalhar para que as concentrações de CO e NOx sejam reduzidas ao mesmo tempo que a radiação térmica transferida para as paredes da câmara de combustão seja maximizada.

Tabela 3. Resumo do planejamento experimental.

DOE PARA CORRELAÇÃO DE CHAMA PULSANTE COM OEC DE CHAMA DIFUSA DE GAS NATURAL																																																																																																																																
Processo:			Combustão de chama confinada difusa de gás natural																																																																																																																													
Objetivo do experimento:			Maximizar radiação térmica, minimizar concentração de CO e NO _x																																																																																																																													
Respostas (Y)			Unidades			Níveis																																																																																																																										
Radiação térmica			kW/m2			A medir																																																																																																																										
Concentração de CO			ppm			A medir																																																																																																																										
Concentração de NO _x			ppm			A medir																																																																																																																										
Fatores controlados			Unidades			Níveis																																																																																																																										
X1: frequência sonora			Hz			Sem frequência (-1) - primeiro harmônico (1)																																																																																																																										
X2: grau de enriquecimento de O ₂			%			Sem enriquecimento (-1) - 4% de enriquecimento (1)																																																																																																																										
X3: equivalência ar/combustível			-			0,9 (-1) - 1,1 (1)																																																																																																																										
Fatores não controlados previsíveis ou imprevisíveis			Equipamento, composição química do combustível, temperatura de entrada dos gases, lotes de matéria prima.																																																																																																																													
Total de ensaios:			16 ensaios. O ensaio completo será repetido																																																																																																																													
Randomização:			Sim																																																																																																																													
Uso de blocos:			As duas repetições do experimento serão feitas em dois blocos: 8 ensaios em um dia e os restantes 8 em outro dia.																																																																																																																													
Matriz de ensaios e ordem de execução:			<table><tr><td>Random</td><td>Run</td><td>Blocos</td><td>X1</td><td>X2</td><td>X3</td><td>Y</td></tr><tr><td>4</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>-1</td><td rowspan="9">A MEDIR</td></tr><tr><td>8</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>3</td><td>1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td></tr><tr><td>7</td><td>4</td><td>1</td><td>-1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>3</td><td>5</td><td>1</td><td>-1</td><td>1</td><td>-1</td></tr><tr><td>6</td><td>6</td><td>1</td><td>1</td><td>-1</td><td>1</td></tr><tr><td>2</td><td>7</td><td>1</td><td>1</td><td>-1</td><td>-1</td></tr><tr><td>5</td><td>8</td><td>1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>1</td></tr></table>							Random	Run	Blocos	X1	X2	X3	Y	4	1	1	1	1	-1	A MEDIR	8	2	1	1	1	1	1	3	1	-1	-1	-1	7	4	1	-1	1	1	3	5	1	-1	1	-1	6	6	1	1	-1	1	2	7	1	1	-1	-1	5	8	1	-1	-1	1	<table><tr><td>Random</td><td>Run</td><td>Blocos</td><td>X1</td><td>X2</td><td>X3</td><td>Y</td></tr><tr><td>15</td><td>9</td><td>2</td><td>-1</td><td>1</td><td>1</td><td rowspan="9">A MEDIR</td></tr><tr><td>16</td><td>10</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>12</td><td>11</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>-1</td></tr><tr><td>14</td><td>12</td><td>2</td><td>1</td><td>-1</td><td>1</td></tr><tr><td>10</td><td>13</td><td>2</td><td>1</td><td>-1</td><td>-1</td></tr><tr><td>13</td><td>14</td><td>2</td><td>-1</td><td>-1</td><td>1</td></tr><tr><td>11</td><td>15</td><td>2</td><td>-1</td><td>1</td><td>-1</td></tr><tr><td>9</td><td>16</td><td>2</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td></tr></table>							Random	Run	Blocos	X1	X2	X3	Y	15	9	2	-1	1	1	A MEDIR	16	10	2	1	1	1	12	11	2	1	1	-1	14	12	2	1	-1	1	10	13	2	1	-1	-1	13	14	2	-1	-1	1	11	15	2	-1	1	-1	9	16	2	-1	-1	-1
			Random	Run	Blocos	X1	X2	X3	Y																																																																																																																							
			4	1	1	1	1	-1	A MEDIR																																																																																																																							
			8	2	1	1	1	1																																																																																																																								
			1	3	1	-1	-1	-1																																																																																																																								
			7	4	1	-1	1	1																																																																																																																								
			3	5	1	-1	1	-1																																																																																																																								
			6	6	1	1	-1	1																																																																																																																								
			2	7	1	1	-1	-1																																																																																																																								
			5	8	1	-1	-1	1																																																																																																																								
Random	Run	Blocos	X1	X2	X3	Y																																																																																																																										
15	9	2	-1	1	1	A MEDIR																																																																																																																										
16	10	2	1	1	1																																																																																																																											
12	11	2	1	1	-1																																																																																																																											
14	12	2	1	-1	1																																																																																																																											
10	13	2	1	-1	-1																																																																																																																											
13	14	2	-1	-1	1																																																																																																																											
11	15	2	-1	1	-1																																																																																																																											
9	16	2	-1	-1	-1																																																																																																																											

4. CONCLUSÕES

O presente artigo apresentou o desenvolvimento de um dispositivo experimental que está sendo fabricado para realização de experimentos para correlacionar os efeitos de duas técnicas de combustão já estudadas individualmente, são elas: OEC – Combustão enriquecida por oxigênio e combustão pulsante. Acredita-se que é possível combinar os efeitos benéficos das duas técnicas, quando aplicadas de forma conjunta, tais como: estudos mostram que para baixos níveis de enriquecimento de O₂ (até 30% de concentração de O₂ no oxidante) as concentrações de NO_x aumentam, logo, espera-se que aplicando esta condição de OEC combinada com excitação sonora da chama, as concentrações de óxidos de nitrogênio nos gases de exaustão possam ser reduzidas para condições de combustão pobre, devido a uma melhor mistura entre combustível e oxidante, proporcionada pelas ondas sonoras.

O estudo dos efeitos conjuntos das duas técnicas, apresenta-se como uma oportunidade promissora de aumento de eficiência e redução nas emissões de poluentes de instalações industriais já existentes, devido ao baixo grau de mudanças necessárias para implementá-las, não sendo necessário substituição total dos queimadores já instalados.

O combustor experimental apresentado pode ser usado para realizar pesquisas com outros tipos de combustíveis, bem como, outras configurações de queimadores e de câmaras de combustão, devido a concepção modular do mesmo, as partes podem ser substituídas, por exemplo: substituir o queimador por outro com injeção de ar com swirl ou substituir a câmara de combustão por outra com diferente geometria.

É importante salientar que essa é a fase inicial do projeto de pesquisa, e os resultados dos ensaios no dispositivo experimental serão publicados em trabalhos futuros.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao SENAI CIMATEC pelo apoio financeiro e tecnológico.

6. REFERÊNCIAS

- Baukal, Jr., C.E., 1998. *Oxygen-Enhanced Combustion*. 1a ed. New York: CRC Press, 369 p.
- Carvalho Jr., J.A., Miller, N., Daniel, B.R. and Zinn, B.T., 1987. "Combustion characteristics of unpulverized coal under pulsating and non pulsating conditions", *Fuel*, Vol. 66, n. 1, pp. 4-8.
- Farhat, S., Kleiner, D., and Zhang, Y., 2005. "Jet diffusion flame characteristics in a loudspeaker-induced standing wave". *Combust. Flame*, Vol. 142, pp. 317-323.
- Feldman Jr, K.T, 1968. "Review of the literature on Rijke thermoacoustic phenomena". *J. Sound Vibrat*, Vol. 7, pp. 83-89.
- Ferreira, D.S., 2001. Queimadores pulsantes para baixas emissões de poluentes. Guaratinguetá, Dissertação (Mestrado em Transmissão e Conversão de Energia) - UNESP. 165 p.
- Lord Rayleigh, 1945. "The theory of sound", New York, Dover, pp. 224-235.
- Martins, C.A., Carvalho Jr, J.A., Veras, C.A.G., Ferreira, M.A. and Lacava, P. T., 2006. "Experimental measurements of the NOx and CO concentrations operating in oscillatory and non-oscillatory burning conditions", *Fuel*, Vol. 85, (1), pp. 84-93.
- Montgomery, D.C., 2012. *Design and Analysis of Experiments*. 8th ed. 752 p.
- Papadopoulos, T., Pritchard, M., Green, C., and Zhang, Y., 2001. "Flame Patterns of Acoustic Wave and Flame Interaction in a Cylindrical Tube". *J. Visualization*, Vol. 4, pp. 179-184.
- Rocha, A. M. A, Carvalho, J. A and Lacava, P. T, 2008. "Gas concentration and temperature in acoustically excited Delft turbulent jet flames". *Fuel*, Vol. 87, pp. 3433-3444.
- Santos, A.A.B., Goldstein, Jr., L. and Ferrari, C.A., 2009. "An Experiment on the Effect of Oxygen Content and Air Velocity on Soot Formation in Acetylene Laminar Diffusion Flame Produced in a Burner with a Parallel Annular Coaxial Oxidizer Flow", *International Communications in Heat and Mass Transfer*. Vol. 36, pp. 445-450.
- Santos, A.A.B., 2010. Investigação do uso da combustão enriquecida com O₂ em chamas confinadas de gás natural, tese de doutorado, Universidade Federal da Bahia. 242 p.
- Santos, A.A.B., Torres, E.A., and Pereira, P.A.P., 2011. "Critical Evaluation of the Oxygen-Enhanced Combustion in Gas Burners for Industrial Applications and Heating Systems". *J. Braz. Chem. Soc.*, Vol. 22, N. 10, pp. 1841-1849.
- Tyndall, J., 1970. "Sound", *Physical Sciences*, Vol. 30, pp. 231-257.
- Zinn, B.T., 1986. *Pulsating combustion*. Weinberg, F.J., ed. Advanced combustion methods. London: Academic Press, pp. 113-181.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

PROTOTYPE DEVELOPMENT EXPERIMENTAL STUDY FOR CORRELATION BETWEEN THE OEC AND EXCITING ACOUSTIC IN FLAMES CONFINED NATURAL GAS.

Astério Ricardo Barros Pereira, asteriopereira@yahoo.com.br 1
 Alex Álisson Bandeira Santos, alex.santos@fieb.org.br 1
 Marcelo Cabral Liberato de Mattos Filho, mmcabl12@gmail.com 1

¹SENAI CIMATEC, Avenida Orlando Gomes, 1845, Salvador/BA, Brasil, 41.650-010

Abstract. The use of combustion in industrial and human activities is of paramount importance for economic and social development. Even with the development for energy alternatives for reducing the use of combustion, this is an energy generation mechanism still widely used, is by the use of natural gas as a cleaner fuel, but also from the use of synthesis gas from biomass gasification. However, combustion reactions are the main sources of emissions of air pollutants such as CO, NOx, volatile organic compounds and particulate matter. Given this reality, it is necessary to study new techniques as well as the correlation between them in order to bring greater sustainability to combustion. The aim of this paper is to present the development of an experimental prototype with an acoustic actuation system and oxidant enrichment, which will be used to evaluate the coupled influence of OEC techniques - Oxygen-Enhanced Combustion and Flame Pulsating in natural gas combustion in a called diffuse and confined more widespread in industrial systems. At work is also presented the experimental design to identify the operating condition that optimizes together the assessment of the effects of heat transfer by flame radiation as well as the emission of pollutants in the studied flames.

Keywords: pulsating flame, OEC, Combustion.