



Federação das Indústrias do Estado da Bahia

FACULDADE DE TECNOLOGIA SENAI CIMATEC

PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU
GESTÃO E TECNOLOGIA INDUSTRIAL

ASTÉRIO RICARDO BARROS PEREIRA

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA CORRELAÇÃO DA
COMBUSTÃO ENRIQUECIDA COM O₂ E EXCITAÇÃO
ACÚSTICA EM CHAMAS DE GÁS NATURAL

Salvador
2017

ASTÉRIO RICARDO BARROS PEREIRA

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA CORRELAÇÃO DA
COMBUSTÃO ENRIQUECIDA COM O₂ E EXCITAÇÃO
ACÚSTICA EM CHAMAS DE GÁS NATURAL

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu da Faculdade Tecnologia SENAI CIMATEC como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial

Orientador: Prof. Dr. Alex Álisson Bandeira Santos

Salvador
2017

ASTÉRIO RICARDO BARROS PEREIRA

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA CORRELAÇÃO DA
COMBUSTÃO ENRIQUECIDA COM O₂ E EXCITAÇÃO
ACÚSTICA EM CHAMAS DE GÁS NATURAL

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial, Faculdade de Tecnologia SENAI Cimatec.

Aprovada em 30 de maio de 2017.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Alex Álisson Bandeira Santos

Doutor em Energia e Ambiente pela Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil
Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC

Prof. Dr. Vitor Pinheiro Ferreira

Doutor em Energia e Ambiente pela Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - UFRB

Profa. Dra. Lilian Lefol Nani Guarieiro

Doutora em Química pela Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil
Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC

Dedico este trabalho a
Meu filho, Yuri, que é o meu combustível para seguir em frente e a minha avó, Dona Lourdes, que foi fundamental na minha educação e formação como ser humano e será sempre lembrada em todos os passos da minha caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por sempre estar a meu lado, em todos os momentos.

À minha esposa, Bruna, companheira, amiga, conselheira, sempre esteve comigo nas horas felizes e principalmente nas horas de tristeza e superação.

À minha mãe, Vera, fonte de inspiração na vida profissional, apoio e dedicação na vida pessoal. Ensinou-me que não basta querer, temos que batalhar, para conseguir.

A meu orientador Prof. Dr. Alex Álisson Bandeira Santos, pela compreensão, paciência e pelas valiosas orientações passadas a mim neste período de convivência, que possibilitaram a conclusão deste trabalho.

A Profa. Dr. Lilian Lefol Nani Guarieiro, pelos aconselhamentos e orientações, que foram fundamentais na fase final do trabalho.

A todos os amigos, pelo apoio dado nos vários momentos de dificuldade durante todo o período de mestrado. Tenho certeza que serão amigos para sempre.

RESUMO

O uso da combustão nas atividades industrial e doméstica 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 (monóxido de carbono), NOx (óxidos de nitrogênio), compostos orgânicos voláteis e material particulado. Diante desta realidade, faz-se necessário o estudo de novas técnicas de combustão, bem como a correlação entre elas com o objetivo de trazer maior sustentabilidade à combustão. O objetivo do trabalho foi correlacionar a técnica de combustão enriquecida com oxigênio (OEC – *Oxygen Enhanced Combustion*) e a combustão pulsante pela excitação acústica de chamas, forçada por uma fonte externa, avaliando o efeito do uso dessas técnicas nas emissões atmosféricas do CO e NOx e na temperatura dos gases de exaustão em chamas difusivas e confinadas de gás natural. Para tal, foi desenvolvido um queimador experimental com sistemas de atuação acústica através de um alto-falante e enriquecimento do oxidante com oxigênio. Foi utilizado um planejamento experimental fatorial 2^3 onde os fatores controláveis de entrada foram: tensão de entrada no alto-falante (amplitude de sinal), nível de enriquecimento do oxidante e razão de equivalência. Foram determinadas as condições otimizadas das variáveis estudadas através da utilização da equação de regressão para cada variável. Os resultados mostraram uma boa representatividade do modelo de regressão encontrado. Pela análise dos dados, foi possível identificar quais fatores tem maior efeito nas variáveis resposta, bem como observar uma tendência geral de redução nas emissões de CO com o enriquecimento do oxidante com O_2 e também em algumas condições com chama excitada acusticamente. Foi possível também identificar uma redução das concentrações de NOx para chamas enriquecidas com O_2 , com a inclusão de excitações sonoras à chama. Ficou evidenciado também o comportamento antagônico da concentração de NOx com a de CO. O queimador projetado foi validado através dos testes de validação, que apresentaram desvios aceitáveis para os valores encontrados nos testes experimentais, com relação aos encontrados pelo modelo de regressão proposto. Os resultados encontrados mostram que as técnicas de OEC e combustão pulsante aplicadas em conjunto e de forma controlada podem trazer ganhos para redução nas emissões de poluentes e aumento na eficiência de equipamentos térmicos a combustão, visto que houve uma significativa redução nas emissões de CO que evidencia o aumento de eficiência, além de ser observado também uma redução nas emissões de NOx para condição de aplicação conjunta do enriquecimento com O_2 e excitação sonora da chama.

Palavras-chave: OEC; combustão pulsante; excitação acústica de chamas.

ABSTRACT

The use of combustion in industrial and domestic activities is of paramount importance for economic and social development. Even with the promotion of energy alternatives to reduce the use of combustion, this will be a mechanism for the generation of energy still widely used, either by the use of natural gas as a less polluting fuel, but also by the use of synthesis gases from the Biomass gasification. However, combustion reactions are the major sources of air pollutants, such as CO (carbon monoxide), NO_x (nitrogen oxides), volatile organic compounds and particulate matter. Given this reality, it is necessary to study new combustion techniques, as well as the correlation between them in order to bring greater sustainability to combustion. The objective of this work was to correlate OEC (Oxygen Enhanced Combustion) and pulsed combustion by the acoustic excitation of flames, forced by an external source, evaluating the effect of the use of these techniques on the atmospheric emissions of CO and NO_x And the temperature of the exhaust gases in diffusive and confined natural gas flames. For this, an experimental burner was developed with acoustic systems through a loudspeaker and enrichment of the oxidant with oxygen. A factorial experimental design 2³ was used where the controllable input factors were: speaker input voltage (signal amplitude), oxidant enrichment level and equivalence ratio. The optimized conditions of the studied variables were determined through the use of the regression equation for each variable. The results showed a good representation of the regression model found. By analyzing the data, it was possible to identify which factors have a greater effect on the response variables, as well as to observe a general tendency of reduction in the CO emissions with the enrichment of the oxidant with O₂ and also in some conditions with acoustically excited flame. It was also possible to identify a reduction of NO_x concentrations for O₂-enriched flames with the inclusion of flame excitations. It was also evidenced the antagonistic behavior of the concentration of NO_x with that of CO. The burner was validated through the validation tests, which presented acceptable deviations for the values found in the experimental tests, in relation to those found by the proposed regression model. The results show that OEC and pulsed combustion techniques applied together and in a controlled manner can bring gains to reduce the emissions of pollutants and increase the efficiency of combustion thermal equipment, since there was a significant reduction in the CO emissions that evidences The increase of efficiency, besides being also observed a reduction in NO_x emissions to the condition of joint application of the enrichment with O₂ and sound excitation of the flame.

Keywords: OEC; pulsed combustion; acoustic excitation of flames.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Chama difusa clássica. | 7 |
| Figura 2 – Perfil de concentração de uma chama difusiva laminar..... | 8 |
| Figura 3 – Variação do formato da chama difusiva com a velocidade. | 9 |
| Figura 4 – Emissão de NO _x térmico em função da temperatura de chama (T _{ch}) e do coeficiente de excesso de ar para combustíveis sólidos..... | 13 |
| Figura 5 – Emissão de poluentes em função da razão de ar/combustível. | 15 |
| Figura 6 – Método de “ <i>air enrichment</i> ”. | 17 |
| Figura 7 – Método de “ <i>O₂ Lancing</i> ”..... | 17 |
| Figura 8 – Método de “ <i>Oxy/Fuel</i> ”..... | 18 |
| Figura 9 – Método de “ <i>Air-Oxy/Fuel</i> ”. | 18 |
| Figura 10 – Volume de gases de exaustão X Volume de O ₂ no oxidante para uma combustão estequiométrica de metano. | 19 |
| Figura 11 – Variação dos limites de inflamabilidade com o aumento da concentração de O ₂ no oxidante para o gás metano. | 20 |
| Figura 12 – Mínima energia de ignição em função da composição do oxidante para combustão estequiométrica de CH ₄ a pressão atmosfera..... | 21 |
| Figura 13 – Temperatura de ignição para uma composição estequiométrica do metano como função da composição do oxidante. | 21 |
| Figura 14 – Variação típica da temperatura adiabática de chama para combustão de gás natural em função da razão do nível de enriquecimento de oxigênio (Ω). | 23 |
| Figura 15 – Concentração de NO em função do volume de O ₂ no oxidante para combustão estequiométrica de CH ₄ | 24 |
| Figura 16 – Esquema do modo fundamental do tubo de Rijke. | 29 |
| Figura 17 – Fluxograma de etapas da metodologia..... | 34 |
| Figura 18 – Projeto CAD do queimador (a); detalhe da câmara de combustão (b)..... | 35 |
| Figura 19 – Dispositivo experimental para realização dos ensaios..... | 36 |
| Figura 20 – Detalhe do queimador (a); entrada de gás e oxidante (b)..... | 37 |

| | |
|---|----|
| Figura 21 – Pré - misturador de enriquecimento. | 38 |
| Figura 22 – Diagrama esquemático do funcionamento do protótipo experimental..... | 40 |
| Figura 23 – Diagrama espinha de peixe representando o experimento..... | 41 |
| Figura 24 – Detalhe do ponto de coleta dos gases de exaustão. | 42 |
| Figura 25 – Gráfico de Frequência x Amplitude de pressão sonora. | 45 |
| Figura 26 – Gráfico de Pareto: (a) CO; (b) NOx; (c) Temperatura de exaustão..... | 52 |
| Figura 27 – Gráfico dos efeitos principais para: (a) CO; (b) NOx; (c) Temperatura de exaustão..... | 54 |
| Figura 28 – Gráfico de contorno de Razão de equivalência x Nível de enriquecimento para: (a) CO; (b) NOx; (c) Temperatura de exaustão..... | 56 |
| Figura 29 – Gráfico de contorno de Razão de equivalência x Tensão para: (a) CO; (b) NOx; (c) Temperatura de exaustão..... | 57 |
| Figura 30 – Gráfico de contorno de Nível de enriquecimento x Tensão para: (a) CO; (b) NOx; (c) Temperatura de exaustão..... | 58 |
| Figura 31 – Gráfico de contorno para as variáveis resposta: (a) CO em z; (b) NOx em z; (c) Temperatura de exaustão em z. | 60 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Composições médias do ar ambiente. | 4 |
| Tabela 2 - Limites de inflamabilidade inferior e superior de alguns combustíveis em ar e em oxigênio puro. | 20 |
| Tabela 3 – Especificação técnica do alto-falante. | 38 |
| Tabela 4 – Características técnicas dos rotômetros. | 39 |
| Tabela 5 – Características técnicas do analisador de gases. | 42 |
| Tabela 6 – Planejamento experimental 2^3 + ponto central. | 43 |
| Tabela 7 – Caracterização dos limites das variáveis controláveis mais ponto central. | 46 |
| Tabela 8 – Especificação técnica do gás natural. | 47 |
| Tabela 9 - Parâmetros calculados para realização do experimento. | 47 |
| Tabela 10 – Resultados do experimento. | 50 |
| Tabela 11 – Médias e desvios padrão dos resultados. | 51 |
| Tabela 12 – Equações de regressão. | 52 |
| Tabela 13 – Valores de P para os fatores principais e interações entre eles. | 54 |
| Tabela 14 – Condições operacionais otimizadas para o queimador projetado. | 60 |
| Tabela 15 – Parâmetros para realização dos testes de validação. | 61 |
| Tabela 16 – Resultado do teste de validação. | 61 |
| Tabela 17 – Composição dos custos associados ao dispositivo experimental. | 62 |
| Tabela 18 – Composição dos custos associados por unidade de potência. | 63 |

LISTAS DE SIGLAS

| | |
|-----------------|--------------------------------------|
| CO | Monóxido de carbono |
| NO _x | Óxidos de nitrogênio |
| OEC | <i>Oxygen Enhanced Combustion</i> |
| DOE | <i>Design of Experiments</i> |
| O ₂ | Molécula de oxigênio |
| N ₂ | Molécula de nitrogênio |
| AC | Razão ar/combustível |
| CA | Razão combustível/ar |
| ϕ | Razão de equivalência |
| Re | Número de Reynolds |
| u | Velocidade |
| d | Diâmetro |
| ρ | Densidade |
| μ | Viscosidade cinemática |
| SO _x | Óxidos de enxofre |
| CO ₂ | Dióxido de carbono |
| HC | Hidrocarbonetos |
| H | Hidrogênio |
| O | Átomo de oxigênio |
| N | Átomo de nitrogênio |
| Ω | Nível de enriquecimento com oxigênio |
| Q | Taxa de energia |
| P' | Pressão acústica média |
| t | Tempo |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO | 3 |
| 1.1.1. Objetivo Geral | 3 |
| 1.1.2. Objetivos Específicos | 3 |
| 1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO | 3 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 4 |
| 2.1 COMBUSTÃO DE COMBUSTÍVEIS GASOSOS | 4 |
| 2.1.1. Combustão com Chama | 5 |
| 2.1.2. Chamas Difusivas Laminares | 6 |
| 2.1.3. Chamas Difusivas Turbulentas | 8 |
| 2.2 EMISSÕES DE POLUENTES..... | 9 |
| 2.2.1. Emissões de Monóxido de Carbono | 10 |
| 2.2.2. Emissões de Óxidos de Nitrogênio | 12 |
| 2.3 COMBUSTÃO ENRIQUECIDA COM OXIGÊNIO (OEC) | 15 |
| 2.4 COMBUSTÃO PULSANTE | 27 |
| 2.4.1. Efeitos da Excitação Acústica em Chamas Difusivas | 30 |
| 2.5 ASPECTOS ECONÔMICOS DO USO DO QUEIMADOR COM OEC E COMBUSTÃO PULSANTE | 32 |
| 3. METODOLOGIA | 34 |
| 3.1 CONSTRUÇÃO DO QUEIMADOR | 34 |
| 3.1.1. Câmara de combustão e queimador | 35 |
| 3.1.2. Sistema de excitação sonora e de enriquecimento do oxidante | 37 |
| 3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL..... | 40 |
| 3.3 CARACTERIZAÇÃO DO QUEIMADOR PROJETADO..... | 44 |
| 3.3.1. Cálculo das variáveis estequiométricas do experimento | 46 |
| 3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS..... | 47 |
| 3.5 VALIDAÇÃO DO QUEIMADOR EXPERIMENTAL..... | 49 |
| 3.6 ANÁLISE DE CUSTOS DA IMPLANTAÇÃO DO DISPOSITIVO EXPERIMENTAL | 49 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 50 |
| 4.1 VALIDAÇÃO DO QUEIMADOR EXPERIMENTAL..... | 60 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 4.2 | ANÁLISE DE CUSTOS DA IMPLANTAÇÃO DO DISPOSITIVO EXPERIMENTAL | 61 |
| 5. | CONCLUSÕES..... | 64 |
| 5.1 | DIVULGAÇÃO DA PESQUISA | 65 |
| 5.2 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 66 |
| | REFERÊNCIAS..... | 67 |
| | ANEXO 1 – PROJETO EM CAD DO QUEIMADOR..... | 71 |
| | ANEXO 2 – CÁLCULOS DOS PARAMETROS DO EXPERIMENTO | 77 |

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional nas últimas décadas conduziu ao uso extensivo da combustão de combustíveis fósseis, que por sua vez causa danos ao ambiente global. A principal fonte de poluição do ar são as emissões de todos os tipos de sistemas de combustão. O monóxido de carbono (CO) e os óxidos de nitrogênio (NOx) são produzidos através da queima de combustíveis fósseis e provam-se ser as causas do aquecimento global e das mudanças climáticas. Para reduzir esses danos ao meio ambiente, a maioria dos países desenvolvidos restringiram os regulamentos sobre emissões, o que também reforça os estudos sobre o uso limpo de combustíveis e técnicas para aumentar a eficiência dos processos (Carvalho e Lacava, 2003).

A eficiência energética é um dos pontos fundamentais para a redução de gases que contribuem para o efeito estufa, 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 60 surgiu, em escala industrial na metalurgia de materiais ferrosos e não-ferrosos, 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) (Baukal, 1998).

Segundo Baukal (1998), a aplicação da OEC em sistemas de combustão traz benefícios consideráveis, tais como o aumento de produtividade e da eficiência dos processos de transferência de calor, além de proporcionar um menor volume de gases de exaustão e redução do consumo de combustível. Esta é uma técnica já difundida em processos que trabalham com altas temperaturas como siderurgias, processos de produção de peças cerâmicas, processos de aquecimento e secagem

de materiais e em incineradores de resíduos, porém ainda pouco utilizada em usinas de geração de energia e na indústria de petróleo e gás.

O uso desta técnica de OEC associada à queimadores pode trazer uma maior formação de fuligem em certas regiões da chama (Santos, Goldstein e Ferrari, 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.

Combustão pulsante pode ser definida como o processo de queima onde alguma variável de estado varie com o tempo, como a temperatura, pressão ou outras variáveis (Zinn,1986).

Segundo Carvalho *et al.* (1987), a combustão pulsante tem se mostrado uma técnica interessante em sistemas de combustão de combustíveis fósseis, principalmente na geração de energia, pois proporciona 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 na câmara de combustão, além de haver uma necessidade menor de investimento de capital para esse processo, se comparado aos processos convencionais.

Na base de dados pesquisada (*Science Direct*), não há registros de trabalhos que acoplem a combustão pulsante e sua influência associada à combustão de gases acoplada 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 combustíveis gasosos.

Foi projetado e fabricado um queimador com dispositivo de excitação acústica e enriquecimento de oxigênio para realização da análise experimental, que foi realizada utilizando a metodologia de DOE - *Design of Experiments*, para determinar

a relação entre os fatores que afetam o processo de combustão do gás natural. Para auxiliar na análise experimental foi utilizado o software MINITAB®.

1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.1.1. Objetivo Geral

Avaliar o impacto do uso da OEC combinada com excitação acústica na emissão de poluentes como NO_x e CO, bem como na temperatura dos gases de exaustão.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Projetar e construir um queimador com sistema de atuação acústica e enriquecimento do oxidante;
- Caracterizar as faixas de frequência onde se obtém a máxima amplitude de pressão sonora mantendo a chama ancorada;
- Identificar os parâmetros de operação que otimize a eficiência térmica, bem como as emissões de poluentes do queimador, utilizando planejamento experimental fatorial;
- Analisar os custos de implantação do queimador que utiliza as técnicas de OEC em conjunto com a excitação sonora da chama.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Além desse capítulo de introdução, o presente trabalho ainda apresenta cinco capítulos. O segundo capítulo apresenta os conceitos fundamentais sobre combustão, tipos de chamas, as técnicas de OEC e combustão pulsante e a formação de poluentes. No terceiro capítulo é demonstrado o desenvolvimento do dispositivo experimental e apresentado os equipamentos e instrumentos utilizados. No quarto capítulo o planejamento e a metodologia para realização do experimento são abordados. No quinto capítulo são apresentados os resultados e comentários dos experimentos. Finalmente, no sexto capítulo, são explanadas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 COMBUSTÃO DE COMBUSTÍVEIS GASOSOS

A combustão pode ocorrer nos modos com chama ou sem chama, as chamas por sua vez, podem ser classificadas como chamas pré-misturadas ou não pré-misturadas (ou de difusão). As chamas pré-misturadas são aquelas em que, combustível e oxidante são misturados antes do bico de saída do queimador sendo que nas chamas difusivas essa mistura apenas acontece na câmara de combustão (Turns, 1996).

Nas reações de combustão, a rápida oxidação dos elementos combustíveis resulta em uma liberação de energia à medida que os produtos de combustão são formados (Moran e Shapiro, 2002). Materiais ou compostos são considerados combustíveis industriais quando sua oxidação pode ser feita com liberação de energia suficiente para aproveitamento industrial. A massa de cada componente permanece constante nas reações de combustão, logo, fica simples a obtenção de cada constituinte aplicando-se o princípio da conservação de massa para cada um deles. Como exemplo de equação de reação química em uma combustão abaixo está expressa a equação estequiométrica para o metano de acordo com a equação 1.



O oxigênio que proporciona o processo de oxidação, normalmente vem do ar úmido ambiente. Portanto, antes de fazer balanços molares é necessário definir a composição molar (mássica) e volumétrica do ar ambiente normal usado em cálculos de combustão. Moran e Shapiro (2002) consideram para as composições médias do ar ambiente os valores destacados na Tabela 1.

Tabela 1 – Composições médias do ar ambiente.

| | Composição mássica média do ar ambiente | Composição volumétrica do ar ambiente |
|---|---|---------------------------------------|
| Oxigênio (O ₂) | 23,5% | 21% |
| Nitrogênio (N ₂) e outros gases | 76,7% | 79% |

Fonte: Moran e Shapiro (2002).

Na grande parte das aplicações de combustão o oxidante é ar atmosférico, com composição mássica e volumétrica antes definida. Segundo Turns, 1996 para fins de cálculo o ar contém $79/21 = 3,76$ moléculas de nitrogênio (N_2) para cada molécula de oxigênio (O_2).

De acordo com Carvalho e Mcquay (2007), para aplicações em propulsão, os oxidantes em geral contém mais oxigênio que o ar. O tetróxido de nitrogênio (N_2O_4), por exemplo, é usado em propulsão líquida como oxidante de monometil hidrazina ($N_2H_3CH_3$) (um combustível líquido) em propulsão de satélites, ou dimetil hidrazina assimétrica ($N_2H_2(CH_3)_2$), em propulsão de foguetes de maior tamanho.

Geralmente se utilizam três parâmetros para representar a quantidade de ar requerida na combustão de um determinado combustível, são eles: Razão ar/combustível (AC), Razão combustível/ar (CA) e Razão de equivalência (ϕ). Os parâmetros podem ser definidos pelas equações 2, 3 e 4:

$$\overline{AC} = AC \frac{M_c}{M_{ar}} \quad (2)$$

$$\overline{CA} = CA \frac{M_{ar}}{M_c} \quad (3)$$

$$\phi = \frac{(AC)_{esteq}}{(AC)} = \frac{(CA)}{(CA)_{esteq}}; \phi < 1,0 \text{ (combustão pobre)}, \phi > 1,0 \text{ (combustão rica)} \quad (4)$$

Onde: M_c = massa molecular do combustível

M_{ar} = massa molecular do ar

Segundo Turns (1996), em muitas aplicações em combustão, a razão de equivalência é o fator mais importante na determinação do desempenho do sistema.

2.1.1. Combustão com Chama

A chama representa a propagação autossustentada da zona de combustão onde a reação química entre o combustível e o oxidante ocorre (Stambuleanu, 1976). A estrutura e as propriedades de uma chama dependem do tipo de mistura que acontece entre o combustível e o oxidante, essa divisão pode ser feita com base na maneira como os reagentes são introduzidos na zona de combustão. Os tipos de

chamas dividem-se em pré-misturadas e difusas, parcialmente pré-misturadas ou não, de acordo com o modo como é feita a mistura. Nas chamas pré-misturadas, o combustível e o oxidante são misturados em nível molecular antes de reagirem quimicamente. Já nas chamas difusivas, os reagentes estão inicialmente separados e a reação ocorre somente no momento da mistura. Em chamas difusas parcialmente pré-misturadas, uma pequena quantidade de ar é pré-misturada com o combustível antes da sua injeção na zona de combustão.

Para iniciar uma chama difusiva algum tipo de agente ignitor, uma chama piloto ou uma centelha elétrica deve ser aplicada a mistura (Schneider *et al.*, 2003). Uma vez iniciada, a chama difusiva tende a permanecer ancorada ao queimador sob as mais variadas circunstâncias, estabilizando-se na região chamada frente de chama onde a mistura combustível oxidante possui proporções estequiométricas. Já as chamas pré-misturadas têm sua velocidade de propagação de chama característica, e quando se alimentam da mistura fria (gases não queimados) tendem a apagar.

O termo “difusão” é utilizado para denominar a difusão molecular de espécies químicas. Neste caso, entende-se que as moléculas de combustível na chama movem-se em direção às moléculas do oxidante, que estão no sentido contrário. Por definição, a chama difusiva é a chama que não provém de uma pré-mistura, onde o oxidante e o combustível alimentam a chama separadamente, impedindo o perigoso fenômeno de retorno de chama para dentro do queimador ou *flashback* típico de queimadores que operam com chamas pré-misturadas (Glassman e Yetter, 2008).

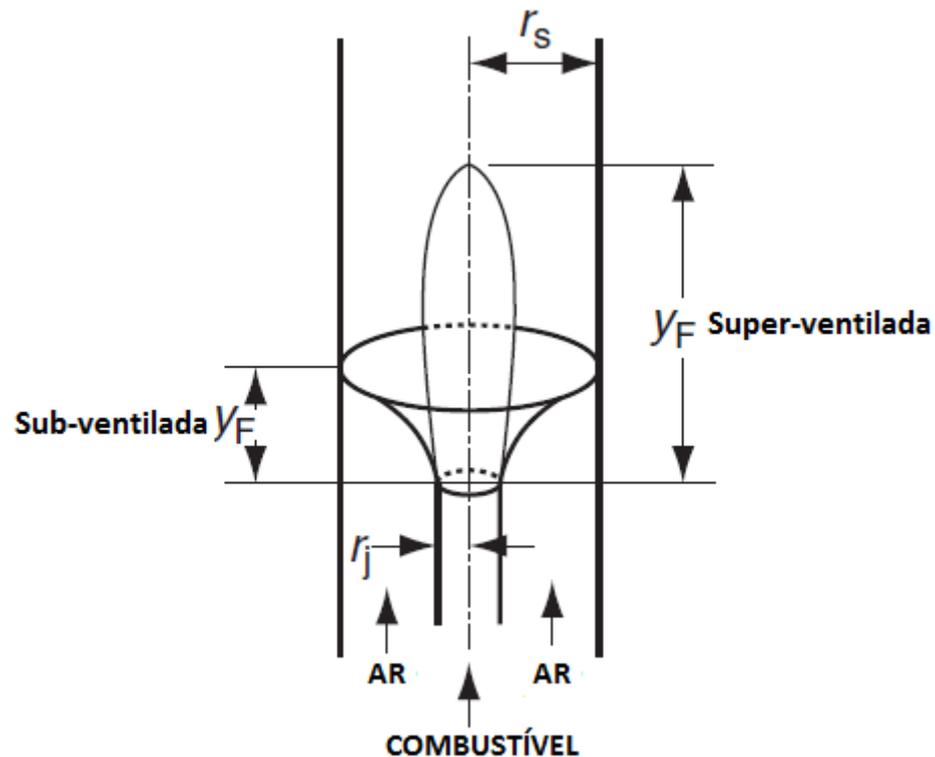
2.1.2. Chamas Difusivas Laminares

Segundo Glassman e Yetter (2008), as chamas de difusão têm maior aplicação práticas que as chamas pré-misturadas. Um exemplo clássico de chama difusiva laminar é constituído por um sistema no qual o fluxo de ar e o fluxo de combustível têm fluxos coaxiais (Figura 1), e o combustível flui lentamente em fluxo laminar ao longo do eixo da chama, onde radialmente se difunde no sentido do oxidante, que está na parte externa. A superfície da chama é definida como o espaço onde o combustível e o oxidante se encontram em proporções estequiométricas.

A Figura 1 indica dois tipos de chama: a primeira, super-ventilada com o formato alongado e seus limites convergindo na direção do fluxo através de um eixo

de dois tubos concêntricos, esse tipo de chama ocorre quando a taxa volumétrica do fluxo de ar na parte externa do tubo é superior a quantidade estequiométrica necessária ; a segunda chama, sub-ventilada está representada através de um cone invertido (ou leque), ocorrem quando na configuração concêntrica o suprimento de ar no anel externo é reduzido abaixo da fração estequiométrica da mistura.

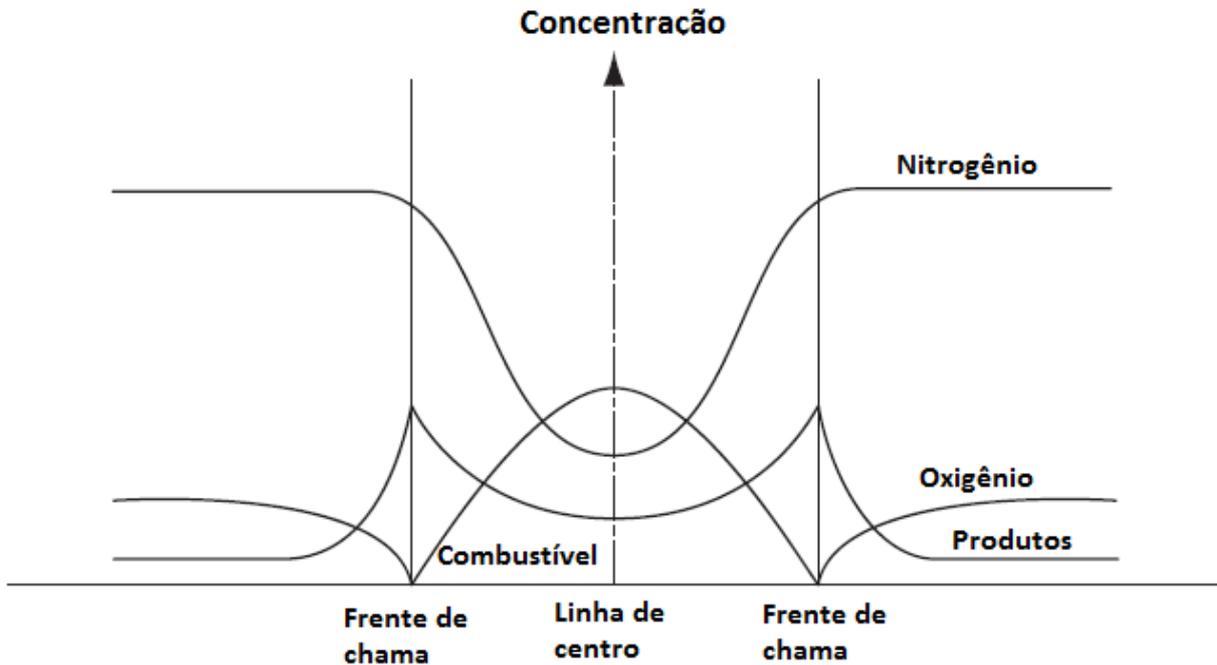
Figura 1 – Chama difusa clássica.



Fonte: Adaptado de Glassman e Yetter (2008).

Observando uma seção reta em corte longitudinal através de uma chama laminar super-ventilada (Figura 2) nota-se que o combustível atinge suas concentrações máximas no eixo central e sofre uma brusca redução em suas fronteiras. A concentração de O_2 diminui quando está próximo a região de frente de chama. Os produtos da combustão têm sua maior concentração na frente de chama onde acontece a maioria das reações.

Figura 2 – Perfil de concentração de uma chama difusiva laminar.



Fonte: Adaptado Glassman e Yetter (2008).

2.1.3. Chamas Difusivas Turbulentas

As chamas difusivas turbulentas são empregadas na maioria dos sistemas práticos de combustão (Turns, 1996). A aceleração do processo de combustão e de troca de calor, além de aumentar em muito a taxa de difusão de um escoamento é uma das implicações da turbulência. Do ponto de vista de aplicações da engenharia, esta é, talvez, a característica mais importante da turbulência. A natureza das chamas depende do modelo do fluxo de combustível, que pode ser caracterizado por um parâmetro adimensional, o número de Reynolds (Re) representado pela equação 5.

$$Re = \frac{\text{Forças Inerciais}}{\text{Forças Viscosas}} = \frac{u \cdot d \cdot \rho}{\mu} \quad (5)$$

Onde: u = velocidade do fluido [m s^{-1}]

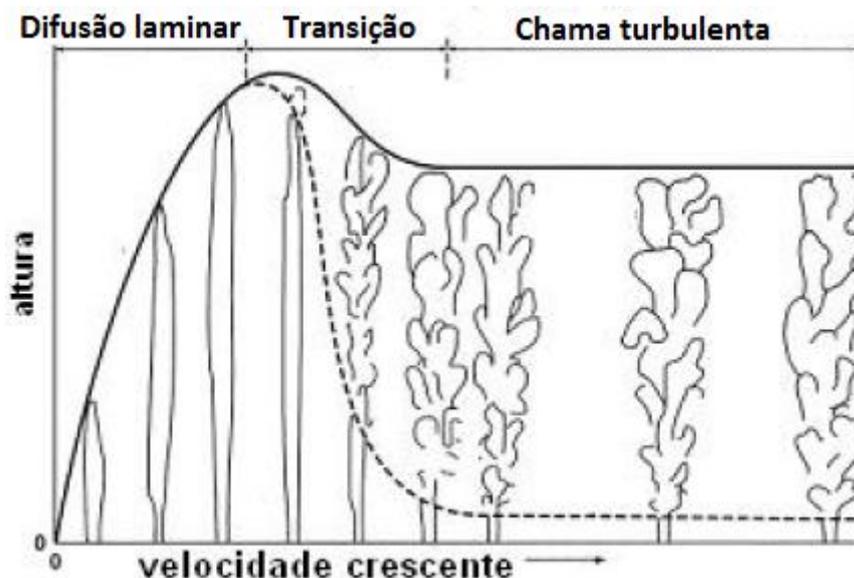
d = diâmetro do tubo [m]

ρ = densidade do combustível [kg m^{-3}]

μ = viscosidade cinemática do gás [$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$]

O número de Reynolds mostra-nos os níveis de turbulência, abaixo de $Re = 2000$ (crítico) o fluxo tende a ser laminar e acima turbulento, sendo que existe uma zona de transição. Considerando um jato emanando em ar parado, diferentes relações entre comprimento da chama e fluxo mássico são propostas por vários autores (Glasman e Yetter, 2008; Kuo, 1986). Na Figura 3 observam-se três regiões, na primeira, escoamento laminar, a altura aumenta linearmente com a velocidade de saída do jato, seguida de uma região de transição e, finalmente, a região de escoamento com turbulência completamente desenvolvida onde a altura da chama passa a ser independente da velocidade.

Figura 3 – Variação do formato da chama difusiva com a velocidade.



Fonte: Adaptado de Kuo (1986).

2.2 EMISSÕES DE POLUENTES

As emissões de diferentes sistemas de combustão são constituídas principalmente de fase gasosa, com pequenas quantidades de material particulado mantido em suspensão. Os efluentes gasosos são constituídos de gases inertes, os quais passam direto pela câmara de combustão sem alteração, como também de produtos formados na combustão, combustíveis não queimados e oxidantes. O material particulado sólido que surge do combustível consiste de compostos metálicos e outros materiais, os quais não podem ser queimados, bem como de hidrocarbonetos, produtos de combustão incompleta. Assim, todos os gases e materiais emitidos por câmaras de combustão que alteram ou geram distúrbios ao

equilíbrio natural do meio ambiente podem ser considerados como poluentes. O maior interesse é evitar danos à vida humana, à fauna e à flora, ou seja, não criar distúrbios artificiais ao ecossistema natural.

Existem normalmente quatro principais classes químicas de espécies de poluentes considerados nos processos de combustão: óxidos de nitrogênio (NO e NO₂ geralmente chamados, de NO_x), monóxido de carbono (CO), compostos orgânicos (hidrocarbonetos não queimados ou parcialmente queimados) e os óxidos de enxofre (SO_x) (Richards *et al.*, 2001). Os poluentes podem surgir como produto de combustão e também como impurezas do combustível, os quais não são queimados durante o processo de combustão. O CO e hidrocarbonetos não queimados surgem da combustão incompleta de combustível, devido à utilização de combustível rico em hidrocarbonetos ou à inadequada mistura de ar e combustível, assim como à formação de carbono durante o processo de combustão. Ambos o CO e hidrocarbonetos (HC), com tempo de residência suficiente e excesso de ar, estes dois poluentes serão oxidados a gás carbônico (CO₂) e água, respectivamente o presente trabalho tem como foco a análise para a otimização dos níveis de emissão dos poluentes: (NO_x) e (CO) na combustão de gás natural.

A formação, o controle e a destruição de poluentes estão intimamente ligados ao processo de combustão. O objetivo geral da maximização da eficiência de combustão e a minimização de poluentes são conflitantes. Assim, a eficiência de combustão é maximizada para condições de mistura estequiométrica quando as maiores temperaturas desejam ser alcançadas. Essas altas temperaturas levam à formação de altos níveis de poluentes. A otimização só pode ser alcançada através de um controle muito cuidadoso da taxa de combustível e dos níveis de temperatura ao longo do sistema (Chigier, 1976).

2.2.1. Emissões de Monóxido de Carbono

O CO é o principal produto da queima incompleta de combustíveis, contribui para a poluição atmosférica, além de representar uma perda de energia. Sua concentração muitas vezes serve de parâmetro verificador da qualidade da combustão, bem como de instrumento de normalização.

É um gás incolor, inodoro e muito tóxico. Certos processos químicos e físicos que ocorrem durante a combustão também propiciam a formação do monóxido de carbono. Esses processos são complexos, pois eles dependem não só do composto que reage com o oxigênio, mas também das condições existentes na câmara de combustão. Dentre os fatores relacionados na sua formação estão: concentrações de oxigênio; temperatura de chama; tempo de permanência do gás em altas temperaturas; turbulência na câmara de combustão. Assim, como forma de redução das emissões de CO é aconselhável operar com um certo excesso de ar e sempre que possível incrementar a taxa de mistura entre combustível e ar.

Segundo Carvalho e Lacava (2003), no mecanismo de formação e destruição do CO em combustão de hidrocarbonetos a cinética envolvendo os hidrocarbonetos deve ser levada em consideração. Os radicais formados a partir do combustível são atacados pelo oxigênio para formar aldeídos, que por sua vez, formam outros radicais que se convertem em CO por decomposição térmica.

A combustão de hidrocarbonetos pode ser caracterizada de uma maneira geral como um processo ocorrendo em duas etapas: na primeira etapa ocorre a quebra do combustível para formar o CO e na segunda etapa, a oxidação final do CO para CO₂. (Carvalho e Lacava, 2003). O processo de oxidação é bastante lento, exceto na presença de compostos que contenham hidrogênio. Pequenas quantidades de H₂O ou H₂ podem ter um forte efeito na taxa de oxidação do CO, pois CO reage mais rapidamente com OH do que com O ou O₂. Esse processo pode ser visto pelo mecanismo a seguir (Glassman, 2008): a primeira reação (6) é lenta e contribui pouco para o total de CO₂ formado, sendo este formado em sua maior parte na terceira reação (8). As reações (9) e (10) correspondem à presença de H₂ em quantidade considerável. Se tivermos alta pressão e na presença do radical HO₂ ocorrerá a reação (12).





2.2.2. Emissões de Óxidos de Nitrogênio

O NO_x, além de contribuir para chuva ácida, através da formação de ácido nítrico, é o precursor principal da formação de “*smog*” fotoquímico. “*Smog*” é uma névoa marrom amarelada que aparece primariamente sobre áreas urbanas em dias ensolarados. Os componentes do “*smog*” incluem O₃, NO_x, compostos orgânicos voláteis (“*Volatile Organic Compounds - VOC*”), SO₂, aerossóis, e material particulado. Esta mistura resulta a partir da reação entre poluentes atmosféricos sob forte luz solar. O “*smog*” ocorre primordialmente em meses de verão, quando há muita luz do sol e as temperaturas são maiores. Em níveis elevados, o “*smog*” ameaça as pessoas, os animais e as plantas. O NO_x é também o principal elemento para formação do ozônio (O₃), ao nível do solo, encontrado em áreas urbanas, que representam um risco para a saúde humana, provocando problemas como tosse e diminuição de capacidade pulmonar (Carvalho e Lacava, 2003).

O NO_x pode ser formado por três mecanismos distintos:

- Mecanismo de Zeldovich (NO_x térmico)

A formação de NO_x térmico é altamente dependente da temperatura. Entre os fatores que favorecem a formação do NO_x térmico estão: a temperatura da fase gasosa, o formato da chama, a taxa de excesso de ar e o tempo de permanência do gás e do material na zona de queima em alta temperatura.

O NO térmico é formado pela reação homogênea do oxigênio e nitrogênio em fase gasosa a altas temperaturas. Zeldovich, pesquisador russo foi quem pela primeira vez propôs um mecanismo para a formação do NO térmico que consiste nas etapas de reação apresentadas.

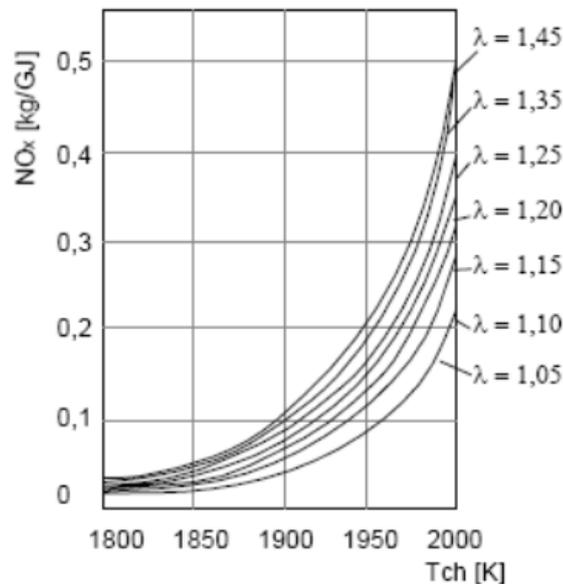




A contribuição da reação (15), em geral, é muito pequena, pelo fato de ambas as espécies serem radicais, estando, portanto, em baixas concentrações. No entanto, para sistemas com combustão em condições ricas em combustíveis, tal reação pode ser importante e deve ser considerada. A taxa de reação da reação (13), que inicia o mecanismo, é muito mais lenta que a taxa das reações de combustão; sendo assim, a maior parte de NO térmico é formada na região de pós - chama. (Glassman, 2008).

Cardu e Baica (2005) mostraram através de estudo experimental que a concentração dos NOx térmicos cresce linearmente com a concentração do oxigênio atômico e exponencialmente com a temperatura, como pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Emissão de NOx térmico em função da temperatura de chama (Tch) e do coeficiente de excesso de ar para combustíveis sólidos.



Fonte: Cardu e Baica (2005).

- Formação do NO_x do combustível.

O NO do combustível é formado durante a combustão, por oxidação do nitrogênio contido no combustível, geralmente através da formação de HCN e ou NH₃ que é oxidado a NO, sendo reduzido em seguida a N₂. (Hill e Smoot, 2000).

O NO do combustível é formado mais rapidamente que o NO térmico devido às ligações N-H e N-C serem mais fracas que as ligações triplas presentes no nitrogênio molecular que devem ser quebradas para a formação do NO térmico (Hill e Smoot, 2000). Entre os fatores que influenciam a formação do NO do combustível estão: a geometria do queimador, técnicas de contato entre o combustível e o ar, altas taxas de misturas, concentração de nitrogênio no combustível, ritmo de volatilização e queima do combustível e temperatura da fase gasosa.

O efeito da mistura ar/combustível tende a diminuir quando a mistura se torna mais rica em combustível. O CO também influencia o processo de redução do NO através dos radicais (OH, H e O) formados pela oxidação do CO (Hill e Smoot, 2000)

- Formação do NO_x imediato (NO_x “*prompt*”).

Estes óxidos de nitrogênio recebem esta denominação devido a sua alta velocidade de formação na zona da frente da chama. O mecanismo de formação de NO rápido foi primeiramente estudado por Fenimore (1971), em que o nitrogênio atmosférico reage com os radicais dos hidrocarbonetos, sendo posteriormente oxidado para formar NO.

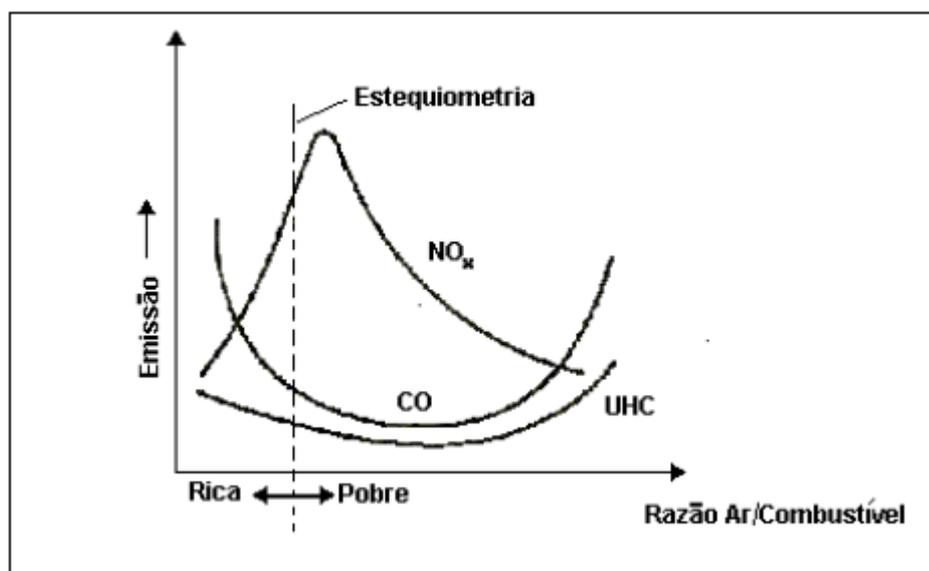
De acordo com Hill e Smoot (2000), o mecanismo de NO rápido é predominante na chama dos combustíveis ricos em hidrocarbonetos que nas chamas de combustíveis deficientes em hidrocarbonetos. Outras características da oxidação rápida são: duração breve do processo, fraca dependência entre a emissão de NO e a temperatura, forte dependência da emissão de NO com a relação ar/combustível.

Na modelagem do NO costuma-se ignorar a reação do NO rápido devido à alta complexidade da química do nitrogênio e também porque estas reações interagem com as etapas de oxidação do combustível (Hill e Smoot, 2000).

Segundo Lacava (2000). O NO térmico representa mais de 70% de todo o NO formado, exceto quando se tem combustão rica (excesso de combustível), quando se tem maior formação de NO “prompt”.

Conforme pode ser observado pela Figura 5, com a variação da razão de equivalência, tendo-se como objetivo a diminuição das emissões de CO, pode-se obter um aumento nas emissões de NO_x, isso porque o NO térmico depende da relação entre a temperatura e a razão de equivalência. Assim se torna necessário combater essas emissões juntamente.

Figura 5 – Emissão de poluentes em função da razão de ar/combustível.



Fonte: Cohen (1996).

2.3 COMBUSTÃO ENRIQUECIDA COM OXIGÊNIO (OEC)

A combustão enriquecida por oxigênio (*OEC – do inglês, Oxygen Enhanced Combustion*) 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). Em princípio, a técnica pode ser aplicada a qualquer processo térmico baseado na queima de combustíveis (Baukal,1998).

A técnica de OEC é classificada em função do regime de operação ou do método de aplicação. Por esta razão, faz-se necessário definir a razão do nível de enriquecimento de oxigênio (Ω), da seguinte forma:

$$\Omega = \frac{V_{O_2,oxidante}}{V_{total,oxidante}} \quad (16)$$

Como já abordado anteriormente para o ar atmosférico (Ω) tem valor de 0,21. Com base no valor do nível de enriquecimento de oxigênio, Baukal (1998), classifica os regimes de operação do processo OEC em três tipos:

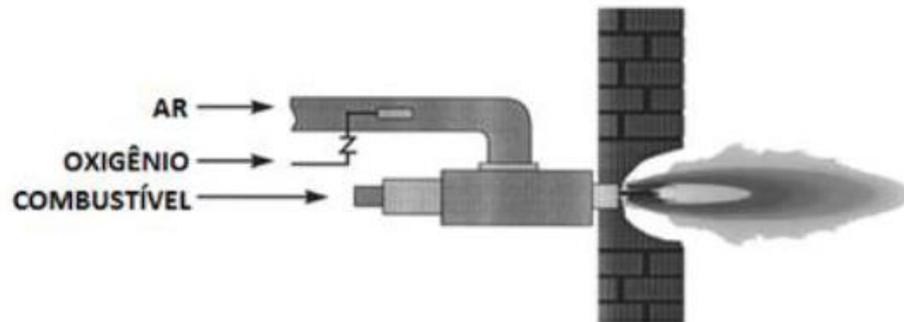
- Baixo nível de enriquecimento ($\Omega < 0,30$).
- Médio nível de enriquecimento ($0,30 < \Omega < 0,90$).
- Alto nível de enriquecimento ($\Omega > 0,90$).

A escolha do grau de enriquecimento depende de vários fatores. Altos e médios 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. Segundo Santos (2010), na maioria dos casos, queimadores podem operar com sucesso utilizando ar de combustão enriquecido com O_2 até 28%, sem modificações no equipamento.

Conforme Baukal (1998), os métodos de uso da combustão enriquecida podem ser divididos em quatro tipos básicos:

- Enriquecimento do ar (*air enrichment*): método de aumento da concentração de O_2 no oxidante através da injeção de oxigênio puro na corrente de ar atmosférico (Figura 6). Esta técnica fornece baixos níveis de enriquecimento sendo que muitos queimadores podem ser adaptados para esta tecnologia. Entretanto, pode haver a necessidade de modificação na tubulação de ar e no queimador por razões de segurança.

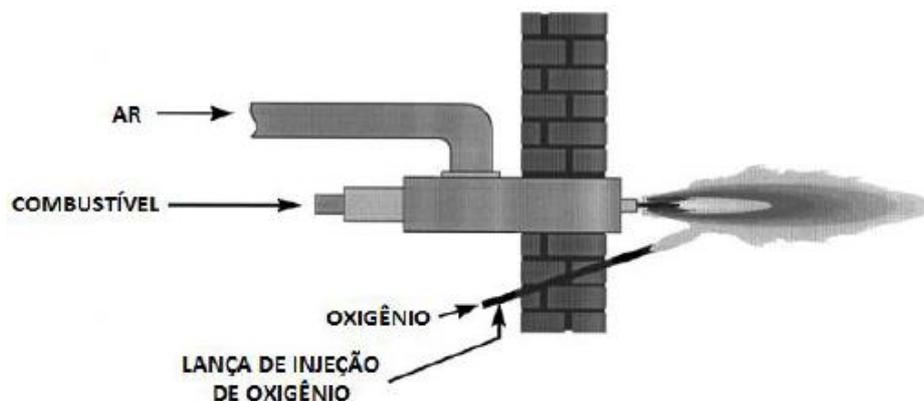
Figura 6 – Método de “air enrichment”.



Fonte: Adaptado de Baukal (1998).

- Lançamento de O_2 (O_2 Lancing): Neste método oxigênio puro é injetado dentro da câmara de combustão através de uma lança (Figura 7). O lançamento de O_2 possui várias vantagens comparadas aos outros métodos, como: nenhuma necessidade de modificação dos queimadores, baixo custo de adaptação, aumento na eficiência da transferência de calor e redução na emissão de NO_x . Assim como na técnica de enriquecimento do ar, este também é geralmente aplicado para baixos níveis de enriquecimento de O_2 .

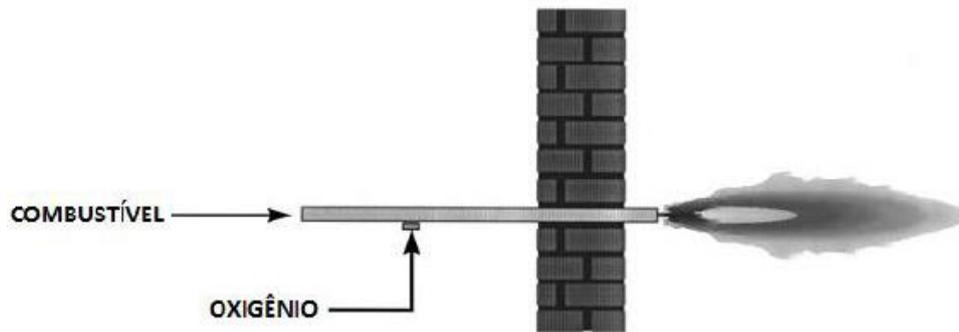
Figura 7 – Método de “ O_2 Lancing”.



Fonte: Adaptado de Baukal (1998).

- Oxicomustão (*Oxy/Fuel*): O terceiro método de uso do OEC, é caracterizado por um $\Omega > 0,90$ (Figura 8). Diferente dos processos convencionais de combustão, onde os reagentes permanecem em correntes separadas, oxigênio puro e combustível são pré-misturados antes de serem injetados no interior do combustor. A vantagem desta técnica é a baixa emissão de NO_x e a elevada eficiência de combustão obtida. Entretanto, são necessários cuidados especiais por conta da alta reatividade do oxigênio puro.

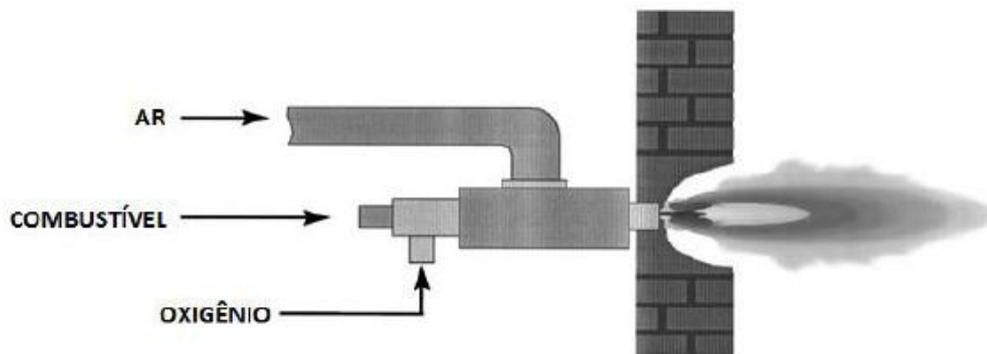
Figura 8 – Método de “Oxy/Fuel”.



Fonte: Adaptado de Baukal (1998).

- Ar-oxicombustão (*Air-Oxy/Fuel*): O quarto método de uso do OEC (Figura 9), é similar à técnica anterior, entretanto, não existe a eliminação da corrente de ar. Esta técnica apresenta uma série de vantagens, sendo as principais: um baixo custo de adaptação (principalmente em queimadores projetados para dois tipos de combustível), fácil controle do padrão da chama, pode ser utilizado para obter altos níveis de oxigênio.

Figura 9 – Método de “Air-Oxy/Fuel”.



Fonte: Adaptado de Baukal (1998).

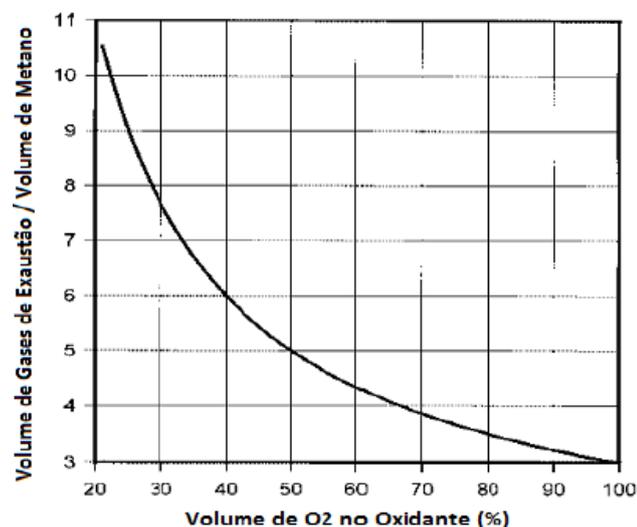
De uma perspectiva histórica, o potencial de oxigênio para melhorar o processo de combustão na produção de aço foi reconhecido por Bessemer em 1855. No entanto, o registro mais antigo do uso de oxigênio neste processo foi em 1931. Nas décadas de 1960 e 70, o uso da OEC em ambas as indústrias metalúrgicas de ferrosos e não-ferrosos foram feitas simultaneamente, enquanto quase todos os seguimentos da indústria de vidro haviam implementado uma forma de OEC na década de 1990 (Baukal, 1998). No final de 1980 OEC se mostrou benéfica na incineração de resíduos, e em relatórios emitidos pelo *Department of Energy (DOE)*

em 1987 (Kobayashi, 1987) e pelo *Gas Research Institute* em 1989 (Williams, Cuervo e Chapman, 1989) indicaram que a utilização de OEC seria cada vez mais importante no futuro.

Nos processos acima mencionados, segundo Baukal (1998), os benefícios potenciais da OEC em relação à combustão convencional com ar atmosférico incluem:

- Aumento da eficiência térmica, das taxas de processamento e da produtividade: as temperaturas de chamas elevadas promovem um aumento nas taxas de transferência de calor por radiação na câmara de combustão. Por conta disto, maiores taxas de produção podem ser alcançadas. Como também a energia química liberada a partir do combustível é transferida a uma taxa mais elevada para as matérias-primas, uma redução no consumo de combustível pode ser atingida. Em alguns casos, o custo associado ao consumo de oxigênio pode ser compensado devido à economia obtida com combustível, sendo necessária uma análise de viabilidade econômica para cada caso.
- Redução no volume de gases de exaustão: Devido a redução de parte do N_2 na participação do oxidante. A Figura 10 apresenta o volume esperado para os gases de exaustão em uma combustão estequiométrica do metano.

Figura 10 – Volume de gases de exaustão X Volume de O_2 no oxidante para uma combustão estequiométrica de metano.



Fonte: Adaptado de Baukal (1998).

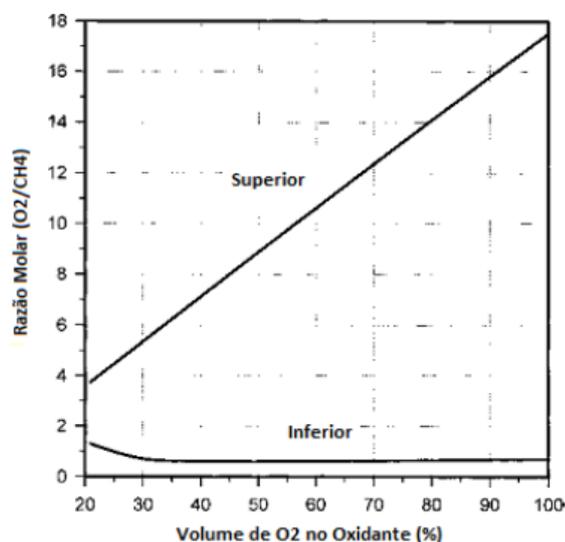
- Redução na emissão de poluentes: como existe uma redução no volume de gases de exaustão e uma maior eficiência de combustão no processo OEC, existe uma redução importante na formação e concentração de poluentes como: particulados e CO. Dessa forma, é atingido um menor custo associado ao tratamento dos gases de exaustão.
- Melhora da estabilidade da chama e das características de ignição: Este importante benefício é medido através do aumento dos limites de inflamabilidade da mistura combustível/oxidante (Tabela 2 e Figura 11), da estabilidade da chama e das características de ignição (Figuras 12 e 13).

Tabela 2 - Limites de inflamabilidade inferior e superior de alguns combustíveis em ar e em oxigênio puro.

| Combustível | Limites em Ar | | Limites em O ₂ | |
|-------------------------------|---------------|----------|---------------------------|----------|
| | Inferior | Superior | Inferior | Superior |
| H ₂ | 4,1 | 74,0 | 4,0 | 94,0 |
| CH ₄ | 5,3 | 14,0 | 5,4 | 59,0 |
| C ₂ H ₆ | 3,2 | 12,5 | 4,1 | 50,0 |
| C ₃ H ₆ | 2,0 | 11,0 | 2,1 | 53,0 |
| C ₂ H ₄ | 3,0 | 29,0 | 3,1 | 80,0 |
| C ₃ H ₈ | 2,4 | 9,5 | 4,1 | 50,0 |

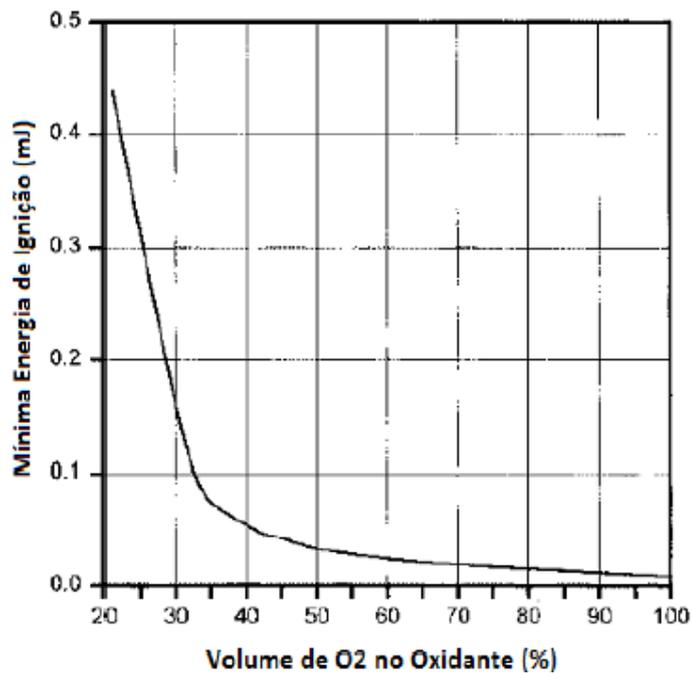
Fonte: Adaptado de Baukal (1998).

Figura 11 – Variação dos limites de inflamabilidade com o aumento da concentração de O₂ no oxidante para o gás metano.



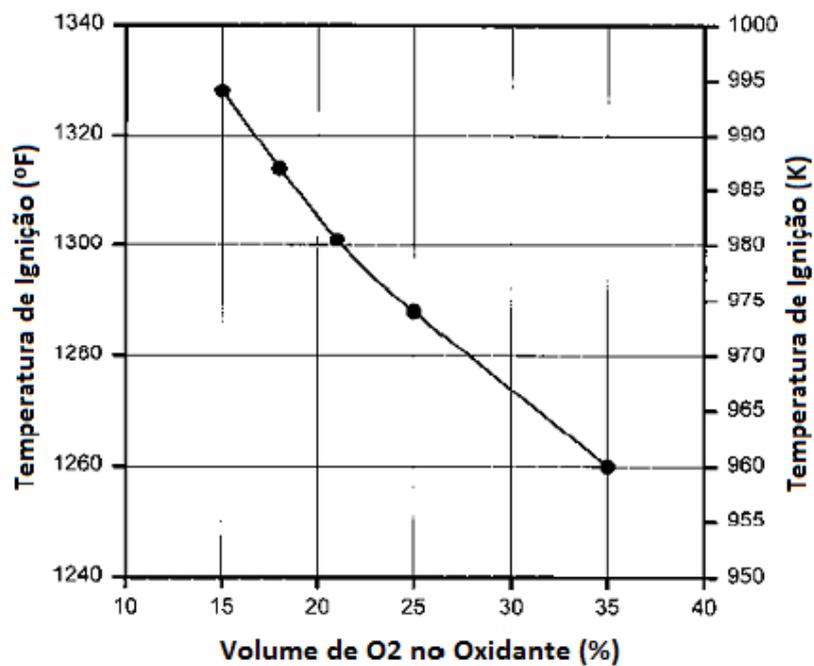
Fonte: adaptado de Baukal (1998).

Figura 12 – Mínima energia de ignição em função da composição do oxidante para combustão estequiométrica de CH_4 a pressão atmosfera.



Fonte: adaptado de Baukal (1998).

Figura 13 – Temperatura de ignição para uma composição estequiométrica do metano como função da composição do oxidante.



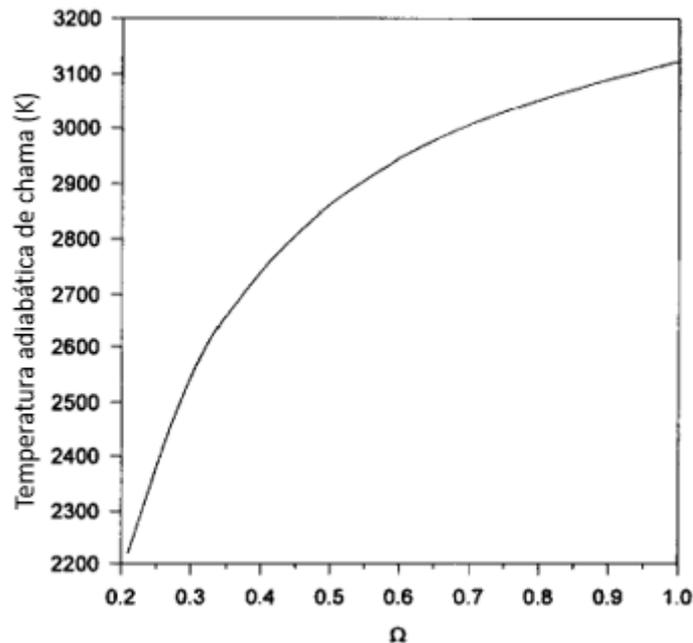
Fonte: adaptado de Baukal (1998).

- Redução nos custos de equipamento e aumento de flexibilidade de produção: Como a OEC reduz o volume dos gases exaustos e aumenta a eficiência da combustão, câmaras de combustão e dutos de exaustão mais compactos podem ser projetados, além de um processo de combustão com OEC poder atender de forma mais rápida as mudanças de produção por causa da maior potência térmica disponível.

Em contrapartida aos possíveis benefícios, existem problemas potenciais associados com o uso de OEC se o sistema não é adequadamente projetado e operado. Baukal (1998) apresenta os mais importantes:

- Aumento do risco de retorno de chama: Devido à intensificação das taxas de reações de combustão, provocada com o uso da técnica OEC, a velocidade de propagação da chama também é aumentada. Uma consequência deste fato é o aumento do risco de acontecimento do fenômeno de retorno de chama (*flashback*) para chamas pré-misturadas. Este fenômeno ocorre quando a velocidade do combustível na saída do queimador é menor que a velocidade de chama da mistura, fazendo com que a frente de chama avance para dentro do queimador.
- Possibilidade de danos ao equipamento: Chamas enriquecidas com O_2 possuem temperaturas maiores que as encontradas na combustão de mistura ar/combustível. A Figura 14 apresenta uma variação típica da temperatura adiabática de chama para combustão de gás natural em função da razão do nível de enriquecimento de oxigênio (Ω). Se a energia liberada na combustão não for apropriadamente distribuída, a radiação térmica emitida pela chama pode concentrar-se em pontos da câmara de combustão e vir a danificar o seu isolamento refratário.

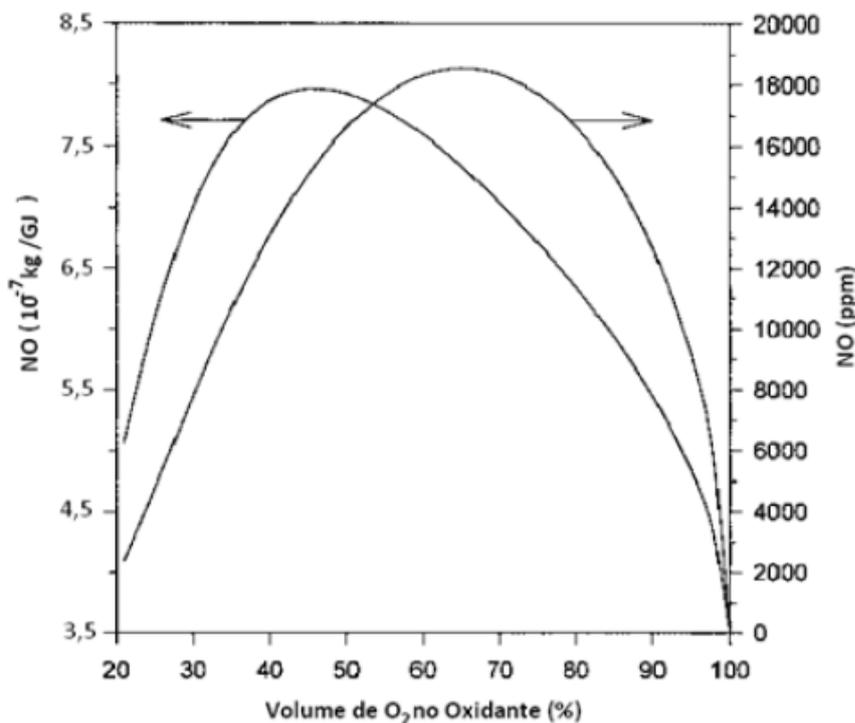
Figura 14 – Variação típica da temperatura adiabática de chama para combustão de gás natural em função da razão do nível de enriquecimento de oxigênio (Ω).



Fonte: adaptado de Baukal e Gebhart (1997).

- Aumento na emissão de NO_x : Pode ocorrer um incremento na emissão de NO_x em sistemas enriquecidos com oxigênio, devido ao aumento da temperatura adiabática de chama. Entretanto existem dois fatores concorrentes: o aumento da concentração de NO_x com a elevação da temperatura e a diminuição da formação do NO_x em função da menor quantidade de nitrogênio disponível no oxidante com o maior nível de enriquecimento. Isso pode ser identificado na Figura 15, que apresenta uma combustão estequiométrica de metano, pode-se observar que para baixos níveis de enriquecimento a emissão de NO_x é crescente com o aumento do volume de O_2 no oxidante passa a decair a partir de 70% de volume de O_2 .

Figura 15 – Concentração de NO em função do volume de O₂ no oxidante para combustão estequiométrica de CH₄.



Fonte: adaptado de Baukal (1998).

O potencial de aumento da utilização da OEC levou a numerosos estudos acadêmicos que investigaram os efeitos da OEC, a seguir são apresentados alguns desses estudos.

Baukal e Gebhart (1997), analisaram a radiação total de chamas de difusão de gás natural enriquecidas com oxigênio, os principais parâmetros que foram estudados incluem a composição de oxidante ($\Omega = 0,25$ a $1,00$), a razão de equivalência ($\phi = 0,55$ a $1,45$) e potência de operação do queimador ($q_f = 3$ a 28 kW). Os resultados mostraram que as maiores radiações térmicas foram atingidas com maiores volumes de O₂ no oxidante e para razões de equivalência próximas das estequiométricas. O autor relata que esse trabalho foi o primeiro a estudar a radiação da chama não luminosa como função da composição do oxidante.

No trabalho de Hu *et al.* (2000), as emissões de CO₂, NO_x e SO₂ resultantes da queima de um carvão pulverizado, com N₂ + O₂ e CO₂ + O₂, com altas concentrações de O₂ (20, 50, 80, 100%) dos gases de entrada, foram investigadas em uma fornalha experimental. A razão de equivalência, ϕ , foi variada no intervalo

de 0,4 a 1,6. Os resultados mostraram que as concentrações de CO_2 dos gases de combustão foram maiores do que 95% para os processos com oxidante a base de CO_2 . As emissões de NO_x aumentaram com ϕ sob condições de combustão pobre, em seguida, diminuíram drasticamente após $\phi = 0,8$. As emissões de SO_2 aumentaram com ϕ em condições de combustão pobre, em seguida, diminuíram ligeiramente após $\phi > 1,2$. O autor observou que a temperatura tem um grande efeito sobre as emissões de NO_x e um pequeno efeito sobre a emissão de SO_2 .

Tan *et al.* (2002), descreveram uma série de experimentos realizados em combustão de gás natural com ar atmosférico e em misturas de oxigênio e gases de combustão recirculados. O objetivo foi enriquecer o gás de combustão com o CO_2 para facilitar a sua captura e sequestro. Os resultados indicam que as técnicas de combustão oxi-combustível com base O_2/CO_2 com gases de exaustão recirculados têm um excelente potencial para reprojeto de máquinas térmicas convencionais para redução nas emissões de CO_2 . Outros benefícios da tecnologia incluem redução considerável e até mesmo a eliminação das emissões de NO_x , a melhoria da eficiência da planta em função do menor volume de gases e melhor flexibilidade operacional.

Horbaniuc *et al.* (2004), investigaram os efeitos da concentração de oxigênio (21% a 100%) na combustão de gás natural em um gerador de vapor supercrítico. O modelo proposto consiste no cálculo de combustão para uma caldeira existente, a análise das consequências do enriquecimento com oxigênio, e a avaliação das áreas da superfície de transferência de calor necessárias para uma nova caldeira que utiliza a combustão enriquecida com oxigênio. Os resultados mostraram um grande aumento na temperatura dos gases de combustão com a mudança do oxidante, bem como uma redução da transferência de calor para o meio para altas concentrações de O_2 , isso ocorre principalmente pela redução da transferência de calor por convecção, devido à redução no volume dos gases de combustão com o processo OEC.

Murphy e Shaddix (2005), mediram a taxa de combustão para dois tipos de carvão pulverizado em ambos ambientes, convencional e atmosferas enriquecidas com oxigênio na faixa de concentração molar de O_2 de 6 a 36%. Os resultados

monstraram aumento nas taxas de queima para ambientes com elevadas concentrações de oxigênio. Foram apresentadas correlações empíricas para os dados encontrados em todo o intervalo de concentrações de oxigênio.

Andersson *et al.* (2008). Analisaram as mudanças na intensidade de radiação relacionadas com a fuligem entre uma chama enriquecida com oxigênio e uma chama com ar atmosférico de combustão de propano. O O₂ foi pré-misturado no ar de combustão junto com gases de recirculação. Os resultados mostram que o uso da OEC associada a recirculação de CO₂ aumentaram a formação de fuligem além de implementar a radiação térmica.

Luo *et al.* (2009), analisaram os efeitos da concentração de oxigênio sobre a combustão de um micro combustível de biomassa, em um analisador termogravimétrico. Os resultados experimentais mostraram que com o aumento das concentrações de oxigênio, a temperatura de ignição e o tempo de queima do combustível diminuem e a temperatura dos gases de combustão aumenta.

Wu *et al.* (2010), estudaram a influência da concentração de oxigênio (21-30%) sobre a taxa de aquecimento, as emissões de poluentes, as distribuições de temperatura e de combustível (gás natural) em um queimador sem pré-mistura. Os resultados mostraram que quando a concentração de oxigênio foi aumentada de 21% para 30%, a taxa de aquecimento aumentou em 53,6% e o consumo de combustível reduziu em 26,1%. Maiores concentrações de oxigênio produziram maior temperatura da chama; por isso, as emissões de NO_x aumentaram com o aumento da concentração de oxigênio. A concentração de CO₂ nos gases de combustão aumentou linearmente com a concentração de oxigênio, além disso, as distribuições de temperatura tornaram-se progressivamente não uniformes com o aumento da concentração de oxigênio, devido ao coeficiente de transferência de calor por convecção ter sido alterado.

Bělohradský *et al.* (2014). Investigaram e compararam as características de dois métodos de OEC, nomeados de “*premix enrichment*” e “*air-oxy/fuel combustion*”, onde a concentração total de oxigênio foi variada de 21% para 46%. Os autores observaram que as emissões de NO_x foram significativamente mais baixas para o método “*air-oxy/fuel*”. O aumento da concentração de oxigênio resultou em maior

intensidade de aquecimento devido a altas concentrações de CO_2 e H_2O . O calor disponível na combustão com volume de 46% de O_2 foi superior em 20%, em comparação com a combustão convencional com concentrações de O_2 a 21%.

Jeongseog *et al.* (2015) avaliaram numericamente e experimentalmente o desempenho de um forno para pré-aquecimento de sucata, utilizando gás natural como combustível e oxidante enriquecido com oxigênio em volumes de 21% a 100%. Os resultados mostraram que a temperatura no forno aumentou abruptamente com o aumento da fração de mols de oxigênio no oxidante, além disso, o tempo característico de aquecimento da fornalha diminuiu exponencialmente com o incremento de potência térmica.

Baskar e Senthilkumar (2016), realizaram um ensaio experimental com um único cilindro de motor diesel de injeção direta para estudar o impacto do enriquecimento de oxigênio em parâmetros de poluição e de desempenho através do aumento da concentração de oxigênio do ar de admissão (21 a 27%) em volume. Os resultados mostraram que o processo de combustão foi melhorado, com um aumento de eficiência térmica de 4 a 8% e diminuição do consumo de combustível específico de 5 a 12%, além disso, houve uma diminuição na emissão de hidrocarbonetos não queimados, CO e densidade da fumaça. No entanto, houve um aumento considerável nas emissões de NO_x , devido ao aumento da temperatura de combustão.

2.4 COMBUSTÃO PULSANTE

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. Depois, Rijke em 1859 descobriu que um forte som foi produzido por uma tela de metal quente localizada na metade inferior de um tubo vertical, aberto. De acordo com a observação de Rijke, em 1878, Lord Rayleigh foi o primeiro a fazer uma descrição qualitativa da oscilação acústica impulsionada pelo calor, conforme

Equação 13. Ele descreveu o equilíbrio entre a dissipação acústica e a excitação acústica.

O queimador tipo tubo de Rijke é um sistema simples e útil para investigar os fenômenos de oscilação de combustão. A oscilação no tubo cilíndrico de Rijke ocorre quando o calor é adicionado a uma grade metálica localizado no quartil inferior de um tubo vertical aberto nas duas extremidades. As transferências da grade quente aquecem o ar circundante no tubo. Em seguida, o ar expande-se, torna-se menos denso e começa a elevar-se dentro do tubo. Finalmente, fixa-se um significativo fluxo ascendente de ar no tubo. Quando o ar sobe para a parte superior do tubo, torna-se mais denso por causa do contato com a parede mais fria. Durante cada ciclo, os elementos de fluido na metade inferior do tubo constantemente experimentam expansão, enquanto que os elementos de fluido na parte superior continuamente são submetidos a compressão. De acordo com o critério do Rayleigh, Equação (13), a pressão e a velocidade estão em fase, fazendo com que o índice de Rayleigh seja positivo, e as oscilações cresçam (Raun *et al.* 1993). No entanto, se a parte superior do tubo é aquecida, a pressão e a velocidade estão fora de fase. Isto resulta num índice de Rayleigh negativo e a oscilação acústica é amortecida pela fonte de calor. O esquema simples do modo fundamental do tubo de Rijke é mostrado na Figura 16.

$$\oint Q.P' dt > 0 \quad (13)$$

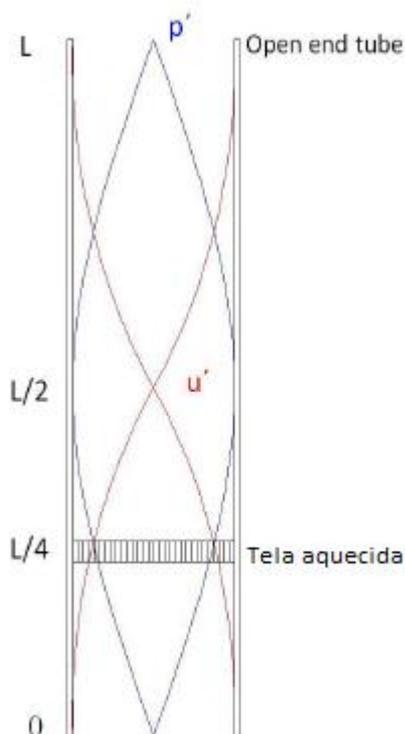
Onde:

Q = Taxa de energia instantânea adicionada;

P' = Pressão acústica média;

t = Tempo.

Figura 16 – Esquema do modo fundamental do tubo de Rijke.



Fonte: adaptado de Raun *et al.* (1998).

Carvalho (1983) e 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. Os autores concluíram com o estudo 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. Eles ainda verificaram uma baixa emissão de particulados.

Torres *et al.* (1992) investigaram de forma experimental a combustão pulsante do combustível alternativo (casca do fruto de óleo de palma). Ele utilizou para o estudo uma câmara de combustão pulsante do tipo tubo de Rijke com um diâmetro interno de 200 mm e dois comprimentos diferentes, 2400 e 3200 mm. O equipamento foi capaz de produzir uma taxa de produção de calor máxima de 1,9 MW, operando com uma eficiência de combustão de 96% e um excesso de ar de 10%. A amplitude máxima da pressão foi de 4 kPa.

Martins (1998) analisou a combustão pulsante e não pulsante usando como combustível o gás liquefeito de petróleo (GLP) em um queimador tipo tubo de Rijke e usando como elemento dopante a injeção de amônia. Como resultado, ele

identificou que a combustão pulsante é mais eficiente que a não pulsante, pois houve menor formação de CO para o caso pulsante. Entretanto, as emissões de NOx com e sem injeção de amônia, usada para simular a emissão de NO proveniente do combustível nitrogenado, foram maiores que na combustão não pulsante. As temperaturas tornaram-se mais elevadas para o caso pulsante que o não pulsante. Comprovou-se ainda que a transferência de calor foi maior na combustão pulsante que na combustão não pulsante.

Como acima mencionado, o tubo de Rijke é freqüentemente usado na análise de fenômenos de excitação acústica. No entanto, a maioria destes estudos é focada principalmente nas oscilações geradas no próprio processo, em vez do uso de excitação externa. Desta forma, os pesquisadores só podem medir os dados de oscilação acústica que é criado pela própria chama.

Papadopoulos *et al.* (2001), Farhat *et al.* (2005) estudaram o efeito de excitação externa sobre uma chama em um tubo cilíndrico e foram observados padrões de chama interessantes. Os resultados indicaram que os padrões e propriedades das chamas são sensíveis às frequências e amplitudes da excitação acústica.

2.4.1. Efeitos da Excitação Acústica em Chamas Difusivas.

As características das chamas de difusão sob excitação acústica têm sido amplamente estudadas na comunidade de combustão. Sabe-se que a gama de frequências acústicas e amplitudes pode afetar a dinâmica da chama. Algumas condições de frequências acústicas forçadas podem induzir o comportamento de chama instável. Numa câmara de combustão fechada, esta instabilidade pode ser aumentada devido ao acoplamento entre a velocidade de liberação de calor e a pressão acústica (Chao *et al.*, 1992).

No entanto, segundo Toong (1965) em algumas frequências de excitação, a excitação acústica forçada pode ser utilizada para controlar a combustão e melhorar a eficiência térmica e emissões de poluentes.

Demare e Baillot (2004) discutiram os efeitos de forçar acusticamente as chamas suspensas de difusão a uma frequência de 200 Hz. Eles descobriram que a

excitação acústica produziu turbulência quase homogênea que proporciona uma mistura eficiente e resultou em um melhor regime de combustão.

Kim *et al.* (2009) examinaram o comportamento de diversas chamas de difusão sob uma frequência de excitação de 514 Hz. O resultado mostra que uma redução de 15% de comprimento de chama e uma redução de 25% de NO_x foram alcançadas em comparação com a chama sem excitação.

Chao *et al.* (1996) examinaram que a elevação da chama e a excitação acústica em frequências superiores à frequência natural são eficazes na redução do índice de emissão de NO_x em chama parcialmente pré-misturada.

Saito *et al.* (1998) observaram a caracterização de chamas de difusão em frequências de excitação de 30 Hz a 150 Hz. Os resultados mostraram que as emissões de fuligem foram reduzidas aumentando a amplitude e diminuindo a frequência de excitação; Em alguns casos, 90% de supressão de fuligem foi alcançada. Além disso, a temperatura da chama no caso com excitação acústica foi maior que a sem excitação.

Lovett e Turn (1993) Estudaram a chama de difusão na faixa de frequência de 2 a 1.340 Hz com amplitudes de pulso variadas. Os resultados indicaram que a chama foi apenas ligeiramente afetada pela alta frequência e baixa amplitude de excitação. Em alta amplitude, a chama é significativamente afetada pela excitação externa devido à melhora da taxa de mistura de combustível.

Jocher *et al.* (2017) Estudaram numérica e experimentalmente o acoplamento transiente da formação de fuligem, química da chama e transporte de fluido em chamas de etileno/ar atmosférico em frequências de forçamento acústico de 20 e 40 Hz. Em ambos, medições e cálculos, a fração de volume de fuligem de pico diminui com o aumento da frequência.

Foo *et al.* (2017) Analisaram a influência da frequência de oscilação acústica sobre a estrutura e a formação de fuligem de uma chama de etileno laminar não pré-misturada. As chamas foram forçadas a 20 e 40 Hz. Medições simultâneas da temperatura do gás e da fração de volume de fuligem forneceram detalhes da diferença entre a estrutura da chama e a distribuição da fuligem nas chamas

forçadas e não forçadas. As características distintas das chamas forçadas são a ocorrência de estreitamento próximo ao tubo de combustível e a formação de uma "concha" de fuligem oca. Apesar da estrutura distinta, a região de fuligem está confinada a uma faixa restrita de temperaturas, aproximadamente 1700-1800 K.

Conforme relatado anteriormente, não foi encontrado na literatura trabalhos que estudassem os efeitos simultâneos das técnicas de OEC e chamas excitadas acusticamente, aplicadas na combustão de combustíveis fósseis. O estudo realizado tem o objetivo de utilizar as técnicas de combustão enriquecida com O₂ simultaneamente com a técnica de combustão pulsante, buscando trazer os efeitos benéficos das metodologias para combustão de combustíveis gasosos, como aumento de eficiência e redução de emissões de poluentes.

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, além da 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 isoladamente.

2.5 ASPECTOS ECONÔMICOS DO USO DO QUEIMADOR COM OEC E COMBUSTÃO PULSANTE

Segundo Baukal (1998), o uso da técnica de OEC em queimadores traz diversas vantagens econômicas: como aumento de produtividade, devido ao aumento das taxas de transferência de calor na câmara de combustão para o processo de combustão, proporcionado por temperaturas de chama elevadas decorrentes do enriquecimento da combustão; redução do consumo de combustível, devido ao aumento da concentração de oxigênio e conseqüentemente redução de gases inertes (principalmente nitrogênio), menos energia de combustão é utilizada

para aquecer esses gases, logo, o processo utiliza uma menor quantidade de energia para uma determinada quantidade de produto, gerando conseqüentemente uma redução no consumo de combustível. Em alguns casos, o custo associado ao consumo de oxigênio pode ser compensado devido as vantagens citadas, principalmente para proposta do trabalho de enriquecimento em níveis baixos (até 30% de O₂ no oxidante).

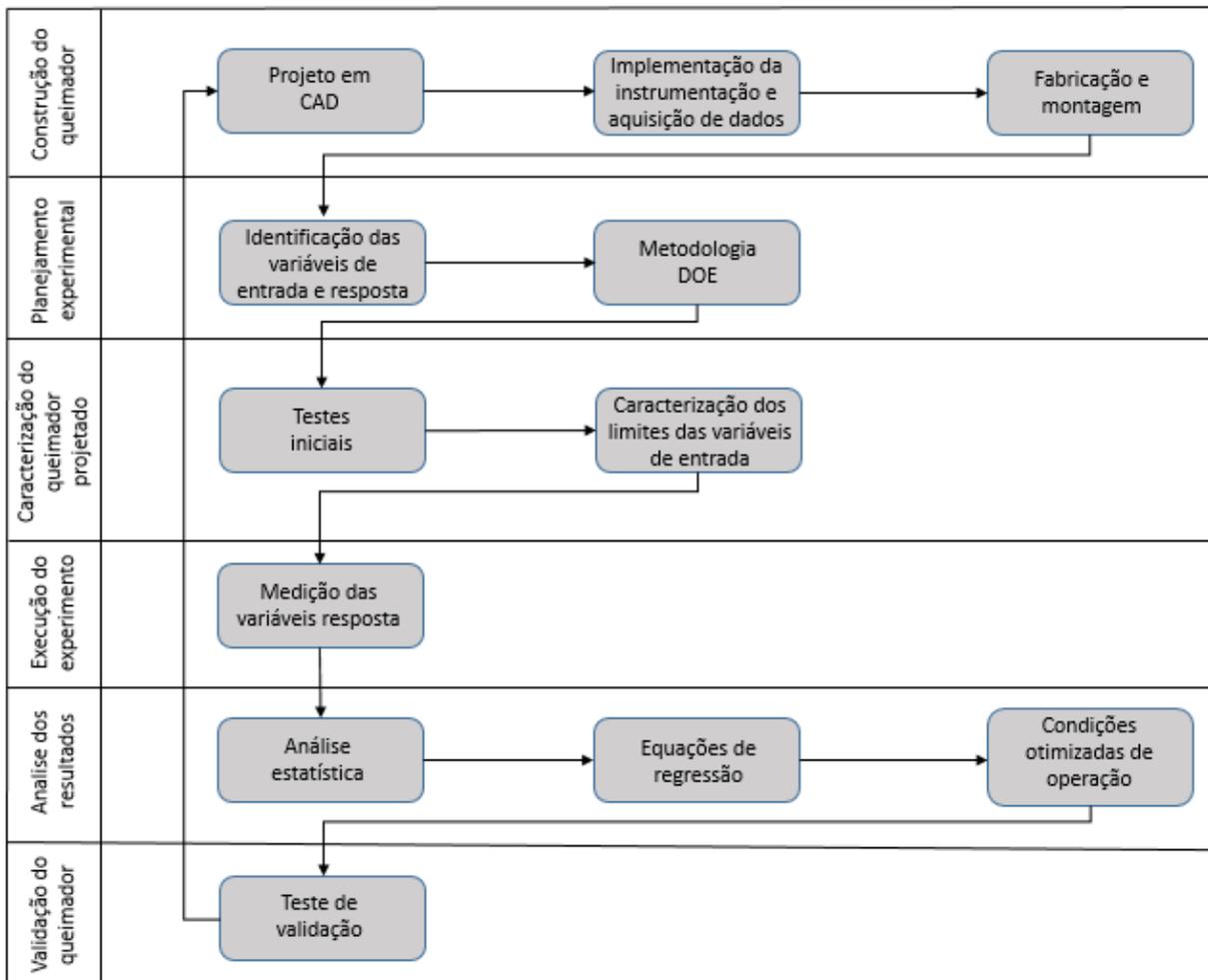
Os custos associados a técnica de combustão pulsante por excitação sonora da chama, em relação a combustão convencional, são os referentes aos investimentos de capital na aquisição e implementação do sistema de atuação acústica, porém, segundo Carvalho et al. (1987), a vantagem de aumento de eficiência na combustão devido ao aumento nas taxas de mistura entre combustível e oxidante alcançada pela excitação sonora, possibilita o projeto de equipamentos menores com potências semelhantes aos equipamentos que trabalham com combustão convencional, gerando em alguns casos menores custos de implantação.

Segundo Carvalho et al. (1987) e Santos (2010), ambas as técnicas, a de combustão pulsante por excitação sonora e a de OEC com baixos níveis de enriquecimento, na maioria dos casos, podem ser implementadas em equipamentos já existentes em processos de retrofit, sem necessidade de grandes mudanças de projeto, resultando em pequenos custos envolvidos para a modificação dos sistemas existentes.

3. METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido de acordo com as etapas metodológicas descritas no fluxograma apresentado na Figura 17 e a seguir serão detalhados todos os passos da metodologia.

Figura 17 – Fluxograma de etapas da metodologia.



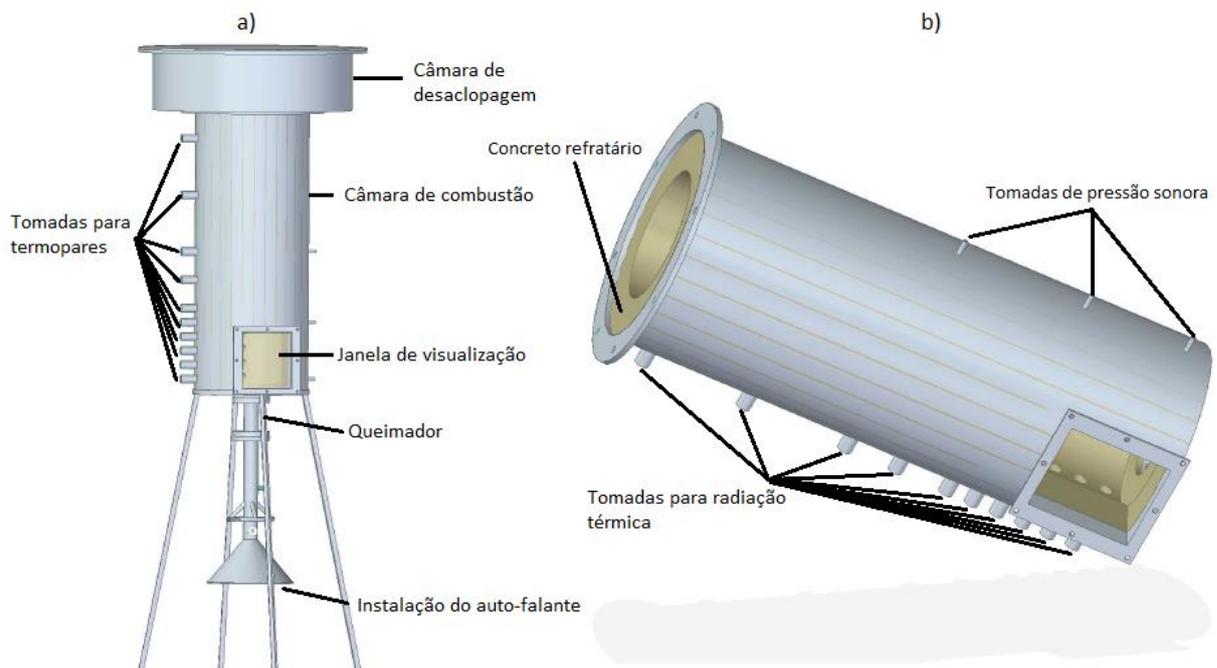
3.1 CONSTRUÇÃO DO QUEIMADOR

A construção do queimador experimental 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.

Inicialmente foi desenvolvido o projeto em CAD do equipamento para construção do dispositivo experimental que foi utilizado na realização dos experimentos, os desenhos 2D podem ser verificados no ANEXO 1.

O equipamento foi concebido de modo a produzir uma chama difusiva confinada de combustível gasoso e com sistemas de enriquecimento com O_2 do oxidante e excitação sonora da chama, além de possuir dispositivos de aquisição e interpretação de dados para análise. Para melhor entendimento, o dispositivo experimental pode ser dividido em três partes: câmara de combustão e queimador, sistema de enriquecimento com oxigênio, e, sistema de excitação sonora. Cada parte será detalhada em seguida. A Figura 18 apresenta o desenho 3D em CAD do queimador e o detalhe da câmara de combustão.

Figura 18 – Projeto CAD do queimador (a); detalhe da câmara de combustão (b).



3.1.1. Câmara de combustão e queimador

A câmara de combustão apresenta uma configuração cilíndrica e foi fabricada em aço inox AISI 304, com o objetivo de aumentar a vida útil do equipamento, e revestida internamente com concreto refratário com elevada resistência à temperatura, com uma janela para visualização da chama além de tomadas para instalação de 10 termopares ao longo do comprimento da câmara, dispostos com um

espaçamento de 50 mm entre eles no início da câmara, região onde há presença de chama, e de 100 mm de espaçamento na parte final, 10 pontos de coleta da intensidade de radiação térmica, com a mesma disposição dos termopares, porém rotacionados em 45° em relação aos mesmos e de três pontos para instalação de transdutores de pressão sonora. No topo da câmara de combustão existe uma câmara de desacoplagem, destinada à coleta dos 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, para simular um tubo aberto para a atmosfera. A Figura 19 apresenta uma imagem do dispositivo experimental concluído

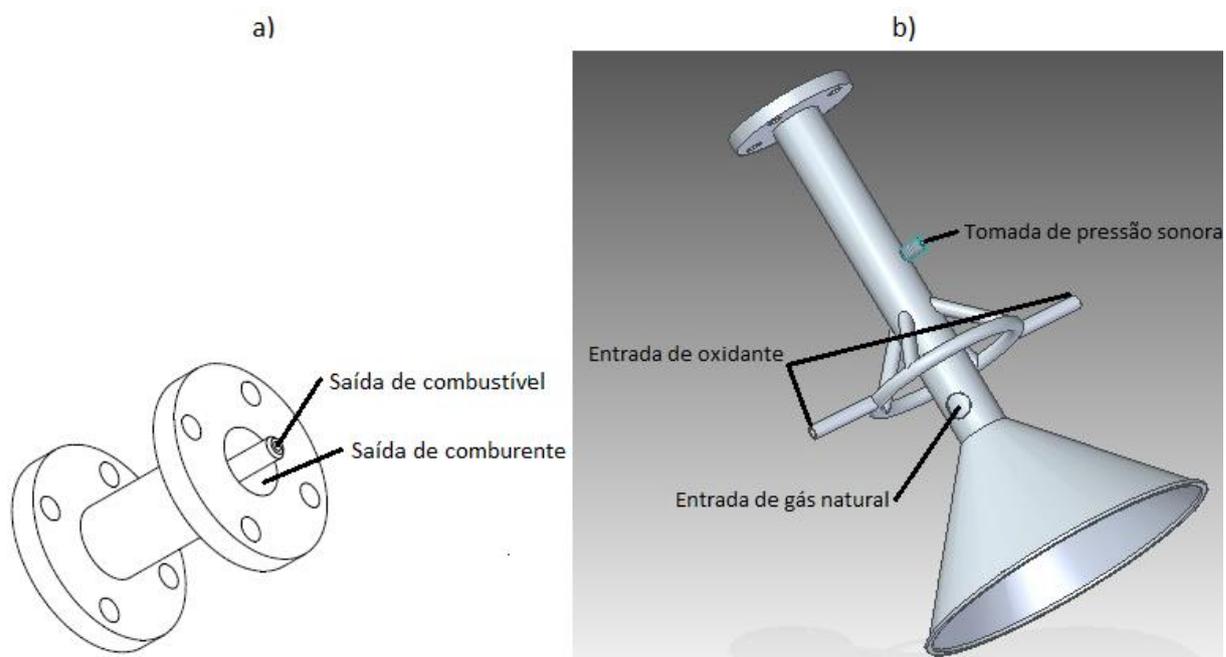
Figura 19 – Dispositivo experimental para realização dos ensaios.



O queimador foi 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 foi injetado pelo centro do queimador por um canal de 6 mm de diâmetro, conforme apresentado na Figura 20. A chama é acesa 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 20 – Detalhe do queimador (a); entrada de gás e oxidante (b).



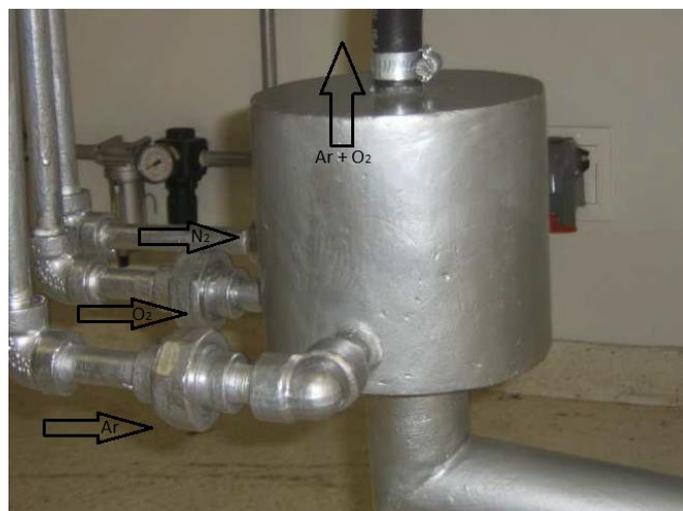
3.1.2. Sistema de excitação sonora e de enriquecimento do oxidante

Foi utilizado para compor a fonte do campo acústico, um alto-falante automotivo do tipo *Woofers* de 12", onde a especificação é detalhada na Tabela 3. A fonte é responsável pela excitação acústica imposta à combustão. O alto-falante utilizado suporta uma tensão de até 30V e para monitorar essa tensão foi utilizado um multímetro. Foi utilizado para gerar o sinal eletrônico responsável pela forma da onda (senoidal) e pela frequência, um gerador de funções, com amplitude de 1,4 Vrms (1,98 V de pico). O sinal eletrônico passa por um amplificador antes de ser injetado no circuito do alto-falante. Para se verificar a amplitude de pressão do ar excitado, colocou-se um transdutor de pressão piezelétrico de marca *Warmer*® e modelo WTP-4010, com um range de 0 a 200mBar, que converte o sinal de pressão acústica em sinal elétrico. Os dados coletados foram analisados em computador através do software *Labview*® e para processamento, foi utilizada uma plataforma de aquisição de dados da *National Instruments*® denominada *Compact Dek*, modelo cDAQ-9172 com módulo NI-9205.

Tabela 3 – Especificação técnica do alto-falante.

| Informações Básicas | |
|------------------------|----------------|
| Marca | Natts® |
| Modelo | NW-12147-BT |
| Características | |
| Potência | 200 RMS |
| Impedância | 8 Ohms |
| Resposta da Frequência | 3000 Hz, 60 Hz |
| Sensibilidade | 94 dB |
| Dimensões | |
| Diâmetro Externo | 306 mm |
| Diâmetro Interno | 147 mm |

O enriquecimento do oxidante foi feito através da injeção de O_2 puro (99% de pureza) 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 (utilizado para limpeza e inertização do sistema) e uma saída para descarga de ar enriquecido, conforme a Figura 21. A mistura e homogeneização do oxigênio com o ar é realizada dentro do pré-misturador através de chicanas montadas em seu corpo.

Figura 21 – Pré - misturador de enriquecimento.

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 foi necessário realizar as correções de densidade para a correta medição de vazão. Suas características técnicas são apresentadas na Tabela 4.

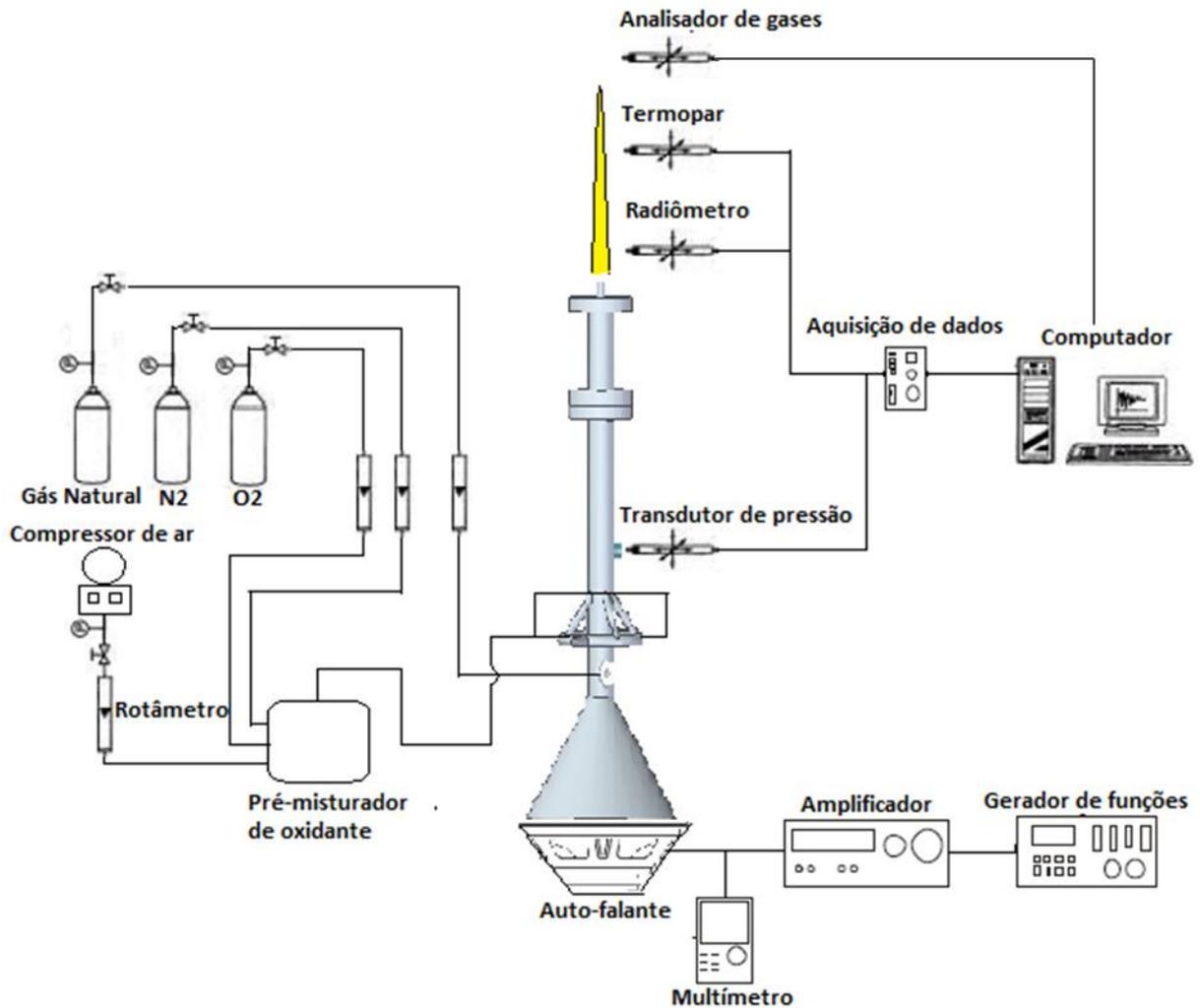
Tabela 4 – Características técnicas dos rotâmetros.

| Rotâmetro | Uso | Fabricante | Gás de Referência | Faixa de Vazão (L/min) | Incerteza (L/min) |
|-----------|----------------|-------------------|-------------------|------------------------|-------------------|
| 1 | Ar | OMEL [®] | Ar 25°C, 7 bar | 0-500 | ± 2,5 |
| 2 | Nitrogênio | OMEL [®] | Ar 25°C, 7 bar | 0-1.000 | ± 2,5 |
| 3 | O ₂ | OMEL [®] | Ar 25°C, 7 bar | 0-100 | ± 0,5 |
| 4 | Gás Natural | OMEL [®] | Ar 25°C, 7 bar | 0-100 | ± 0,5 |

Na Figura 22 é apresentado um diagrama esquemático do funcionamento do sistema de excitação sonora e enriquecimento do ar de combustão com O₂. É possível observar as linhas de entrada de gás natural, oxigênio, nitrogênio e ar atmosférico comprimido gerado a partir de um compressor e seus respectivos rotâmetros e válvulas de regulagem de vazão. Todos os oxidantes passam pelo pré-misturados antes de entrarem no queimador, com o objetivo de homogeneizar ar atmosférico e oxigênio. Na Figura 22 está evidenciado também o sistema de amplificação sonora onde é possível variar frequência e sinal de tensão, além de apresentar como será feita a aquisição dos dados para interpretação dos resultados.

Os ajustes para obter as vazões das condições de teste foram obtidos através de manuseio de válvulas nas linhas de ar atmosférico e oxigênio, e a variação de sinal de tensão no alto-falante realizada através do programa desenvolvido na plataforma Labview[®]. Cada ensaio realizado teve duração de 5 min, além do tempo de partida do equipamento de 1h para aquecimento da câmara de combustão

Figura 22 – Diagrama esquemático do funcionamento do protótipo experimental.



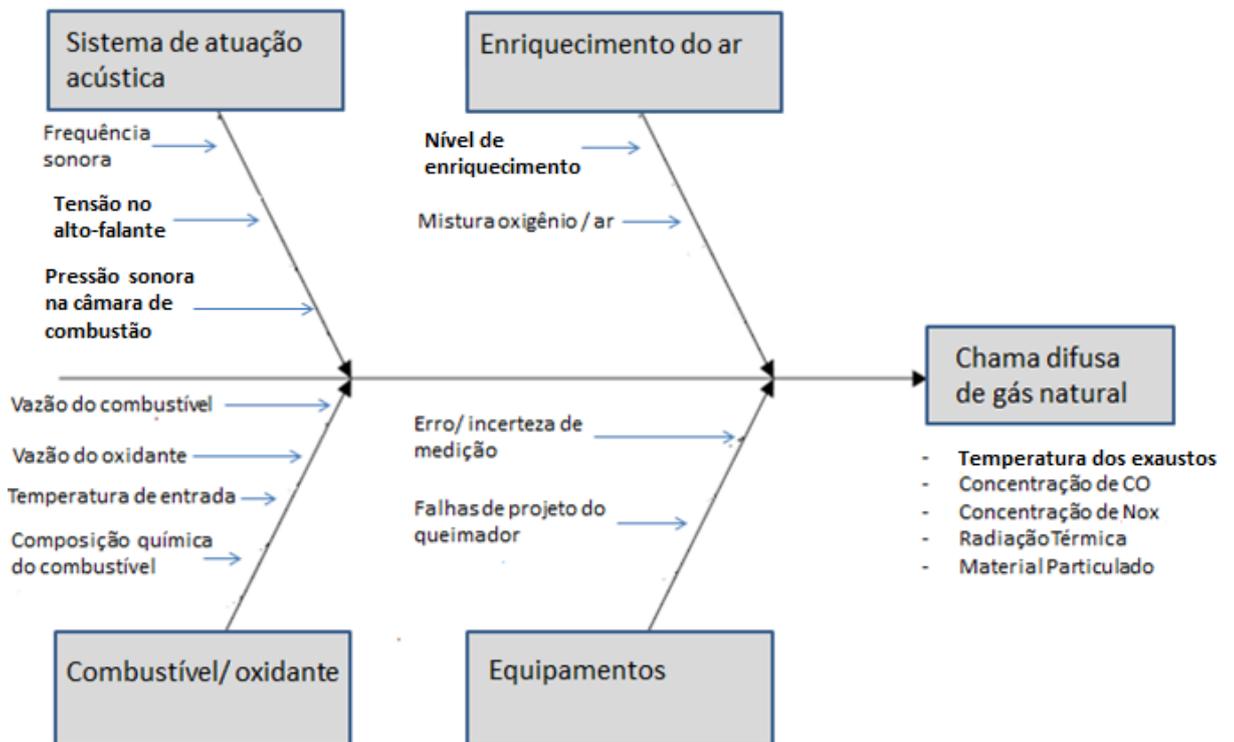
3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Na Figura 23 é apresentado um diagrama espinha de peixe (Diagrama de Ishikawa) do experimento, onde o objetivo foi identificar os fatores que podem interferir nas variáveis de resposta do experimento. Com isso foi possível definir as variáveis controláveis e as variáveis resposta que serão utilizados nos ensaios.

Para realização do experimento foram considerados três fatores controlados de entrada: amplitude de tensão no alto-falante, nível de enriquecimento do oxidante e o fator de equivalência ar/combustível. Sendo que a “tensão aplicada ao alto-falante” é uma característica específica da técnica de combustão excitada com ondas sonoras, o “Nível de enriquecimento do oxidante (Ω)” um fator característico da técnica de combustão enriquecida com oxigênio e a “Razão de equivalência (ϕ)” é uma variável comum no estudo do fenômeno de combustão que dá uma referência

do excesso de ar envolvido na queima. Os seguintes fatores foram considerados variáveis não controladas: os relacionados ao equipamento, composição química do combustível, temperatura de entrada dos gases, lotes de matéria prima e a frequência sonora, que foi fixada na frequência que resulta na maior pressão sonora na corrente de oxidante. As variáveis respostas a serem analisadas são: temperatura, concentração de CO e concentração de NOx dos gases de exaustão.

Figura 23 – Diagrama espinha de peixe representando o experimento.



Os gases de exaustão foram 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®, o equipamento encontrava-se calibrado para as faixas de erro de projeto. O analisador utilizado permite a medição dos seguintes gases na exaustão: oxigênio (O₂), monóxido de Carbono (CO), óxidos de nitrogênio - NOx (óxido nítrico - NO e dióxido de nitrogênio - NO₂), dióxido de enxofre (SO₂), sulfeto de hidrogênio (H₂S), além de possuir na sonda de medição um termopar que possibilita a medição da temperatura dos gases de exaustão, que foram medidos a uma distância de 1,1 m do bico de saída do combustível na câmara de combustão. A Figura 24 apresenta o detalhe do ponto de coleta dos gases de exaustão. No presente trabalho são considerados apenas os gases CO, NOx e a temperatura dos

exaustos. Na Tabela 5 é apresentada as faixas de medição e incerteza do equipamento.

Figura 24 – Detalhe do ponto de coleta dos gases de exaustão.

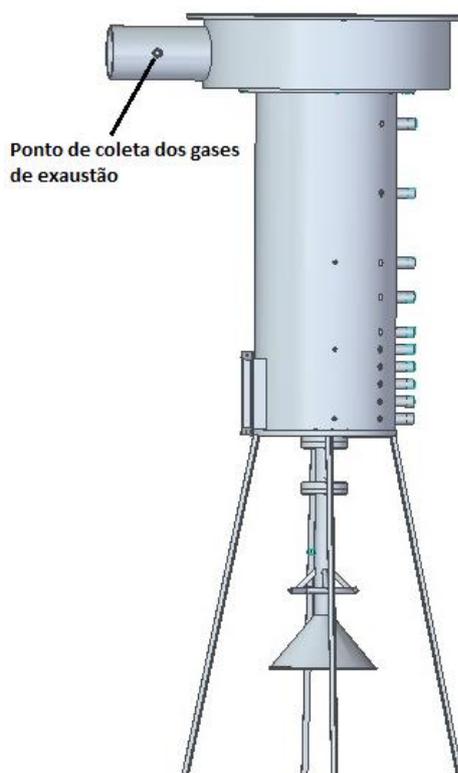


Tabela 5 – Características técnicas do analisador de gases.

| Gás Monitorado | Faixa de Medição | Incerteza |
|--|------------------|-----------|
| Oxigênio (O ₂) | 0 -25% | ± 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 |

O experimento foi conduzido seguindo a metodologia do DOE - *Design Of Experiments* proposta por Montgomery (2012), e trata-se de um experimento fatorial (2^3 + ponto central) de dois níveis de cada um dos três fatores controláveis de entrada, com o objetivo de identificar, através da análise estatística, quais fatores e combinação deles tem maior interferência em cada variável resposta do processo,

bem como, obter um modelo que represente com confiança o fenômeno físico em estudo, possibilitando a análise e interpretação dos resultados.

A combinação de cada nível dos três fatores de entrada mais um ponto central que foi considerado, nos fornece 9 (nove) condições diferentes de ensaio, porém foi realizado triplicatas de cada condição, totalizando 27 (vinte e sete) ensaios realizados, que foram realizados de forma randomizada para reduzir as possíveis interferências de variáveis consideradas fixas. Uma notação utilizada para representar os diferentes níveis dos fatores é através de números 0 (nível baixo) e 1 (nível alto). A Tabela 6 apresenta o planejamento fatorial realizado.

Tabela 6 – Planejamento experimental 2^3 + ponto central.

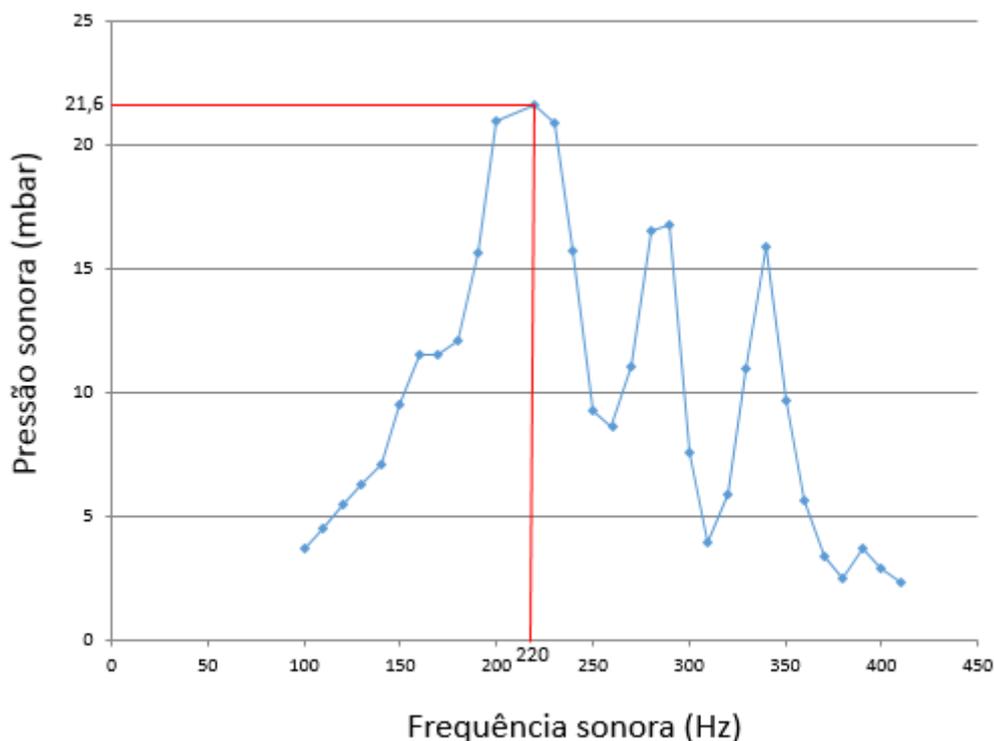
| Experimento | Razão de equivalência | Tensão | Nível de enriquecimento |
|--------------------|------------------------------|---------------|--------------------------------|
| 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | 1 |
| 3 | 1 | 1 | 1 |
| 4 | 1 | 0 | 1 |
| 5 | 1 | 0 | 1 |
| 6 | 1 | 0 | 1 |
| 7 | 1 | 1 | 0 |
| 8 | 1 | 1 | 0 |
| 9 | 1 | 1 | 0 |
| 10 | 1 | 0 | 0 |
| 11 | 1 | 0 | 0 |
| 12 | 1 | 0 | 0 |
| 13 | 0 | 1 | 1 |
| 14 | 0 | 1 | 1 |
| 15 | 0 | 1 | 1 |
| 16 | 0 | 1 | 0 |
| 17 | 0 | 1 | 0 |
| 18 | 0 | 1 | 0 |
| 19 | 0 | 0 | 1 |
| 20 | 0 | 0 | 1 |
| 21 | 0 | 0 | 1 |
| 22 | 0 | 0 | 0 |
| 23 | 0 | 0 | 0 |
| 24 | 0 | 0 | 0 |
| 25 | Ponto central | Ponto central | Ponto central |
| 26 | Ponto central | Ponto central | Ponto central |
| 27 | Ponto central | Ponto central | Ponto central |

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO QUEIMADOR PROJETADO

Para caracterização dos limites de “tensão no alto-falante” foi realizado um teste inicial sem chama (a frio), onde foi traçado um gráfico de frequência sonora X amplitude pressão sonora medida no transdutor de pressão localizado na corrente de entrada de ar. O gráfico está apresentado abaixo na Figura 25.

O teste inicial foi realizado variando a frequência com incrementos de 10 Hz em uma faixa de 100 a 400 Hz (valores abaixo de 100 Hz e acima de 400 Hz não apresentaram picos significativos de amplitude de pressão sonora) e aplicando uma tensão ao alto-falante constante de 13 V, o gráfico revelou três picos de pressão sonora que são os harmônicos do queimador projetado. O pico mais elevado de amplitude de pressão se deu no valor de 220 Hz de frequência sonora com um valor de 21,6 mbar de amplitude de pressão sonora, logo, esse valor de frequência foi assumido como fixo nos ensaios com excitação sonora. O nível alto (1) de tensão no alto-falante foi encontrado, realizando um teste inicial a quente (todos os ensaios a quente foram realizados após 1h de chama acessa para aquecimento da câmara de combustão), variando esse fator até o ponto onde a chama foi desancorada da borda do queimador, foi encontrado um limite máximo de 5,3 V e uma amplitude de pressão sonora de 8,8 mbar na condição de combustão rica em combustível e sem enriquecimento com oxigênio, condição crítica onde a chama apresentou-se mais instável, conseqüentemente foi considerada a condição de zero de excitação sonora como nível mais baixo (0) para o fator tensão no alto-falante.

Figura 25 – Gráfico de Frequência x Amplitude de pressão sonora.



Para caracterizar os limites do “Nível de enriquecimento com O_2 na mistura (Ω)”, foi considerado como nível máximo 30% ($\Omega = 0,30$) de O_2 na mistura, que é o maior percentual de enriquecimento considerado no nível de baixo enriquecimento em Baukal (1998), para baixos níveis de enriquecimento não são necessárias grandes modificações no equipamento para aplicação da técnica de OEC, conseqüentemente como nível mais baixo de enriquecimento foi considerado a condição de zero enriquecimento ou 21% ($\Omega = 0,21$) de O_2 , do ar atmosférico.

Para caracterização dos limites da Razão de Equivalência (ϕ), foram considerados para os níveis inferiores e superiores as condições de combustão pobre ($\phi = 0,7$) e de combustão rica ($\phi = 1,3$), sendo possível com isso avaliar o comportamento nas duas condições de combustão básicas, tais condições foram atingidas no queimador variando a vazão de oxidante e mantendo a vazão de combustível fixa. A Tabela 7 apresenta as 27 (vinte e sete) condições ensaiadas com os limites máximos e mínimos caracterizados para cada variável controlável mais o ponto central, para o queimador projetado.

Tabela 7 – Caracterização dos limites das variáveis controláveis mais ponto central.

| Experimento | Razão de equivalência | Tensão | Nível de enriquecimento |
|--------------------|------------------------------|---------------|--------------------------------|
| 1 | 1,3 | 5,3 | 0,30 |
| 2 | 1,3 | 5,3 | 0,30 |
| 3 | 1,3 | 5,3 | 0,30 |
| 4 | 1,3 | 0 | 0,30 |
| 5 | 1,3 | 0 | 0,30 |
| 6 | 1,3 | 0 | 0,30 |
| 7 | 1,3 | 5,3 | 0,21 |
| 8 | 1,3 | 5,3 | 0,21 |
| 9 | 1,3 | 5,3 | 0,21 |
| 10 | 1,3 | 0 | 0,21 |
| 11 | 1,3 | 0 | 0,21 |
| 12 | 1,3 | 0 | 0,21 |
| 13 | 0,7 | 5,3 | 0,30 |
| 14 | 0,7 | 5,3 | 0,30 |
| 15 | 0,7 | 5,3 | 0,30 |
| 16 | 0,7 | 5,3 | 0,21 |
| 17 | 0,7 | 5,3 | 0,21 |
| 18 | 0,7 | 5,3 | 0,21 |
| 19 | 0,7 | 0 | 0,30 |
| 20 | 0,7 | 0 | 0,30 |
| 21 | 0,7 | 0 | 0,30 |
| 22 | 0,7 | 0 | 0,21 |
| 23 | 0,7 | 0 | 0,21 |
| 24 | 0,7 | 0 | 0,21 |
| 25 | 1 | 2,65 | 0,25 |
| 26 | 1 | 2,65 | 0,25 |
| 27 | 1 | 2,65 | 0,25 |

3.3.1. Cálculo das variáveis estequiométricas do experimento

Os cálculos das variáveis estequiométricas foram realizados considerando os dados de projeto do dispositivo experimental e as características técnicas do combustível utilizado, o gás natural, de fornecimento pela Bahiagás, que possui as composições química e físicas conforme Tabela 8.

Tabela 8 – Especificação técnica do gás natural.

| | |
|--------------------------------|-------------------------------------|
| Composição química | 88,82% CH ₄ |
| | 8,41% C ₂ H ₆ |
| | 0,55% C ₃ H ₈ |
| | 1,62% N ₂ |
| | 0,6% CO ₂ |
| Massa específica (ρ) | 0,62 Kg/m ³ |
| Viscosidade dinâmica (μ) | 0,10816 x 10 ⁻³ P |
| Poder calorífico | 9.400 kcal/m ³ |

Outra consideração feita, para realização do cálculo da vazão de combustível, foi que o Número de Reynolds seria de ($Re = 4100$), onde a chama fica localizada na zona de transição entre fluxo laminar para turbulento, para que a turbulência natural devido ao fluxo de combustível não venha a impactar nos resultados obtidos, para isso a vazão do combustível foi mantida constante (20,2 L/min) em todas as condições ensaiadas, sendo variado a vazão do oxidante para atingir as condições desejadas. A Tabela 9 abaixo apresenta os parâmetros calculados pelas reações estequiométricas entre combustível e oxidante e o detalhamento dos cálculos realizados estão demonstrados no ANEXO 2.

Tabela 9 - Parâmetros calculados para realização do experimento.

Vazão de combustível = 20,2 L/min

| Razão de equivalência ($\phi = 1$) | Vazão do ar atmosférico (L/min) | Vazão oxigênio puro (L/min) |
|---|---------------------------------|-----------------------------|
| Nível de enriquecimento (25%) ($\Omega = 0,25$) | 191,2 | 10,2 |

| Razão de equivalência ($\phi = 1,3$) | Vazão do ar atmosférico (L/min) | Vazão oxigênio puro (L/min) |
|---|---------------------------------|-----------------------------|
| Nível de enriquecimento (21%) ($\Omega = 0,21$) | 154,9 | 0 |
| Nível de enriquecimento (30%) ($\Omega = 0,30$) | 137,3 | 17,6 |

| Razão de equivalência ($\phi = 0,7$) | Vazão do ar atmosférico (L/min)) | Vazão oxigênio puro (L/min) |
|---|----------------------------------|-----------------------------|
| Nível de enriquecimento (21%) ($\Omega = 0,21$) | 287,7 | 0 |
| Nível de enriquecimento (30%) ($\Omega = 0,30$) | 255,0 | 32,7 |

3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O software estatístico Minitab® foi utilizado para auxiliar na análise e interpretação dos resultados, na plataforma são disponibilizadas ferramentas de DOE e ANOVA (análise de variância). A análise de Variância (ANOVA) é uma

técnica estatística que permite avaliar diferenças entre as médias de populações. A análise visa, fundamentalmente, verificar se existe uma diferença significativa entre as médias, e quais são os fatores que exercem maior influência nas variáveis resposta (Montgomery, 2012). Esta análise foi aplicada aos resultados dos ensaios para identificar a influência dos fatores de entrada em cada ensaio. Valores de P menores que “0,05” confirmam a hipótese testada, indicando que as variáveis testadas possuem efeito significativos nos resultados.

O “R²” é o coeficiente de determinação, e é entendido como medida de ajustamento de um modelo estatístico linear generalizado, como a regressão linear em relação aos valores observados. Ele varia de 0 a 100% indicando o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. Quanto maior seu valor, mais explicativo é o modelo e menor a influência dos ruídos sobre o mesmo.

Através de todos os resultados das variáveis resposta (CO, NOx e temperatura dos gases de exaustão) foi calculada a correlação das variáveis controláveis, a influência que cada variável representa nas emissões de CO e Nox e na variação de temperatura dos gases exaustos e modelada a equação de regressão representativa das condições experimentais do queimador projetado.

Por fim, com as equações de regressão para cada variável resposta foi identificado a condição das variáveis controláveis de entrada (razão de equivalência, tensão no alto-falante e nível de enriquecimento), dentro dos limites ensaiados, que otimizem as respostas para os seguintes objetivos: temperatura dos exaustos (maximizar), concentração de CO (minimizar) e concentração de NOx (minimizar). Com isso, foi possível identificar a melhor condição operacional, dentro dos limites das variáveis de entrada no experimento, em que o queimador pode trabalhar com níveis otimizados das três variáveis respostas em paralelo que são a concentração de poluentes emitidos à atmosfera de monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio e a temperatura dos gases exaustos que nos fornece uma inferência da energia que está sendo disponibilizada para uso em sistemas térmicos (por exemplo: geração de energia), logo quanto maior for melhor.

3.5 VALIDAÇÃO DO QUEIMADOR EXPERIMENTAL

Para validar o dispositivo experimental projetado foi testado experimentalmente o ponto otimizado das variáveis de entrada, encontrados a partir das equações de regressão que representam o modelo físico, e foi feito uma comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e os encontrados a partir das equações de regressão, a partir do erro encontrado entre os valores o queimador experimental pode ser validado.

3.6 ANÁLISE DE CUSTOS DA IMPLANTAÇÃO DO DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Foram levantados os custos para a implantação do queimador experimental e em seguida esses custos foram divididos pela potência do equipamento construído que foi de 13,24 KW, de posse desse custo por unidade de potência, foi possível fazer a comparação com os custos específicos de duas unidades termelétricas estudadas no trabalho de Braciani (2011), as UTE Baixada Fluminense e UTE Maranhão III, sendo que essas unidades de geração de energia, utilizam combustão convencional de gás natural.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 10 apresenta os valores obtidos para as variáveis resposta (CO, NOx e temperatura de exaustão), para os 27 (vinte e sete) ensaios realizados (triplicata das 9 (nove) condições ensaiadas). As médias e desvios padrão das variáveis respostas, para cada condição ensaiada, são apresentados na Tabela 11. Ao analisar os dados individualmente pode-se observar uma boa uniformidade, refletidos nos valores de desvio padrão aceitáveis.

Tabela 10 – Resultados do experimento.

| Condições de ensaio | Razão de equivalência (ϕ) | Tensão (V) | Nível de enriquecimento (Ω) | CO (ppm) | Nox (ppm) | Temperatura de exaustão (°C) |
|---------------------|----------------------------------|------------|--------------------------------------|----------|-----------|------------------------------|
| 1 | 1,3 | 5,3 | 0,30 | 9 | 84 | 208 |
| | 1,3 | 5,3 | 0,30 | 4 | 94 | 204 |
| | 1,3 | 5,3 | 0,30 | 6 | 100 | 210 |
| 2 | 1,3 | 0 | 0,30 | 3 | 91 | 206 |
| | 1,3 | 0 | 0,30 | 3 | 101 | 203 |
| | 1,3 | 0 | 0,30 | 2 | 105 | 212 |
| 3 | 1,3 | 5,3 | 0,21 | 492 | 47 | 212 |
| | 1,3 | 5,3 | 0,21 | 472 | 44 | 220 |
| | 1,3 | 5,3 | 0,21 | 489 | 31 | 214 |
| 4 | 1,3 | 0 | 0,21 | 636 | 44 | 210 |
| | 1,3 | 0 | 0,21 | 630 | 40 | 211 |
| | 1,3 | 0 | 0,21 | 632 | 37 | 213 |
| 5 | 0,7 | 5,3 | 0,30 | 0 | 91 | 230 |
| | 0,7 | 5,3 | 0,30 | 4 | 121 | 228 |
| | 0,7 | 5,3 | 0,30 | 0 | 110 | 225 |
| 6 | 0,7 | 5,3 | 0,21 | 7 | 44 | 221 |
| | 0,7 | 5,3 | 0,21 | 5 | 53 | 228 |
| | 0,7 | 5,3 | 0,21 | 0 | 62 | 226 |
| 7 | 0,7 | 0 | 0,30 | 2 | 121 | 226 |
| | 0,7 | 0 | 0,30 | 3 | 95 | 224 |
| | 0,7 | 0 | 0,30 | 2 | 111 | 228 |
| 8 | 0,7 | 0 | 0,21 | 2 | 58 | 226 |
| | 0,7 | 0 | 0,21 | 4 | 53 | 226 |
| | 0,7 | 0 | 0,21 | 5 | 57 | 225 |
| 9 | 1 | 2,65 | 0,25 | 6 | 74 | 216 |
| | 1 | 2,65 | 0,25 | 5 | 68 | 217 |
| | 1 | 2,65 | 0,25 | 4 | 71 | 227 |

Tabela 11 – Médias e desvios padrão dos resultados.

| Condições de ensaio | CO (ppm) | Nox (ppm) | Temperatura de exaustão (°C) | Média para CO (ppm) | Média para NOx (ppm) | Média para Temperatura de exaustão (°C) | Desvio padrão para CO (ppm) | Desvio padrão para NOx (ppm) | Desvio padrão para Temperatura de exaustão (°C) |
|---------------------|----------|-----------|------------------------------|---------------------|----------------------|---|-----------------------------|------------------------------|---|
| 1 | 9 | 84 | 208 | 6,3 | 92,7 | 207,3 | 2,1 | 6,6 | 2,5 |
| | 4 | 94 | 204 | | | | | | |
| | 6 | 100 | 210 | | | | | | |
| 2 | 3 | 91 | 206 | 2,7 | 99,0 | 207,0 | 0,5 | 5,9 | 3,7 |
| | 3 | 101 | 203 | | | | | | |
| | 2 | 105 | 212 | | | | | | |
| 3 | 492 | 47 | 212 | 484,3 | 40,7 | 215,3 | 8,8 | 6,9 | 3,4 |
| | 472 | 44 | 220 | | | | | | |
| | 489 | 31 | 214 | | | | | | |
| 4 | 636 | 44 | 210 | 632,7 | 40,3 | 211,3 | 2,5 | 2,9 | 1,2 |
| | 630 | 40 | 211 | | | | | | |
| | 632 | 37 | 213 | | | | | | |
| 5 | 0 | 91 | 230 | 1,3 | 107,3 | 227,7 | 1,9 | 12,4 | 2,1 |
| | 4 | 121 | 228 | | | | | | |
| | 0 | 110 | 225 | | | | | | |
| 6 | 7 | 44 | 221 | 4,0 | 53,0 | 225,0 | 2,9 | 7,3 | 2,9 |
| | 5 | 53 | 228 | | | | | | |
| | 0 | 62 | 226 | | | | | | |
| 7 | 2 | 121 | 226 | 2,3 | 109,0 | 226,0 | 0,5 | 10,7 | 1,6 |
| | 3 | 95 | 224 | | | | | | |
| | 2 | 111 | 228 | | | | | | |
| 8 | 2 | 58 | 226 | 3,7 | 56,0 | 225,7 | 1,2 | 2,2 | 0,5 |
| | 4 | 53 | 226 | | | | | | |
| | 5 | 57 | 225 | | | | | | |
| 9 | 6 | 74 | 216 | 5,0 | 71,0 | 220,0 | 0,8 | 2,4 | 5,0 |
| | 5 | 68 | 217 | | | | | | |
| | 4 | 71 | 227 | | | | | | |

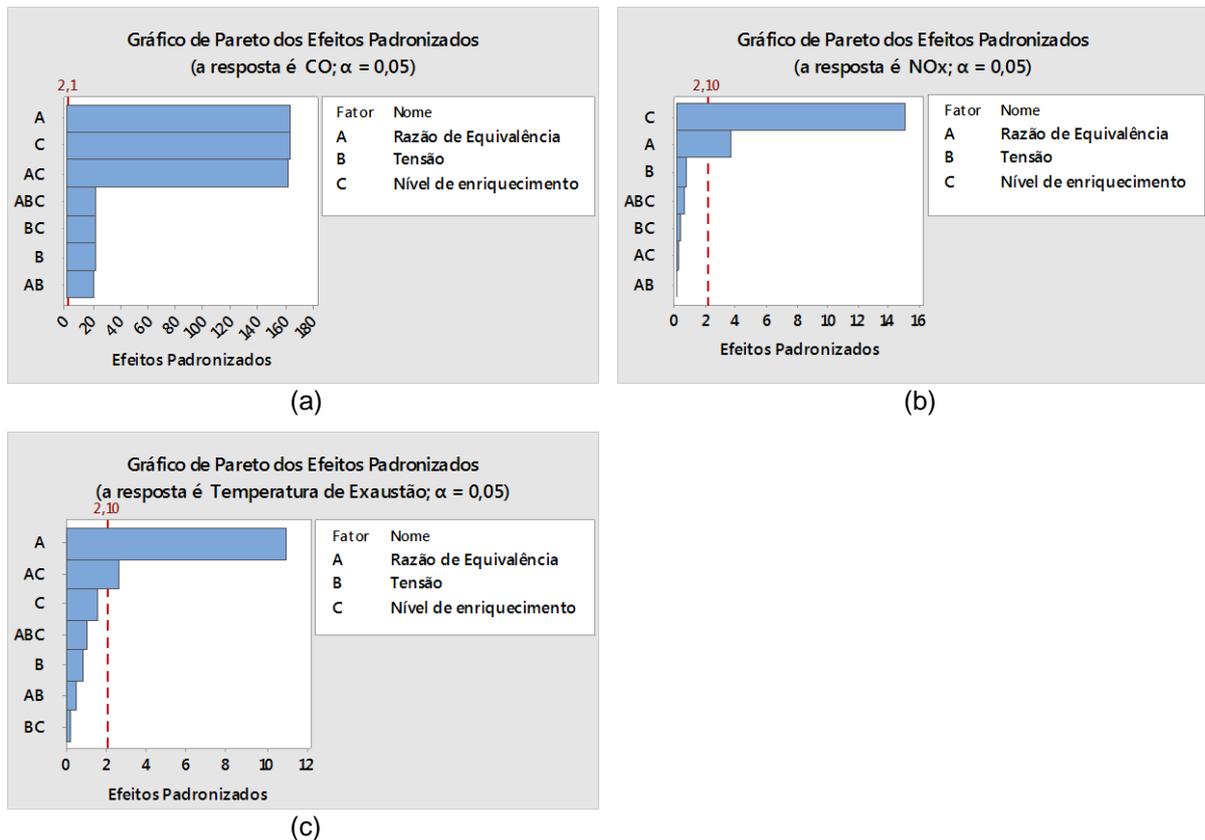
Através da análise individual de cada variável resposta foi possível obter os resultados apresentados na Tabela 12. Os valores do R² referente ao modelo de regressão dos dados de todas as respostas foram satisfatórios, acima de 88 %. O maior coeficiente de determinação foi obtido para o CO (99,98 %) e o menor para a temperatura de exaustão (88,25%). Os valores de R² indicam que a regressão estatística que foi aplicada representa significativamente os dados experimentais medidos.

Tabela 12 – Equações de regressão.

| Resposta | R ² (%) | Equação de regressão |
|-------------------------|--------------------|---|
| CO | 99,98 | $\text{CO} = -2438,4 + 3493,1 \text{ Razão de Equivalência} + 112,13 \text{ Tensão} + 8134,6$ $\text{Nível de enriquecimento} - 159,26 \text{ Razão de Equivalência} \cdot \text{Tensão} -$ $11642,0 \text{ Razão de Equivalência} \cdot \text{Nível de enriquecimento} - 377,8$ $\text{Tensão} \cdot \text{Nível de enriquecimento} + 535,8 \text{ Razão de}$ $\text{Equivalência} \cdot \text{Tensão} \cdot \text{Nível de enriquecimento}$ |
| Nox | 93,12 | $\text{NOx} = -34,0 - 48,1 \text{ Razão de Equivalência} - 6,0 \text{ Tensão} + 515 \text{ Nível de}$ $\text{enriquecimento} + 6,9 \text{ Razão de Equivalência} \cdot \text{Tensão} + 105 \text{ Razão de}$ $\text{Equivalência} \cdot \text{Nível de enriquecimento} + 22,4 \text{ Tensão} \cdot \text{Nível de}$ $\text{enriquecimento} - 28,0 \text{ Razão de Equivalência} \cdot \text{Tensão} \cdot \text{Nível de}$ enriquecimento |
| Temperatura de exaustão | 88,25 | $\text{Temperatura de Exaustão} = 228,9 - 5,7 \text{ Razão de Equivalência} - 5,26$ $\text{Tensão} + 64,2 \text{ Nível de enriquecimento} + 5,87 \text{ Razão de}$ $\text{Equivalência} \cdot \text{Tensão} - 86,4 \text{ Razão de Equivalência} \cdot \text{Nível de}$ $\text{enriquecimento} + 19,6 \text{ Tensão} \cdot \text{Nível de enriquecimento} - 21,0 \text{ Razão de}$ $\text{Equivalência} \cdot \text{Tensão} \cdot \text{Nível de enriquecimento}$ |

O gráfico de Pareto dos efeitos padronizados ilustra como os parâmetros controláveis (razão de equivalência, sinal de tensão e nível de enriquecimento), assim como a combinação entre eles, influenciam nos valores das variáveis resposta (CO, NOx e temperatura de exaustão). A Figura 26 apresenta os gráficos de Pareto para os ensaios realizados para cada resposta.

Figura 26 – Gráfico de Pareto: (a) CO; (b) NOx; (c) Temperatura de exaustão.



Para as emissões de CO, todos os fatores, bem como a combinação entre eles apresentaram influência significativa em seus resultados. Para as emissões de NOx apenas o “Nível de enriquecimento” e a “Razão de equivalência” tiveram forte influência, condizendo com os resultados encontrados no trabalho de Cardu e Baica (2005) demonstrados na Figura 4 que apontam uma grande dependência da concentração de NOx térmico com a concentração do oxigênio atômico e com a temperatura de chama. Os valores de temperatura de exaustão, foram mais influenciados pelo fator “Razão de equivalência” e pela combinação dele com o “Nível de enriquecimento”.

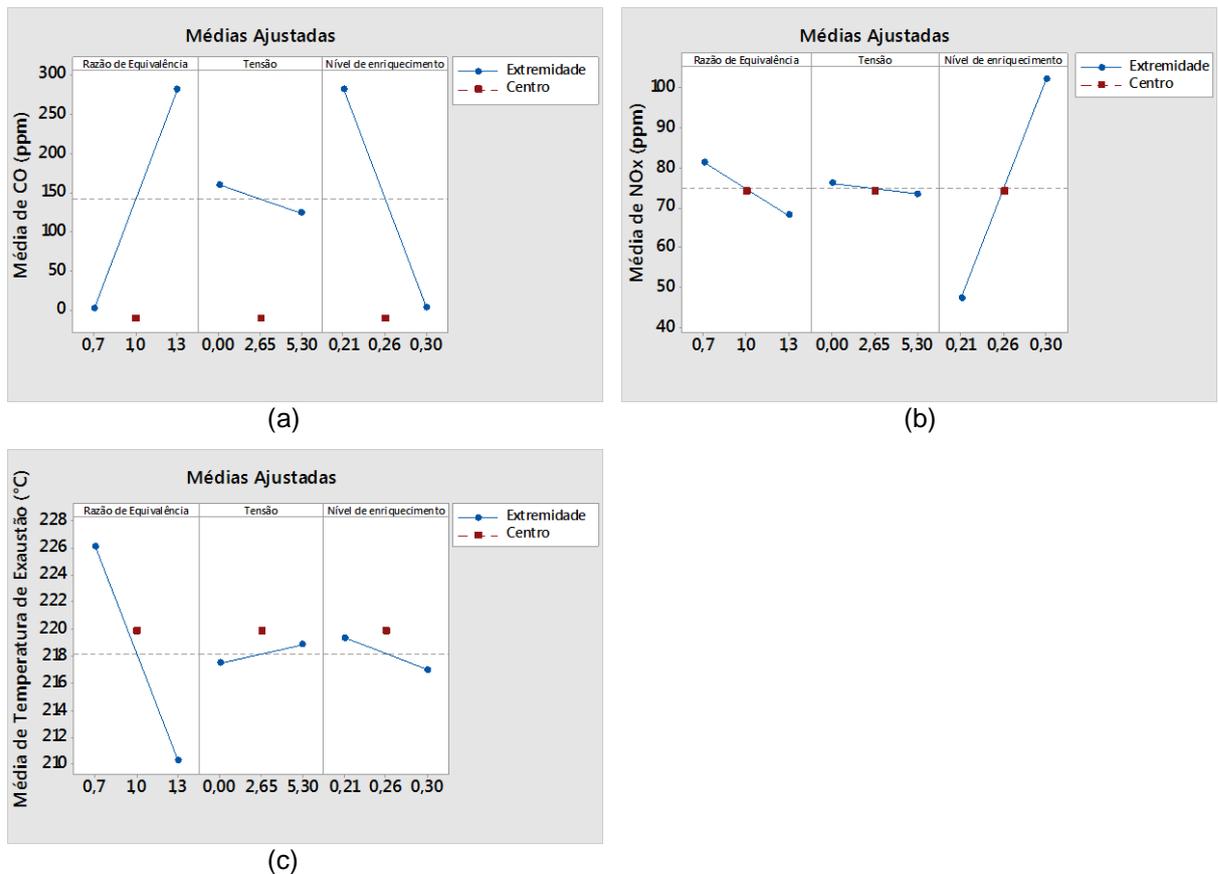
Pode-se destacar pela observação dos fatores individuais nos gráficos de Pareto, que entre as três variáveis controláveis o sinal de tensão de entrada no altofalante é o que menos está influenciando em todas as variáveis resposta do experimento, esse efeito pode ter sido dado pelo fato que essa variável está sendo limitada em 5,3V, refletindo em uma pressão sonora de 8,8 mbar na corrente de entrada do oxidante, devido a condição de combustão pobre em combustível ($\phi = 1,3$) e sem enriquecimento com oxigênio ($\Omega = 0,21$), apresentar o fenômeno conhecido como “*lifted flame*” ou chama suspensa, para valores de tensão acima desse limite. A operação em condição de chama suspensa é indesejada em queimadores industriais, devido à perda de eficiência e a instabilidade apresentada pela chama, podendo extinguir-se. Para as demais condições ensaiadas de combustão pobre em combustível ($\phi = 0,7$) ou com níveis de enriquecimento do oxidante com O₂, seria possível atingir valores maiores de tensão de entrada no altofalante.

A influência dos fatores de entrada nas variáveis resposta podem ser observados também na Tabela 13, onde são apresentados os valores de P para os fatores principais e combinação entre eles, valores de P menores que “0,05” indicando que as variáveis testadas possuem efeito significativos nos resultados.

Tabela 13 – Valores de P para os fatores principais e interações entre eles.

| Fatores | Valor de P | | |
|--|------------|-------|-------------------------|
| | CO | Nox | Temperatura de exaustão |
| Razão de Equivalência | 0,000 | 0,002 | 0,000 |
| Tensão | 0,000 | 0,469 | 0,364 |
| Nível de enriquecimento | 0,000 | 0,000 | 0,120 |
| Interações de 2 fatores | | | |
| Razão de Equivalência*Tensão | 0,000 | 0,927 | 0,568 |
| Razão de Equivalência*Nível de enriquecimento | 0,000 | 0,820 | 0,015 |
| Tensão*Nível de enriquecimento | 0,000 | 0,716 | 0,819 |
| Interações de 3 fatores | | | |
| Razão de Equivalência*Tensão*Nível de enriquecimento | 0,000 | 0,586 | 0,309 |

Para determinar o comportamento das variáveis resposta com a influência da variação dos fatores principais foram gerados os gráficos de efeitos principais para cada resposta (Figura 27).

Figura 27 – Gráfico dos efeitos principais para: (a) CO; (b) NOx; (c) Temperatura de exaustão.

O gráfico dos efeitos principais apresenta uma diminuição concentração de CO com o aumento do percentual de enriquecimento com O₂ devido a maior

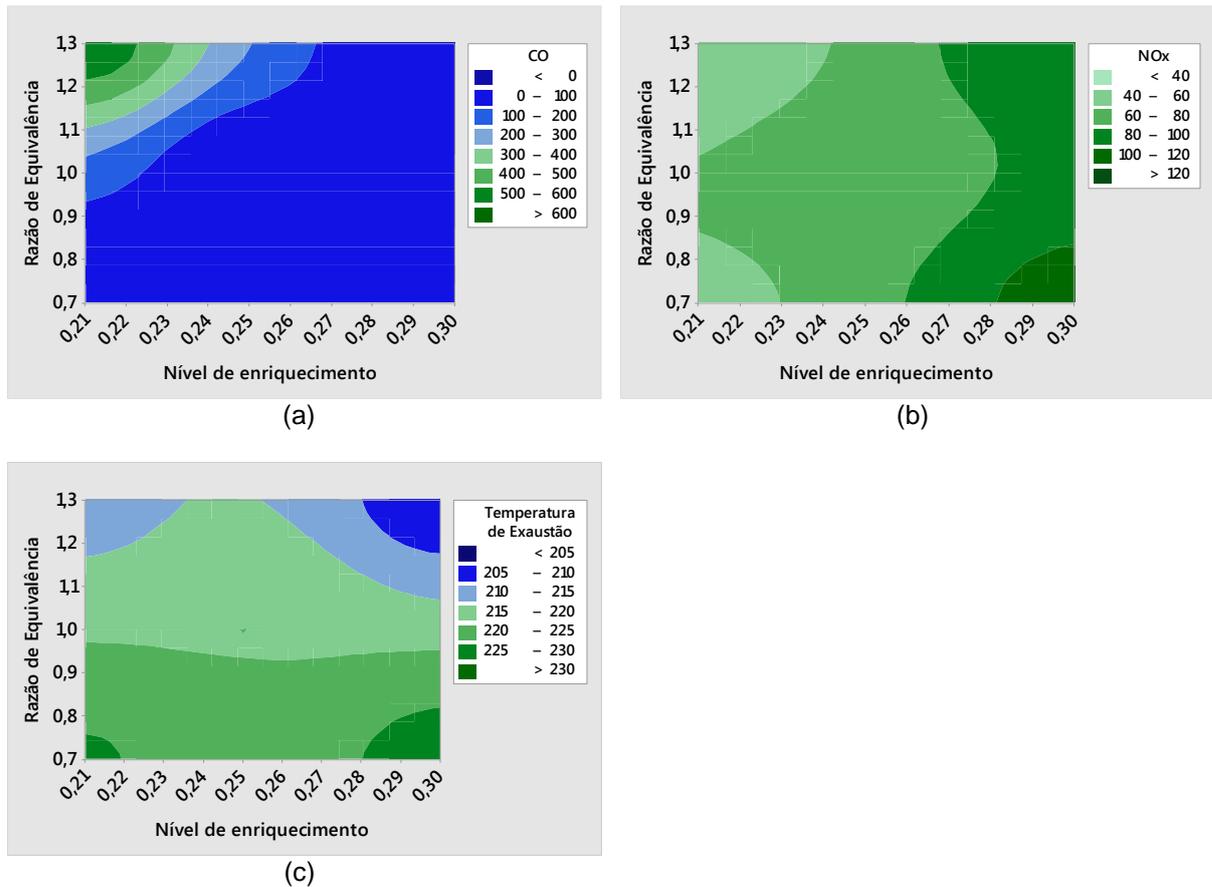
disponibilidade das moléculas de oxigênio para formação de CO_2 contribuindo para combustão completa, o mesmo ocorre com o aumento do excesso de ar na combustão, representado pela redução no fator “Razão de equivalência”. Já analisando o fator “sinal de tensão no alto-falante”, apesar desse fator ter menor influência sobre as variáveis resposta, foi observado que ele de maneira geral contribuiu para redução das emissões tanto de CO como NO_x , fenômeno também observado no trabalho de Kim *et al.* (2009) e atribuído ao fato das excitações sonoras melhorarem as taxas de mistura entre combustível/oxidante.

Foi possível observar também que os resultados para as concentrações de NO_x de maneira geral são opostos aos dos resultados de concentração de CO, onde há um aumento para o óxido de nitrogênio com o aumento da porcentagem de O_2 no oxidante e redução com o aumento do fator “Razão de equivalência”. Segundo Cohen (1996), esse comportamento se dá devido ao NO_x térmico depender da relação entre a temperatura de chama e a razão de equivalência, tal dependência pode ser observada na Figura 5. Dessa forma se torna necessário o estudo para combate desses dois poluentes de forma conjunta.

Para o fator “Temperatura dos gases de exaustão”, temos uma esperada redução para a condição de combustão pobre ($\phi = 1,3$), devido a condição de combustão incompleta proporcionada e evidenciada pelos altos índices de emissões de CO, condição essa que reduz o dispêndio de energia pelas reações químicas. Observa-se um pequeno aumento na média da temperatura dos gases de exaustão com a inclusão do campo acústico, o que pode ser explicado devido ao aumento na transferência de calor por convecção na saída dos gases, ocasionado pela excitação sonora. Outro fato observado para a temperatura dos gases de exaustão, é sua redução quando o oxidante foi enriquecido com O_2 , segundo Santos (2010), isso pode ocorrer quando a aplicação da OEC induz a formação de fuligem na chama, sendo a fuligem um agente intensificador da transferência de calor por radiação na câmara de combustão, menos energia é disponibilizada pelos gases de exaustão.

As Figuras 28, 29 e 30 apresentam os gráficos de contorno para as variáveis resposta com o objetivo de examinar a relação entre uma variável resposta e dois fatores controláveis exibindo contornos discretos da variável resposta analisada. Os gráficos foram gerados a partir das equações de regressão calculadas.

Figura 28 – Gráfico de contorno de Razão de equivalência x Nível de enriquecimento para: (a) CO; (b) NOx; (c) Temperatura de exaustão.



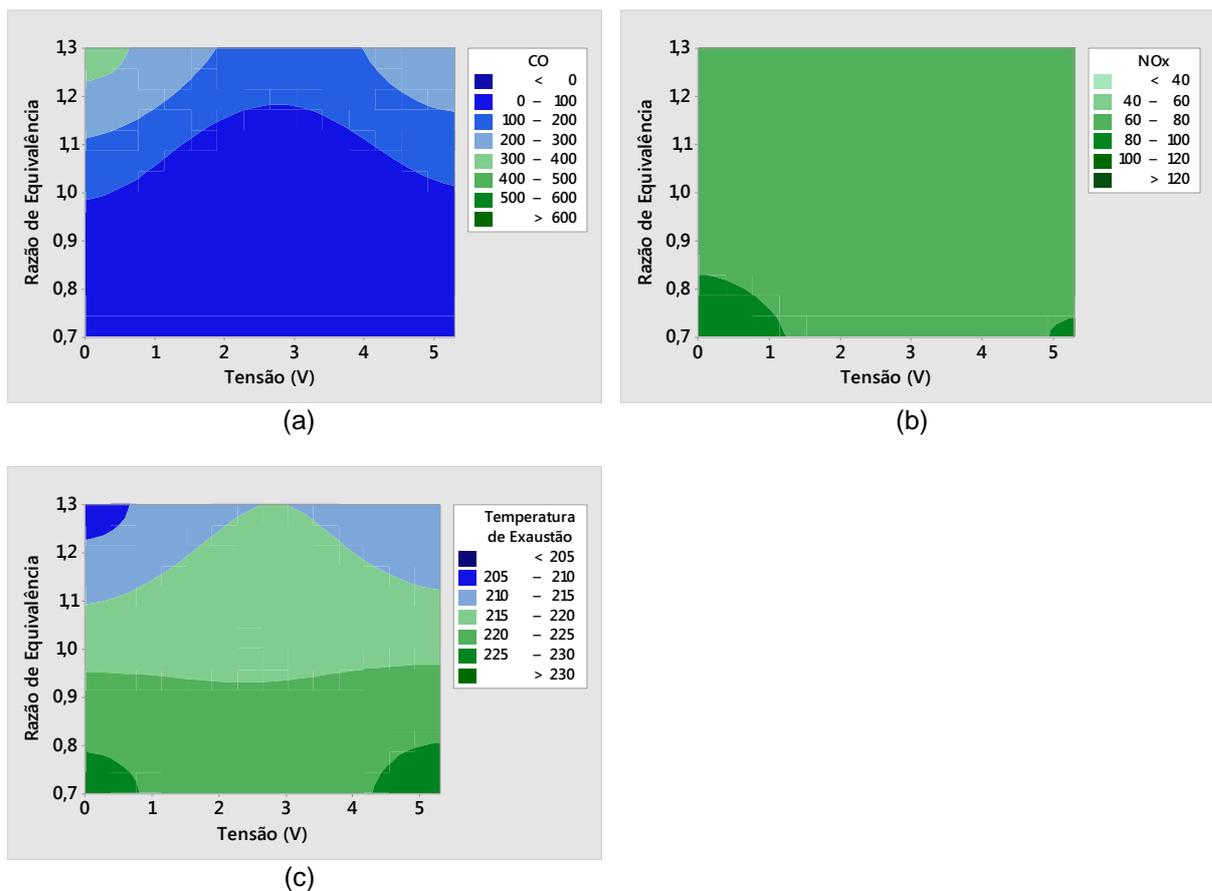
Analisando a Figura 28 (a), observamos que a zona de combustão rica em combustível ($\phi = 1,1 - 1,3$) é a que possui as maiores concentrações de monóxido de carbono e que essa concentração é reduzida com o enriquecimento do ar atmosférico com oxigênio, devido a maior disponibilidade de moléculas de O_2 , contribuindo para que o CO se transforme em CO_2 .

Para a Figura 28 (b), encontramos um comportamento semelhante ao gráfico da Figura 5 proposto por Cohen (1996), onde na faixa de razão de equivalência, temos concentrações mais altas de NOx na região de combustão estequiométrica ($\phi = 1$), e também fica evidenciado no gráfico que a concentração de NOx aumenta com a aplicação da técnica de OEC, devido ao aumento da temperatura de chama característico do enriquecimento do oxidante com O_2 , segundo Baukal (1998).

A temperatura dos gases de exaustão apresenta uma redução com o enriquecimento do oxidante com oxigênio para condições de combustão rica em combustível ($\phi = 1,3$), possivelmente devido a uma maior influência da formação de

fuligem para essa condição, essa influência não foi observada em condições de combustão pobre em combustível ($\phi=0,7$), onde a temperatura dos gases de exaustão aumentaram com o aumento do percentual de O_2 no oxidante, onde prevaleceu a maior quantidade de energia disponibilizada por uma maior eficiência na combustão.

Figura 29 – Gráfico de contorno de Razão de equivalência x Tensão para: (a) CO; (b) NOx; (c) Temperatura de exaustão.



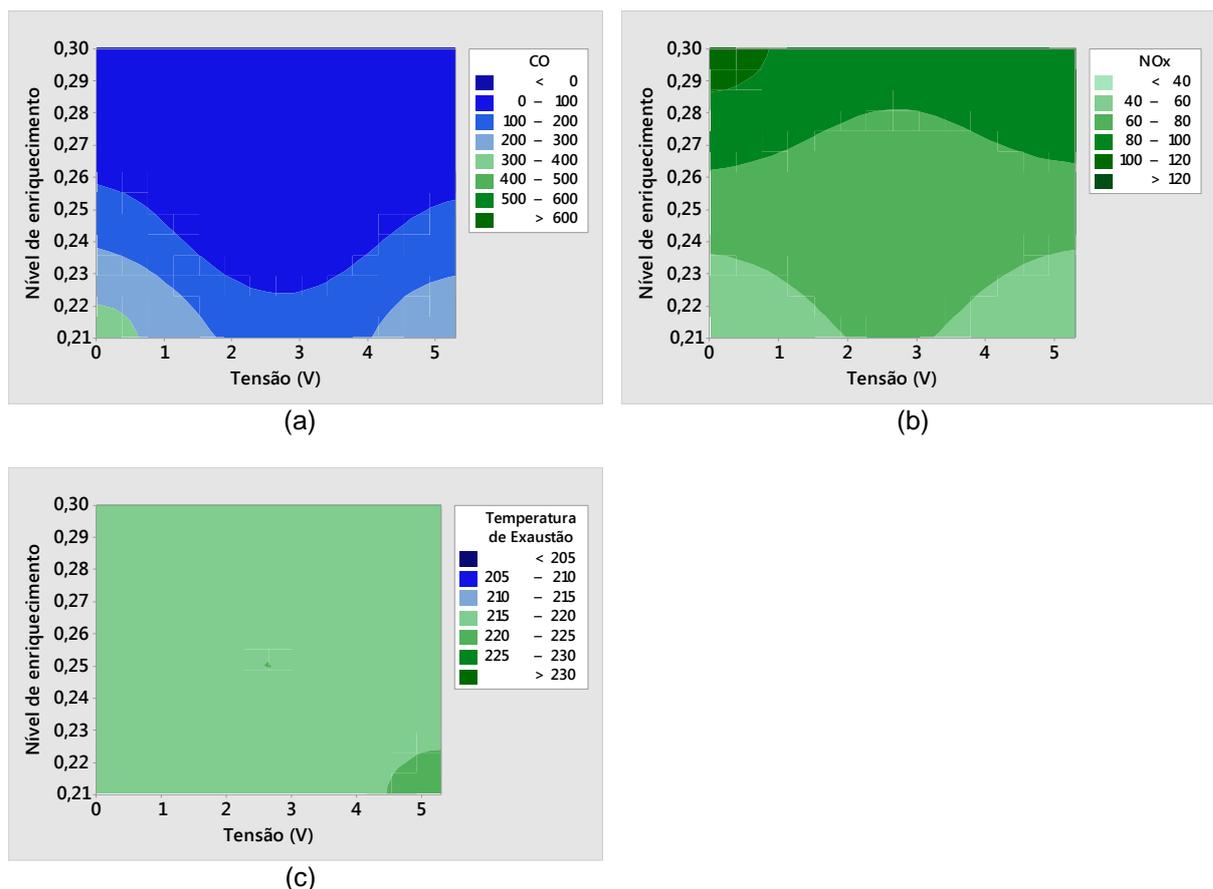
Analisando a Figura 29 (a), observamos que o fator “Tensão no alto-falante” tem maior influência nas concentrações de CO na zona de combustão rica em combustível, onde o aumento nas taxas de mistura entre combustível/oxidante, proporcionada pela excitação sonora, está contribuindo com a redução desse poluente.

A Figura 29 (b), mostra que a inclusão da excitação sonora à combustão, consegue reduzir as concentrações de NOx para regiões de combustão pobre em combustível ($\phi = 0,7$), regiões que apresentam normalmente maiores concentrações desse poluente, devido a uma maior temperatura de chama para essa condição. A

redução pode ser explicada pela equalização da temperatura ao longo da chama, evitando com isso regiões concentradas de elevadas temperaturas, regiões essas que levariam a uma maior formação do NOx térmico.

De maneira geral é possível, pela análise da Figura 29 (c), observar um aumento na temperatura dos gases de exaustão com a inclusão do campo acústico à combustão, principalmente na zona de combustão rica em combustível, devido a melhoria na transferência de calor por convecção na saída dos gases, como também um aumento nas taxas de reações químicas, proporcionada pelo aumento na turbulência média na região da chama, característica da técnica de combustão pulsante, segundo Carvalho (1983) e Carvalho *et al.* (1987).

Figura 30 – Gráfico de contorno de Nível de enriquecimento x Tensão para: (a) CO; (b) NOx; (c) Temperatura de exaustão.



Conforme já observado em gráficos anteriores, o gráfico de contorno apresentado na Figura 30 (a), mostra uma redução nas concentrações de CO para condições sem enriquecimento com oxigênio ($\Omega = 0,21$) com a inclusão da excitação sonora, porém não conseguimos observar no gráfico apresentado as reduções de

CO proporcionada pelo campo acústico em regiões com enriquecimento do oxidante, pelo fato que essas regiões mesmo sem a excitação sonora já apresentam baixos índices de concentração de CO.

Na Figura 30 (b), podemos observar um dos principais efeitos do uso combinado das técnicas de OEC e chama pulsante, que é a possibilidade de redução das concentrações de NOx para chamas enriquecidas com O₂, com a inclusão de excitações sonoras à chama, tal efeito pode ser explicado pela turbulência homogênea em toda a chama, possibilitar uma equalização e uma média de temperatura de chama mais baixa, sendo que o que ocorre com a aplicação da técnica de OEC isoladamente, são regiões da chama com picos extremos de temperatura contribuindo com a formação de NOx térmico.

A Figura 30 (c), apresenta um aumento na temperatura dos gases de exaustão com a inclusão da excitação sonora pra condições se enriquecimento com oxigênio, já evidenciada em gráficos de contorno observados anteriormente.

Para identificação da faixa de otimização da condição de operação do queimador projetado, dentro dos parâmetros de ensaio, foi elaborado os gráficos de contorno (Figura 31), a partir das equações de regressão, relacionando as três variáveis resposta.

Analisando os gráficos da Figura 31 e tomando como objetivo da otimização, minimizar as emissões de CO e NOx, bem como maximizar a temperatura dos gases de exaustão, para que a energia liberada nos gases possa ser utilizada na geração de energia, por exemplo, temos a faixa de CO de 0 -100 apresentada na Figura 30 (a) com bons níveis de NOx e Temperatura de exaustão. A Figura 30 (b) é possível identificar uma faixa concentrada de NOx de 40 – 60 com níveis baixos de CO e razoáveis de temperatura de exaustão, essa mesma faixa também foi identificada na Figura 30 (c), onde é possível observar a faixa de temperatura de exaustão 225 – 230 com baixos níveis de CO e níveis de NOx de 50 – 65.

Partindo do comportamento dos fatores de entrada observados e das faixas de otimização das variáveis resposta, a Tabela 14 apresenta os melhores valores encontrados para os fatores e pela substituição dos mesmos nas equações de regressão, foram encontrados os valores das variáveis resposta.

Figura 31 – Gráfico de contorno para as variáveis resposta: (a) CO em z; (b) NOx em z; (c) Temperatura de exaustão em z.

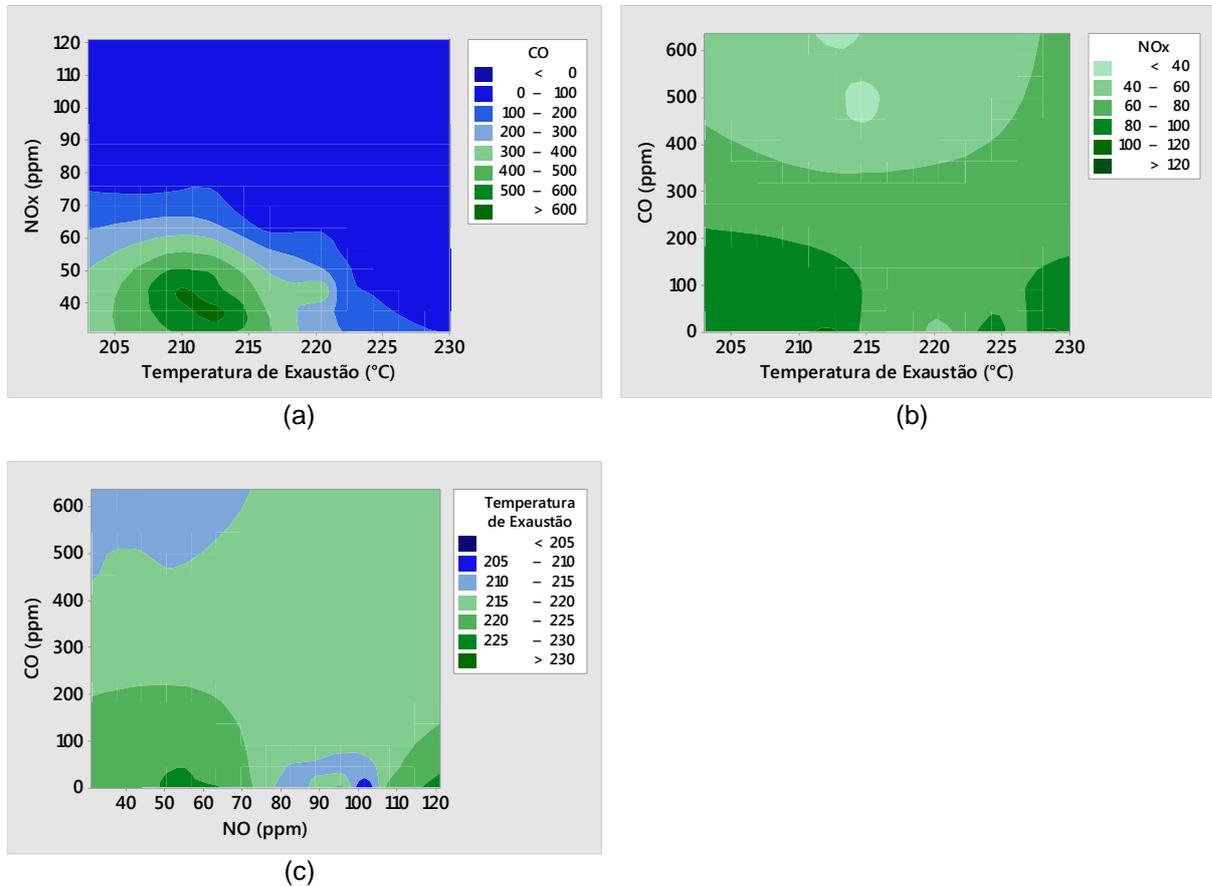


Tabela 14 – Condições operacionais otimizadas para o queimador projetado.

| Razão de equivalência (ϕ) | Tensão (V) | Nível de enriquecimento (Ω) | CO (ppm) | Nox (ppm) | Temperatura de exaustão ($^{\circ}$ C) |
|----------------------------------|------------|--------------------------------------|----------|-----------|---|
| 0,7 | 5,3 | 0,21 | 4,05 | 53,06 | 225,04 |
| 0,7 | 5,3 | 0,22 | 3,75 | 58,86 | 225,34 |
| 0,7 | 5,3 | 0,23 | 3,46 | 65,13 | 225,64 |

4.1 VALIDAÇÃO DO QUEIMADOR EXPERIMENTAL

Para validar o queimador experimental projetado foi realizado ensaios com duas condições otimizadas encontrados a partir do modelo de regressão, a Tabela 15 apresenta os parâmetros de vazão calculados para realização dos testes.

Tabela 15 – Parâmetros para realização dos testes de validação.

| Vazão de combustível = 20,2 L/min | | |
|---|---------------------------------|-----------------------------|
| Razão de equivalência ($\phi = 0,7$) | Vazão do ar atmosférico (L/min) | Vazão oxigênio puro (L/min) |
| Nível de enriquecimento (22%) ($\Omega = 0,22$) | 284,1 | 3,6 |
| Nível de enriquecimento (23%) ($\Omega = 0,23$) | 280,4 | 7,3 |

A Tabela 16 apresenta os valores encontrados para as variáveis resposta nos ensaios de validação, foram realizadas triplicatas das duas condições proposta. Foi calculado os desvios das médias das medições realizadas no experimento com relação aos valores encontrados a partir do modelo de regressão apresentados na Tabela 14. Os baixos desvios encontrados estão de acordo com os valores de R^2 calculado para as equações de regressão, sendo que apenas o desvio para a resposta CO ficou fora da faixa de R^2 da equação de regressão devido a sensibilidade do instrumento de medição utilizado, que não mede na faixa decimal.

Os resultados apresentados validam o queimador experimental projetado e mostram uma boa representatividade do modelo de regressão proposto para as faixas operacionais ensaiadas.

Tabela 16 – Resultado do teste de validação.

| Razão de equivalência (ϕ) | Tensão (V) | Nível de enriquecimento (Ω) | CO (ppm) | Nox (ppm) | Temperatura de exaustão ($^{\circ}\text{C}$) | Média para CO (ppm) | Média para NOx (ppm) | Média para Temperatura de exaustão ($^{\circ}\text{C}$) | Desvio para CO (%) | Desvio para NOx (%) | Desvio para Temperatura de exaustão (%) |
|----------------------------------|------------|--------------------------------------|----------|-----------|--|---------------------|----------------------|---|--------------------|---------------------|---|
| 0,7 | 5,3 | 0,22 | 4 | 54 | 225 | | | | | | |
| 0,7 | 5,3 | 0,22 | 4 | 53 | 226 | 3,67 | 54,67 | 226,33 | 2,222 | 7,124 | 0,439 |
| 0,7 | 5,3 | 0,22 | 3 | 57 | 228 | | | | | | |
| 0,7 | 5,3 | 0,23 | 3 | 64 | 229 | | | | | | |
| 0,7 | 5,3 | 0,23 | 3 | 58 | 227 | 3,33 | 62,33 | 228,67 | 3,661 | 4,294 | 1,324 |
| 0,7 | 5,3 | 0,23 | 4 | 65 | 230 | | | | | | |

4.2 ANÁLISE DE CUSTOS DA IMPLANTAÇÃO DO DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Para a operacionalização dos experimentos no dispositivo utilizado na dissertação, foram levantados os custos de montagem do sistema. Os custos associados decorrem da montagem do queimador e seus acessórios (tubulações, conexões entre outros acessórios), instrumentação de medição de vazão e para a excitação acústica, bem como o equipamento de medição de gases. Na Tabela 17 são apresentados os custos associados ao dispositivo.

Tabela 17 – Composição dos custos associados ao dispositivo experimental.

| | Quantidade | Valor Unitário | Valor Total |
|-----------------------------------|------------|----------------|----------------------|
| HH de soldador e caldeireiro | 160 | R\$ 32,00 | R\$ 5.120,00 |
| Transdutor de pressão | 4 | R\$ 2.400,00 | R\$ 9.600,00 |
| Cabos de interligação | 1 | R\$ 865,00 | R\$ 865,00 |
| Amplificador | 1 | R\$ 13.015,00 | R\$ 13.015,00 |
| Alto-falante 12" 400W de potência | 1 | R\$ 300,00 | R\$ 300,00 |
| Analizador de gases portátil | 1 | R\$ 7.000,00 | R\$ 7.000,00 |
| Rotômetros | 4 | R\$ 1.200,00 | R\$ 4.800,00 |
| | | TOTAL | R\$ 40.700,00 |

Percebe-se que a maior parcela dos custos se dá pela instrumentação aplicada a excitação acústica, totalizando R\$ 23.780,00, o que corresponde a 58% dos custos associados à montagem.

Outra abordagem identificou o custo por unidade de potência do queimador, que trouxe uma referência quantitativa de quanto se dará o gasto para escalonar a montagem de sistemas com esse tipo de aplicação experimental, importante para uma possível aplicação industrial, a partir de plantas piloto e posterior utilização em unidade de produção. A Tabela 18 apresenta os dados encontrados.

Tabela 18 – Composição dos custos associados por unidade de potência.

| | Quantidade | Valor Unitário/KW | Valor Total/KW |
|-----------------------------------|------------|-------------------|---------------------|
| HH de soldador e caldeireiro | 160 | R\$ 2,42 | R\$ 386,71 |
| Transdutor de pressão | 4 | R\$ 181,27 | R\$ 725,08 |
| Cabos de interligação | 1 | R\$ 65,33 | R\$ 65,33 |
| Amplificador | 1 | R\$ 983,01 | R\$ 983,01 |
| Alto-falante 12" 400W de potência | 1 | R\$ 22,66 | R\$ 22,66 |
| Analizador de gases portátil | 1 | R\$ 528,70 | R\$ 528,70 |
| Rotômetros | 4 | R\$ 90,63 | R\$ 362,54 |
| | | TOTAL | R\$ 3.074,02 |

O custo total de implantação do dispositivo ficou em R\$ 3.074,02/kW. Unidades termoelétricas instaladas no Brasil, que utilizam o gás natural, possuem dimensões diversas. Algumas referências podem ser tomadas para uma análise comparativa. No estudo de Braciani (2011), foram analisados os custos de implantação das unidades termoelétricas (UTE) da Baixada Fluminense e Maranhão III, ambas com gás natural, respectivamente com 530 e 499,2 MW.

Os valores do custo de implantação das unidades são de R\$/kW 1.861,00 para a UTE Baixada Fluminense e de R\$/kW 2.204,0 para a UTE Maranhão III. O custo médio da implantação das duas unidades foi de R\$/kW 2.302,50. Comparativamente, percebe-se que o custo de implantação do experimento tem um maior valor. Possivelmente isso se dá por ser uma tecnologia ainda em estudo, sem escala para a redução de custos. Uma possível redução de custos só se dará com a utilização industrial da tecnologia e aumento da escala de utilização.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo avaliar experimentalmente os efeitos do uso simultâneo das técnicas de OEC e da excitação acústica forçada em chamas difusivas e confinadas de gás natural, sobretudo na emissão de poluentes como monóxido de carbono e óxido de nitrogênio e na temperatura dos gases de exaustão da queima. Para tal, foi realizado um experimento com três fatores de entrada: tensão de entrada no alto-falante, nível de enriquecimento e razão de equivalência, variando-se cada uma em dois níveis distintos e medindo a resposta para todas as combinações possíveis destas variáveis. A meta principal foi obter condições operacionais otimizadas, onde se obtivessem baixas emissões de produtos de combustão parcial, como o CO, aliado a redução das emissões de NOx e também aumento nas temperaturas dos gases de exaustão, indicando uma melhor eficiência energética do sistema.

Foi projetado e construído um queimador experimental, com câmara de combustão vertical, reproduzindo uma chama confinada e difusa de gás natural e possuindo sistemas de enriquecimento do oxidante com oxigênio e de excitação sonora. O equipamento foi concebido de forma modular de forma que suas partes podem ser modificadas de maneira que possam ser realizados outros tipos de experimentos.

Foi observado que a chama sem enriquecimento, em condição de combustão rica em combustível, ficava mais instável com a inclusão da excitação sonora forçada, o que limitou muito a faixa de tensão utilizada no experimento, e que esta instabilidade era controlada com o enriquecimento do oxidante com O₂. A instabilidade em chamas difusas pode levar a perdas de eficiência e até mesmo a extinção da chama.

As respostas do experimento se comportaram de forma uniforme havendo baixa variação entre os valores que foram obtidos. A modelagem dos dados das variáveis resposta, tiveram valores de R² superiores a 88%, o que representa uma boa confiabilidade dos modelos encontrados.

Foi possível observar uma tendência geral de redução nas emissões de CO com o enriquecimento do oxidante com O₂ e também em algumas condições com

chama excitada acusticamente. Foi possível identificar uma redução das concentrações de NO_x para chamas enriquecidas com O₂, com a inclusão de excitações sonoras à chama. Ficou evidenciado também o comportamento antagônico da concentração de NO_x com a de CO, onde em condições de operação com redução de monóxido de carbono havia aumento de óxido de nitrogênio. Tal comportamento revela a importância de encontrar-se uma condição de trabalho para dispositivos de combustão, onde se tenha emissões otimizadas de poluentes.

As condições de operação otimizadas encontradas para o dispositivo experimental, mostram que as técnicas de OEC e combustão pulsante aplicadas em conjunto e de forma controlada podem trazer ganhos para redução nas emissões de poluentes e aumento na eficiência de equipamentos térmicos a combustão.

Os valores encontrados nos testes validam, para os limites dos fatores analisados, o queimador projetado e o modelo de regressão calculado, indicando boa representatividade com o fenômeno físico estudado.

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, além de apresentarem uma possibilidade de redução de custos operacionais em queimadores industriais, para aplicações com baixos níveis de enriquecimento, devido ao custo reduzido com a utilização do O₂ puro utilizado no enriquecimento do oxidante.

5.1 DIVULGAÇÃO DA PESQUISA

PEREIRA, A, R, B; SANTOS, A, A, B; FILHO, M, C, L, M, **Desenvolvimento de protótipo experimental para o estudo da correlação da OEC e excitação acústica em chamas confinadas de gás natural**, 9º Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2016

PEREIRA, A, R, B; SANTOS, A, A, B; NEVES, P, R, F, **Dispositivo de combustão de gás natural para o controle das correlações entre radiação térmica, formação da fuligem, CO e NO_x com a utilização das técnicas de combustão enriquecida com oxigênio e combustão pulsante**, Pedido nacional de invenção, modelo de utilidade, certificado de adição de invenção e entrada na fase nacional do PCT, número do processo: BR 10 2016 022901 4

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O queimador experimental apresentado pode ser usado para realizar pesquisas com outros tipos de combustíveis gasosos, bem como, outras configurações de queimadores e de câmaras de combustão, devido à 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.

Como proposta para trabalhos futuros, além das modificações possíveis no dispositivo experimental, recomenda-se estudos semelhantes ao aqui realizado, porém avaliando outras variáveis respostas importantes como radiação térmica, fuligem, comprimento de chama, formaldeído e acetaldeído.

É possível também implementar a automatização do queimador, de modo que as vazões de entrada de combustível, ar e oxigênio sejam ajustadas automaticamente com a leitura dos gases de exaustão. Para uso do queimador experimental em equipamentos de produção na indústria, essa automação seria necessária.

REFERÊNCIAS

- ANDERSSON, K.; JOHANSSON, R.; JOHNSON, F.; LECKNER, Bo. **Radiation Intensity of Propane-Fired Oxy-Fuel Flames: Implications for Soot Formation.** Energy and Fuels, v. 22, p. 1535-1541, 2008.
- BASKAR, P.; SENTHILKUMAR, A. **Effects of oxygen enriched combustion on pollution and performance characteristics of a diesel engine,** Engineering Science and Technology, v. 19, p. 438-443, 2016.
- BAUKAL, Jr, C. E; GEBHART, B. **Oxygen-Enhanced natural gas flame radiation.** Heat Mass Transfer, v. 40, p. 2539-2547, 1997.
- BAUKAL, Jr., C. E. **Oxygen-Enhanced Combustion.** 1a ed. New York: CRC Press, 1998.
- BELOHRADSKÝ, P; SKRYJA, P; HUDÁK, I. **Experimental study on the influence of oxygen content in the combustion air on the combustion characteristics.** Energy, v. 75, p. 116-126, 2014.
- BRACIANI, U. **Estrutura de custos para implantação das usinas de geração de energia elétrica no Brasil.** Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Ciências Econômicas) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.
- CARDU M.; BAICA M. **Regarding the Relation Between the NOx Content and CO Content in Thermo Power Plants Flue Gases.** Energy Conversion and Management, v. 46, p. 47-59, 2005.
- CARVALHO Jr., J.A. **Investigation of the characteristics of a coal burning Rijke type pulsating combustor.** Atlanta, GA. Thesis (Doctoral Thesis in Science) – Institute of Technology, Georgia, 1983.
- CARVALHO Jr., J.A; LACAVALA, P. T. **Emissões em processos de combustão.** São Paulo: Editora UNESP, 2003.
- CARVALHO Jr., J.A; MCQUAY. M. Q. **Princípios de combustão aplicada.** Florianópolis: Editora da UFSC, 2007.
- CARVALHO Jr.,J.A.; MILLER, N.; DANIEL B.R.; ZINN B.T. **Combustion characteristics of unpulverized coal under pulsating and non pulsating conditions.** Fuel, v. 66, n. 1, p. 4-8, 1987.
- CHAO, Y. C.; YUAN, T.; TSENG, C. S. **Effects of flame lifting and acoustic excitation on the reduction of NOx emissions.** Combustion Science Technology, p. 113-114, 1996.
- CHAO, Y. C; MING-SHAN, J. **Behavior of the lifted jet flame under acoustic excitation,** Symposium (Int.) Combustion, v. 24, p. 333-340, 1992.

CHIGIER, N. A. **Pollution Formation and Destruction in Flame**. Progress in Energy and Combustion Science, Oxford Pergamon Press, v. 1, p. 264, 1976.

COHEN, H.; ROGERS, G. F. C.; SARAVANAMUTTOO, H. I. H. **Gas Turbine Theory**, Addison Wesley, 1996.

DEMARE, D.; BAILLOT, F. **Acoustic enhancement of combustion in lifted non premixed jet flames**, Combustion Flame, v. 139, p. 312-328, 2004.

FARHAT, S.; KLEINER, D.; ZHANG, Y. **Jet diffusion flame characteristics in a loudspeaker-induced standing wave**. Combustion Flame, v. 142, p. 317-323, 2005.

FENIMORE, C. P. **Formation of Nitric Oxide in Premixed Hydrocarbon Flames**, Progress Of the Thirteenth Symposium (International) on Combustion, p.373-380, 1971.

FERREIRA, D.S. **Queimadores pulsantes para baixas emissões de poluentes**. Dissertação (Mestrado em Transmissão e Conversão de Energia) - UNESP, Guaratinguetá, 2001.

FOO, K, K; SUN, Z; MEDWELL, P, R; ALWAHABI, Z, T; DALLY, B, B; NATHAN, G, J. **Experimental investigation of acoustic forcing on temperature, soot volume fraction and primary particle diameter in non-premixed laminar flames**, Combustion and Flame, v. 181, p. 270–282, 2017.

GLASSMAN, I, YETTER, R. A. **Combustion**. 4 ed. New York: Academic Press Inc., 2008.

HILL, S. C.; SMOOT, D. L. **Modeling of Nitrogen Oxides Formation and Destruction in Combustion Systems**. Progress in Energy and Combustion Science. v. 26, p. 417–458, 2000.

HORBANIUC, B; MARIN, O; DUMITRASCU, G; CHARON, O. **Oxygen-Enriched Combustion in supercritical steam**, Energy, v. 29, p. 427-448, 2004.

HU, Y.; NAITO, S.; KOBAYASHI, N.; HASATANI, M. **CO₂, NO_x and SO₂ emissions from the combustion of coal with high oxygen concentration gases**. Fuel, v. 79, p. 1925-1932, 2000.

JEONGSEOG, O; EUNGYEONG, L; DONGSOON, N. **Development of an oxygen-enhanced combustor for scrap preheating in an electric arc furnace**, Applied Thermal Engineering, v. 91, p. 749-758, 2015.

JOCHER, A; FOO, K, K; SUN, Z; DALLY, B; PITSCH, H; ALWAHABI, Z; NATHAN, G. **Impact of acoustic forcing on soot evolution and temperature in ethylene-air flames**, Proceedings of the Combustion Institute, v. 36, p. 781–788, 2017.

KIM, M.; CHOI, Y.; OH, J.; YOON, Y. **Flame-vortex interaction and mixing behaviors of turbulent non-premixed jet flames under acoustic forcing**. Combustion Flame, v. 156, p. 2252-2263, 2009.

KOBAYASHI, H. **Oxygen enriched combustion system performance study: Phase 1, Interim/final report: Volume 1, Technical and economic analysis;** DOE/ID/12597-1; 1987.

KUO, K.K. **Principles of combustion.** New York: John Wiley, 1986.

LACAVA, P.T. **Investigação Experimental do Enriquecimento do Ar na Incineração de Resíduos Aquosos.** Tese (Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica na Área de Aerodinâmica, Propulsão e Energia) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2000.

LORD Rayleigh. **The theory of sound.** New York, Dover, p. 224-235, 1945.

LOVETT, J. A.; TURNS, S. R. **Structure of pulsed turbulent nonpremixed jet flames.** Combustion Science Technology, v. 94, p. 193-217, 1993.

LUO, S. Y; XIAO, B; HU, Z. Q; LIU, S. M; GUAN, Y. W. **Experimental study on Oxygen-Enriched Combustion of biomass micro fuel,** Energy, v. 34, p. 1880-1884, 2009.

MARTINS, C.A. **Taxas de NOx em combustor pulsante tipo tubo de Rijke operando com combustível gasoso.** Dissertação (Mestrado em Combustão e Propulsão) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1998.

MONTGOMERY, D.C. **Design and Analysis of Experiments.** 8 ed. 752 p, New York: John Wiley, 2012.

MORAN, M.J; SHAPIRO, H.N. **Princípios de termodinâmica para engenharia.** 4. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

MURPHY, J. J; SADDIX, C. R, **Combustion kinetics of coal chars in Oxygen-Enriched environments.** Combustion and Flame, v. 144, p. 710-729, 2005.

PAPADOPOULOS, T.; PRITCHARD, M.; GREEN, C.; ZHANG, Y. **Flame Patterns of Acoustic Wave and Flame Interaction in a Cylindrical Tube,** Journal Visualization, v. 4, p. 179-184, 2001.

RAUN, R. L.; BECKSTEAD, M. W.; FINLINSON, J. C.; BROOKS, K. P. **A review of Rijke tubes, Rijke burners and related devices.** Energy Combustion Science, v. 19, p. 313-364, 1993.

RICHARDS, G.A.; MCMILLIAN, M. M.; GEMMEN, R. S.; ROGERS, W. A.; CULLY, S. R. **Issues for Low-emission, Fuel-flexible Power Systems.** Energy and Combustion Science, v. 27, p. 141–169, 2001.

SAITO, M.; SATO, M.; NISHIMURA, A. **Soot suppression by acoustic oscillated combustion.** Fuel, v. 77, p. 973-978, 1998.

SANTOS, A.A.B.; GOLDSTEIN, Jr., L.; FERRARI, C.A. **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, v. 36, p. 445-450, 2009.

SANTOS, A.A.B. **Investigação do uso da combustão enriquecida com O₂ em chamas confinadas de gás natural**. Tese (Doutorado em energia e ambiente) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2010.

SCHNEIDER, C.; DREIZLER, A.; JANICKA, J.; HASSEL, E. P. **Flow field measurements of stable and locally extinguishing hydrocarbon-fuelled jet flames**. Combustion and Flames, v. 135, p. 185-190, 2003.

STAMBULEANU, A. **Flame combustion processes in industry**. Abacus Press, 1976.

TAN, Y.; DOUGLAS, M. A.; THAMBIMUTHU, V. **CO₂ capture using Oxygen-Enhanced Combustion strategies for natural gas power plants**. Fuel, v. 81, p. 1007-1016, 2002.

TOONG, T. Y.; RICHARD S. F.; JOHN, S. M.; GRIFFIN, A. Y. **Mechanisms of combustion instability**. Symposium (International) Combustion. v. 10, p. 1301-1313, 1965.

TORRES, E. A.; VICTÓRIO, J. R. S.; FERREIRA, M. A.; CARVALHO Jr, J. A. **Pulsating combustion of palm oil fruit bark**, Fuel, v. 71, p. 257-261, 1992.

URNS, S. R. **An Introduction to Combustion**. McGraw-Hill, 1996.

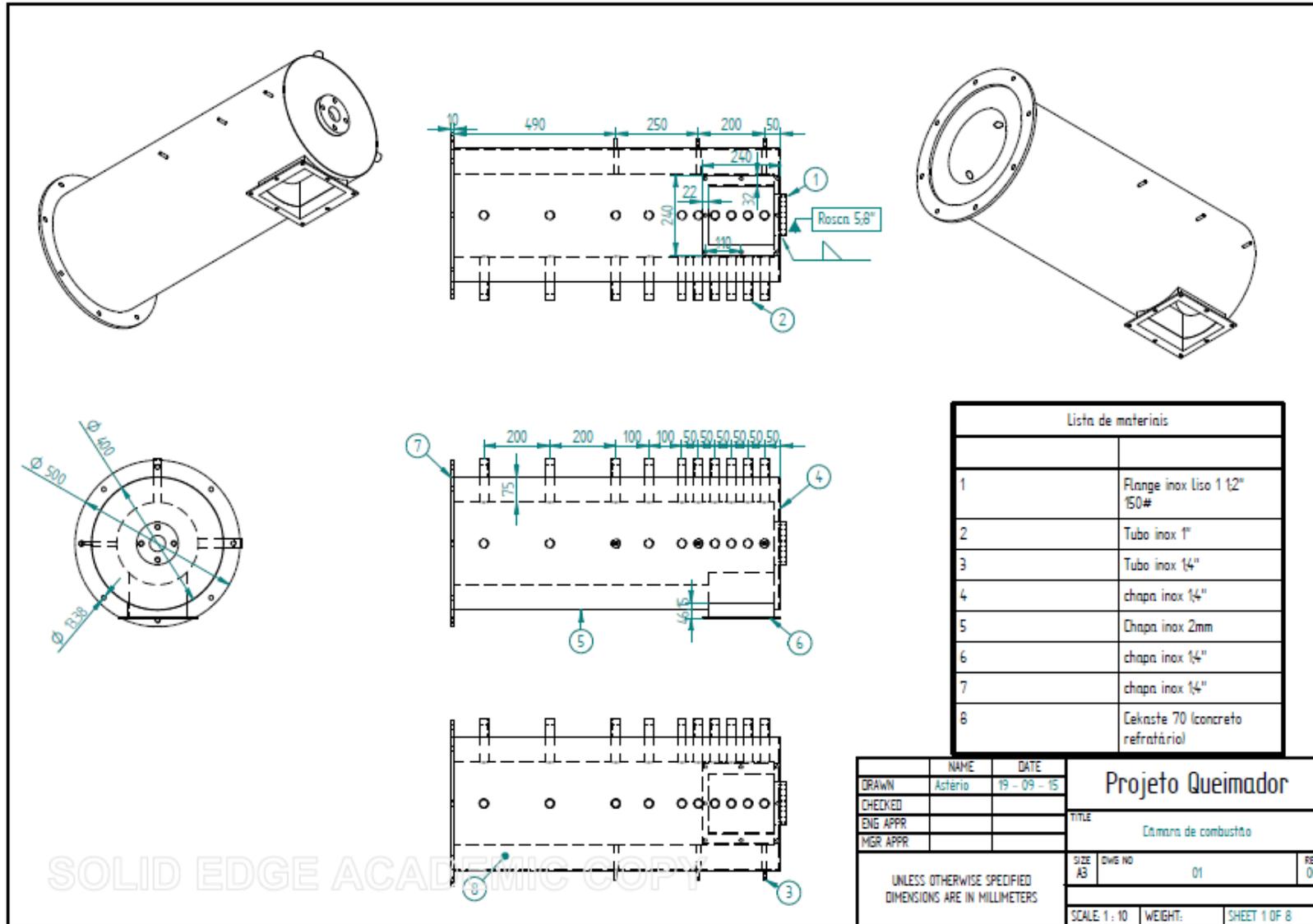
TYNDALL, J. **Sound**, Physical Sciences, v. 30, p. 231-257, 1970.

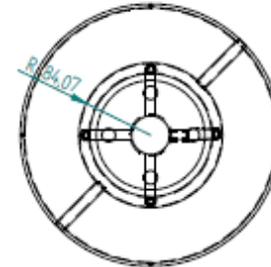
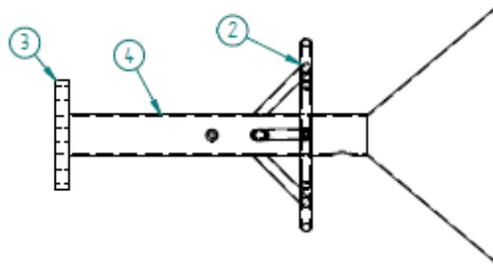
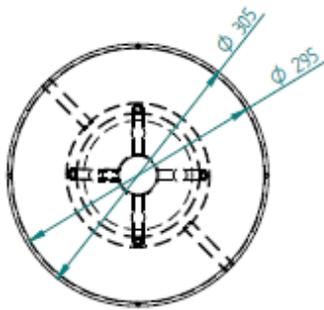
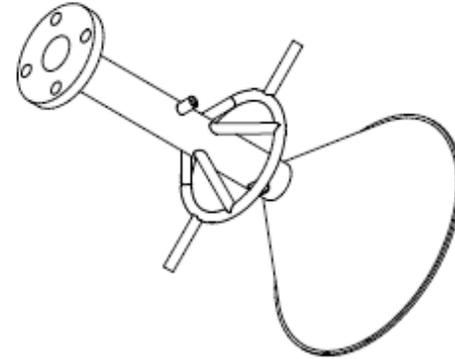
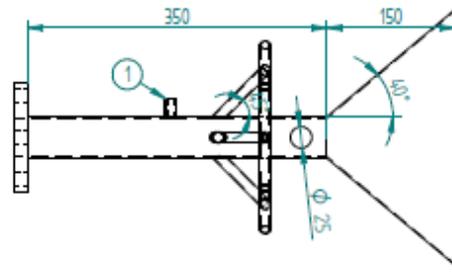
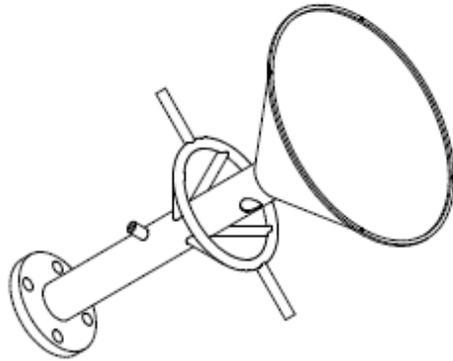
WILLIAMS, S. J.; CUERVO, L. A.; CHAPMAN, M. A. **High-Temperature Industrial Process Heating: Oxygen-Gas Combustion and Plasma Heating Systems**; Gas Research Institute: Chicago, 1989.

WU, K.; CHANG, Y.; CHEN, C.; CHEN, Y. **High-efficiency combustion of natural gas with 21-30% Oxygen-enriched air**. Fuel, v. 89, p. 2455-2462, 2010.

ZINN, B.T. **Pulsating combustion**. London: Academic Press, p. 113-18, 1986.

ANEXO 1 – PROJETO EM CAD DO QUEIMADOR

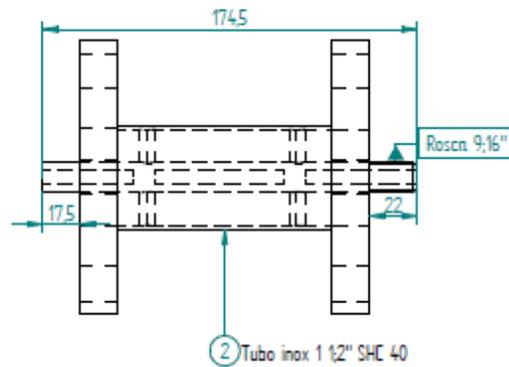
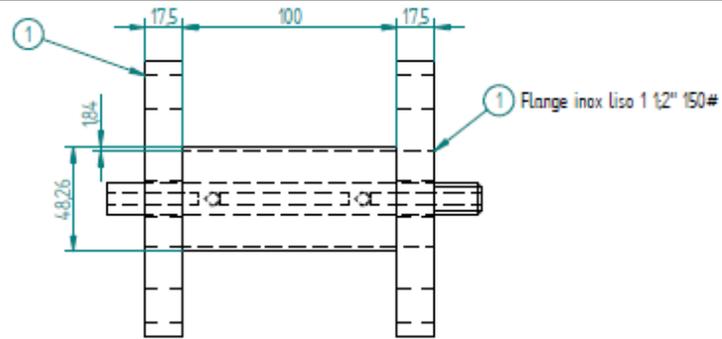
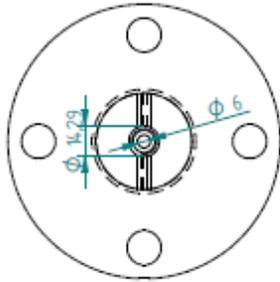
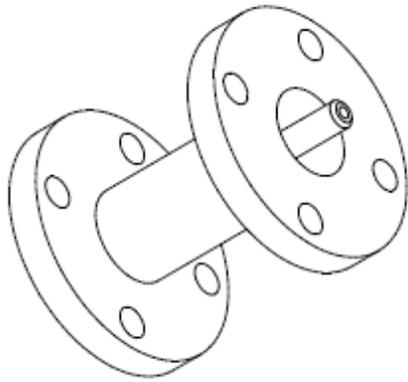




| Lista de peças | |
|----------------|------------------------------|
| 1 | Tubo inox 1/4" |
| 2 | Tubo inox 1/2" |
| 3 | Flange inox Liso 1 1/2" 150# |
| 4 | Tubo inox 1 1/2" SHC 40 |

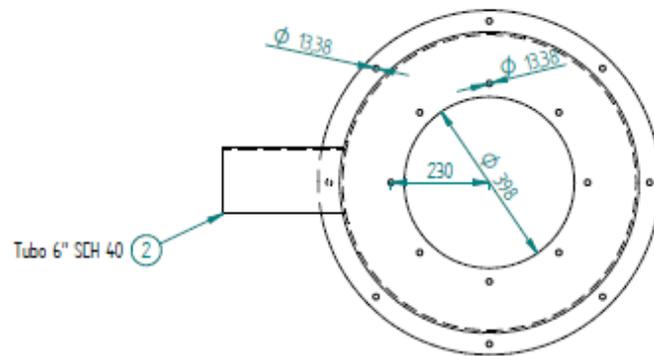
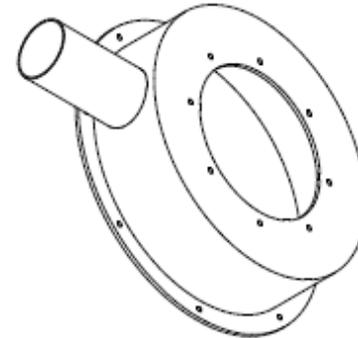
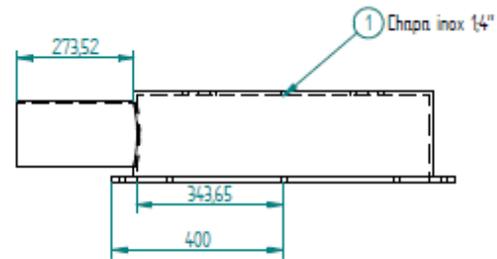
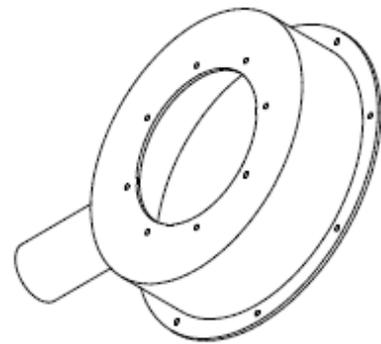
| | NAME | DATE | Projeto Queimador | | |
|---|---------|----------|-----------------------------|---------|--------------|
| DRAWN | Asterio | 09/19/15 | TITLE | | |
| CHECKED | | | Entrada de ar - combustível | | |
| ENG APPR | | | SIZE | DWG NO | REV |
| MGR APPR | | | A3 | | 00 |
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS | | | SCALE: 1 : 5 | WEIGHT: | SHEET 3 OF 8 |

SOLID EDGE ACADEMIC COPY



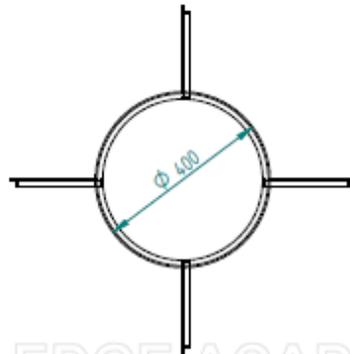
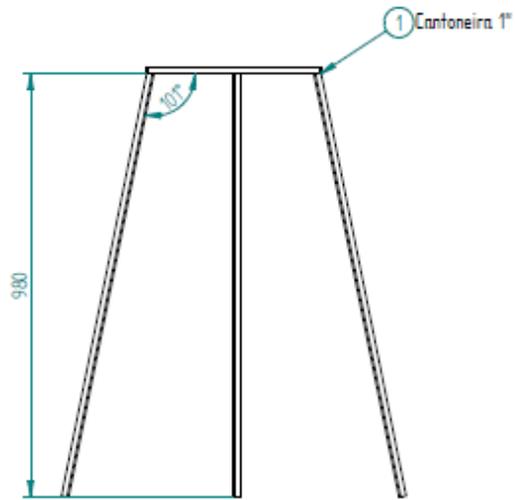
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

| | NAME | DATE | Projeto Queimador | | |
|---|---------|--------------|-------------------|---------|--------------|
| DRAWN | Asterio | 19 - 09 - 15 | TITLE | | |
| CHECKED | | | Injetor de gás | | |
| ENG APPR | | | SIZE | DWG NO | REV |
| MGR APPR | | | A3 | 02 | 00 |
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS | | | SCALE 1 : 2 | WEIGHT: | SHEET 1 OF 8 |



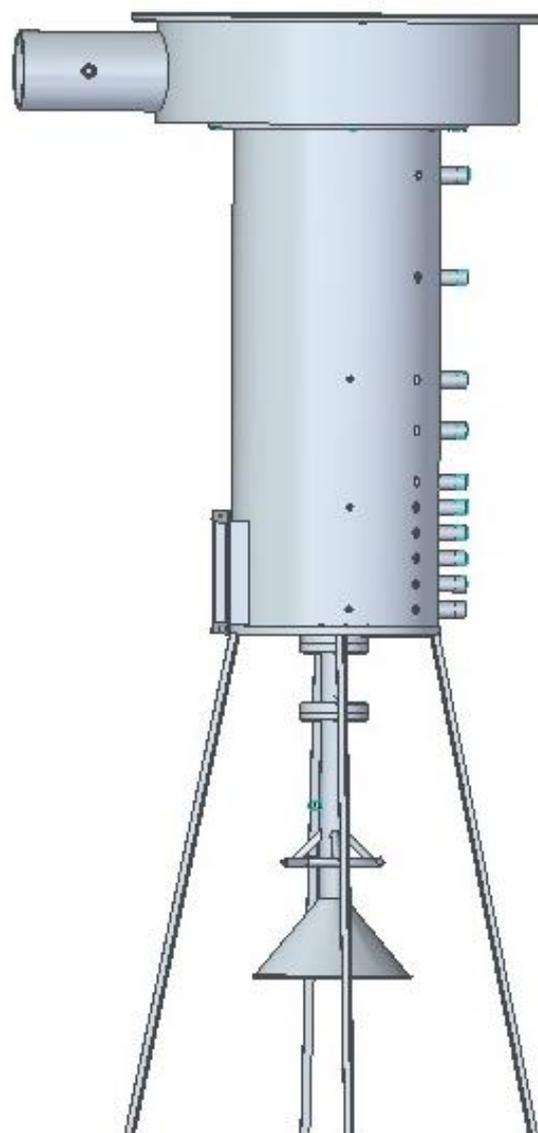
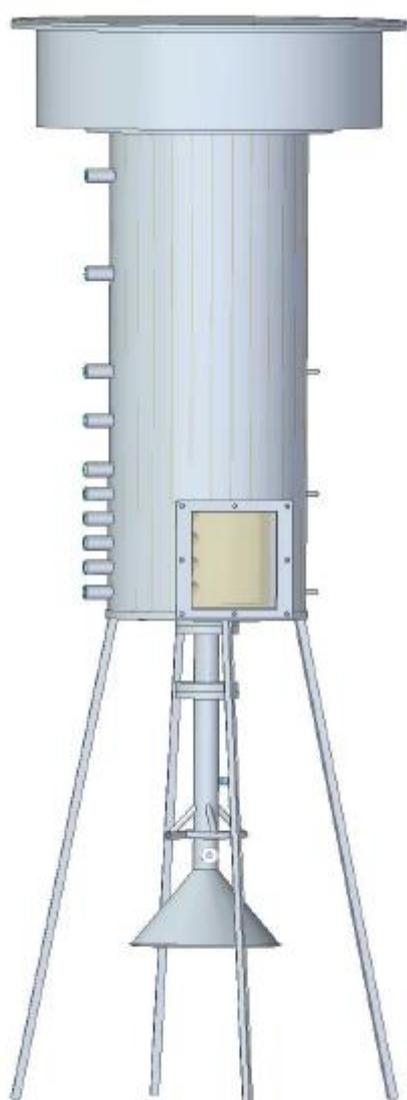
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

| | NAME | DATE | Projeto Queimador | | |
|---|---------|--------------|-------------------|---------|--------------|
| DRAWN | Asterio | 19 - 09 - 15 | TITLE | | |
| CHECKED | | | Chaminé | | |
| ENG APPR | | | SIZE | DWG NO | REV |
| MGR APPR | | | A3 | 04 | 00 |
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS | | | SCALE: 1 : 10 | WEIGHT: | SHEET 4 OF 8 |



SOLID EDGE ACADEMIC COPY

| | NAME | DATE | Projeto Queimador | | |
|---|---------|--------------|-------------------|---------|--------------|
| DRAWN | Asterio | 19 - 09 - 15 | TITLE | | |
| CHECKED | | | Suporte | | |
| ENG APPR | | | SIZE | DWG NO | REV |
| MGR APPR | | | A3 | 09 | 00 |
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS | | | SCALE: 1 : 10 | WEIGHT: | SHEET 1 OF 1 |



ANEXO 2 – CÁLCULOS DOS PARAMETROS DO EXPERIMENTO

Considerando os dados de projeto do queimador e do gás natural temos:

$$D := 6.0 \text{ mm} \quad \rho := 0.62 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \mu := 0.010816 \cdot 10^{-2} \text{ poise}$$

Onde:

D = Diâmetro do saída do gás natural;

ρ = Massa específica do gás natural;

μ = Viscosidade dinâmica do gás natural.

Onde temos o cálculo da área de saída do gás natural (A):

$$A := \pi \cdot \frac{D^2}{4} = (2.827 \cdot 10^{-5}) \text{ m}^2$$

Como é desejado que o sistema esteja em transição entre turbulento e laminar, foi considerado Reynolds igual a 4100:

$$Re := 4100$$

$$V := \frac{Re \cdot \mu}{D \cdot \rho} \quad V = 11.921 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Onde "V" é a velocidade de saída do gás natural.

A partir desta velocidade podemos calcular a vazão volumétrica de combustível:

$$v_{\text{vol}} := V \cdot A = 20.223 \frac{\text{l}}{\text{min}}$$

Cálculo a razão ar/combustível estequiométrico:

Para o ar não enriquecido (considerando o ar constituído por 79% de nitrogênio e 21% de oxigênio):

$$Ar_{21} := \frac{(2.09225 \cdot 4.76)}{0.8882 + 0.0841 + 0.0055 + 0.0162 + 0.006} = 9.959$$

Ar enriquecido 25% (considerando que a vazão de oxidante terá em sua constituição 75% de nitrogênio e 25% de oxigênio):

$$Ar_{25} := \frac{2.10425 + (2.10425 \cdot 3)}{0.8882 + 0.0841 + 0.0055 + 0.0162 + 0.006} = 8.417$$

Ar enriquecido 30% (considerando que a vazão de oxidante terá em sua constituição 70% de nitrogênio e 30% de oxigênio):

$$Ar_{30} := \frac{2.10425 + (2.10425 \cdot 2.33333)}{0.8882 + 0.0841 + 0.0055 + 0.0162 + 0.006} = 7.014$$

O estudo leva em conta três diferentes condições, uma condição de não enriquecimento para o ar, condição de enriquecimento de 4% em relação a taxa inicial, e enriquecimento de 9%. Logo, utilizou-se uma fórmula geral para calcular qual a vazão volumétrica que deve ser inserida no sistema para chegar as taxas desejadas de oxigênio no oxidante. Logo temos:

$$V_{OxiENR} := \left(\left(\frac{T_{xENR}}{0.79} \right) \cdot (AC_{real} \cdot v_{vol}) \right)$$

Onde:

T_{xENR} --> Condição de enriquecimento em relação a taxa de oxigênio inicial (considerando 21% a taxa inicial, temos condição de enriquecimento de 0.04, e 0.09);

0.79 --> Teor de Nitrogênio em relação ao ar atmosférico;

$AC_{real} \cdot v_{vol}$ --> Vazão volumétrica de oxidante;

V_{OxiENR} --> Vazão de Oxigênio puro que resultará no enriquecimento proposto

Cálculo da vazão ar/combustível real:

$\phi = 1$ --> Razão de equivalência

$$AC_{real} := \frac{Ar_{21}}{\phi} = 9.959$$

$$AC_{real} \cdot v_{vol} = 201.406 \frac{l}{min} \text{ Vazão de oxidante (ar+oxigênio)}$$

Para uma condição de 21% de oxigênio no oxidante, ou seja, sem enriquecimento, a vazão volumétrica do oxidante será 201,406 l/min.

Para uma condição de 25% de oxigênio no oxidante, tem-se uma taxa de enriquecimento igual a 0,04, pois $tx = (0.25 - 0.21) / 100$

$$T_{xENR} := 0.04$$

$$V_{OxiENR} := \left(\left(\frac{T_{xENR}}{0.79} \right) \cdot (AC_{real} \cdot v_{vol}) \right) \quad \rightarrow \quad V_{OxiENR} = 10.198 \frac{l}{min}$$

Para uma condição de 30% de oxigênio no oxidante, tem-se uma taxa de enriquecimento igual a 0,09, pois $t_x = (0.30 - 0.21) / 100$

$$T_{xENR} := 0.09$$

$$V_{OxiENR} := \left(\left(\frac{T_{xENR}}{0.79} \right) \cdot (AC_{real} \cdot v_{vol}) \right) \rightarrow V_{OxiENR} = 22.945 \frac{l}{min}$$

Cálculo da razão ar/combustível real modificando a razão de equivalência:

$$AC_{real} := \frac{Ar_{21}}{\phi} = 7.661$$

$$\phi := 1.3 \rightarrow \text{Razão de equivalência}$$

$$AC_{real} \cdot v_{vol} = 154.927 \frac{l}{min} \text{ Vazão de oxidante (ar+oxigênio)}$$

Para uma condição de 21% de oxigênio no oxidante, ou seja, sem enriquecimento, a vazão volumétrica do oxidante será 154,927 l/min.

Para uma condição de 25% de oxigênio no oxidante, tem-se uma taxa de enriquecimento igual a 0,04, pois $t_x = (0.25 - 0.21) / 100$

$$T_{xENR} := 0.04$$

$$V_{OxiENR} := \left(\left(\frac{T_{xENR}}{0.79} \right) \cdot (AC_{real} \cdot v_{vol}) \right) \rightarrow V_{OxiENR} = 7.844 \frac{l}{min}$$

Para uma condição de 30% de oxigênio no oxidante, tem-se uma taxa de enriquecimento igual a 0,09, pois $t_x = (0.30 - 0.21) / 100$

$$T_{xENR} := 0.09$$

$$V_{OxiENR} := \left(\left(\frac{T_{xENR}}{0.79} \right) \cdot (AC_{real} \cdot v_{vol}) \right) \rightarrow V_{OxiENR} = 17.65 \frac{l}{min}$$

Cálculo da razão ar/combustível real modificando a razão de equivalência:

$$AC_{real} := \frac{Ar_{21}}{\phi} = 14.227$$

$\phi := 0.7$ --> Razão de equivalência

$$AC_{real} \cdot v_{vol} = 287.722 \frac{l}{min} \quad \text{Vazão de oxidante (ar+oxigênio)}$$

Para uma condição de 21% de oxigênio no oxidante, ou seja, sem enriquecimento, a vazão volumétrica do oxidante será 287,722 l/min.

Para uma condição de 23% de oxigênio no oxidante, tem-se uma taxa de enriquecimento igual a 0,02, pois $tx = (0.23 - 0.21)/100$

$$T_{xENR} := 0.02$$

$$V_{OxiENR} := \left(\left(\frac{T_{xENR}}{0.79} \right) \cdot (AC_{real} \cdot v_{vol}) \right) \quad \rightarrow \quad V_{OxiENR} = 7.284 \frac{l}{min}$$

Para uma condição de 30% de oxigênio no oxidante, tem-se uma taxa de enriquecimento igual a 0,09, pois $tx = (0.30 - 0.21)/100$

$$T_{xENR} := 0.09$$

$$V_{OxiENR} := \left(\left(\frac{T_{xENR}}{0.79} \right) \cdot (AC_{real} \cdot v_{vol}) \right) \quad \rightarrow \quad V_{OxiENR} = 32.779 \frac{l}{min}$$