



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-9875-TDI/871

**ANÁLISE EXPERIMENTAL EM CHAMAS DIFUSIVAS
PULSADAS DE GÁS NATURAL**

Ana Maura Araujo Rocha

Dissertação de Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Combustão e Propulsão, orientada pelo Dr. João Andrade de Carvalho Júnior, aprovada em 29 de agosto de 2002.

INPE
São José dos Campos
2003

541.126

ROCHA, A. M. A.

Análise experimental em chamas difusivas pulsadas de gás natural / A. M. R. Araujo. – São José dos Campos: INPE, 2002.

118p. – (INPE-9875-TDI/871).

1.Chamas difusivas. 2.Combustão. 3.Eficiência da combustão. 4.Efeitos termoacústicos. 6.Razão ar-combustível.

I.Título

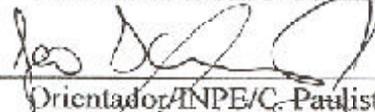
Aprovada pela Banca Examinadora em
cumprimento a requisito exigido para a
obtenção do Título de Mestre em
Engenharia e Tecnologia
Espaciais/Combustão e Propulsão.

Dr. Demétrio Bastos Netto



Presidente/INPE/C. Paulista-SP

Dr. João Andrade de Carvalho Jr.



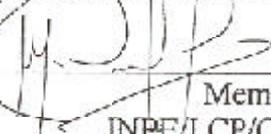
Orientador/INPE/C. Paulista-SP

Dr. Pedro Teixeira Lacava



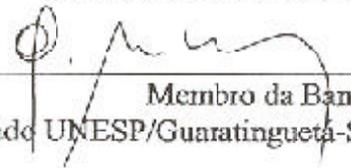
Co-orientador/ITA/SJCampos-SP

Dr. Marco Aurélio Ferreira



Membro da Banca
INPE/LCP/C. Paulista-SP

Dr. Paulo Magalhães Filho



Membro da Banca
Convidado UNESP/Guaratingueta-SP

Candidata: Ana Maura Araújo Rocha

São José dos Campos, 29 de agosto de 2002.

Em homenagem
ao meu querido pai,
dedico este trabalho,
e à minha mãe
pelo constante incentivo.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. João Andrade de Carvalho Júnior, meu orientador, e ao meu co-orientador Dr. Pedro Teixeira Lacava, que despertaram em mim o espírito científico, obrigada pelo apoio nos momentos de dificuldades pessoais e profissionais, pela paciência, pelos ensinamentos e pela constante disponibilidade em me ajudar.

Ao Dr. Marco Aurélio Ferreira, pela orientação técnica imprescindível à realização deste trabalho.

Aos meus professores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e ao professor Márcio Teixeira de Mendonça (CTA/IAE), que com seus ensinamentos formaram a base para o desenvolvimento desse trabalho de pesquisa.

À toda a equipe do Laboratório Associado de Combustão e Propulsão (LCP), que tornou possível a elaboração e execução deste trabalho, em especial aos amigos Adilson Nakano, Aureliano, Carlos Alberto (Kalú), César Botura, Cristiane Martins, Daniel Ferreira, Francisco Carlos (Chico), José Roberto (Soró) e José Carlos.

Ao Sr. Otávio, Maria Aparecida, e Maria Ignês pela constante ajuda.

RESUMO

Apesar de todas as pesquisas já realizadas em combustão pulsante, não se conhecem todos os parâmetros que envolvem a otimização desse processo para utilização em grande escala, que conciliem com essa técnica baixas emissões de CO e NO_x. Através da queima difusiva de gás natural e ar, este trabalho apresenta um estudo sobre a eficiência das pulsações acústicas sobre o processo de combustão, mediante a comparação entre os poluentes emitidos com e sem atuação acústica, tendo como meta principal a obtenção das condições de trabalho adequadas, ou seja, uma combinação de frequências, amplitudes de pressão e razões de equivalência que permitam obter a emissão de baixas concentrações de compostos de oxidação parcial como o CO, associadas à redução nas emissões de NO_x. Os resultados encontrados mostram que a conciliação da emissão de poluentes é possível para alguns regimes específicos de atuação acústica e razão combustível/oxidante.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL ANALYSIS IN PULSATING DIFFUSION FLAMES OF NATURAL GAS

In spite of the amount of research already conducted in pulse combustion, not all parameters involving its optimization process are fully known for utilization in large scale, in applications that utilize the process with low CO and NO_x emissions. This dissertation presents a study on the efficiency of acoustic pulsations in the combustion process of natural gas with air, by comparing the pollutants emission with and without acoustic actuation. The main goal was to obtain adequate work conditions regarding frequencies, pressure amplitudes and equivalence ratios that result in low CO and NO_x concentrations. It was found that low pollutants emission is possible in some specific regimes of acoustic actuation and fuel air ratios.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	21
1.1 – Histórico da Combustão Pulsante	21
1.2 – Poluentes Gasosos Atmosféricos	28
1.3 – Gás Natural	34
1.4 – Objetivos do Trabalho	41
CAPÍTULO 2 – ARRANJO EXPERIMENTAL.	43
2.1 – Combustor e Queimador	43
2.2 – Injetor de Gás	46
2.3 – Combustível e Oxidante	49
2.3.1 – Testes Preliminares para Escolha das Condições de Trabalho	50
2.4 – Sistema de Atuação Acústica	53
2.5 – Medidas de Vazão e Temperatura	54
2.6 – Gases da Exaustão	56
2.7 – Sistema de Aquisição de Dados	59
2.8 – Cálculo do Número de Reynolds	61

CAPÍTULO 3 – RESULTADOS E COMENTÁRIOS	65
3.1 – Análise do Conjunto Queimador – Sistema de Atuação Acústica – Câmara de Combustão	65
3.2 – Emissão de Gases	79
3.2.1 – Emissões para $f = 1,00$	80
3.2.2 – Combustão com Excesso de Oxidante entre $f = 0,89$ e $f = 0,59$	83
3.2.3 – Combustão com Excesso de Oxidante entre $f = 0,49$ e $f = 0,30$	91
3.3 – Comparação entre as Emissões de NO_x e CO para Combustão Pulsada e Não Pulsada	97
CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
APÊNDICE A	111

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 – Esquema do Tubo de Rijke com estrutura de onda do modo acústico fundamental.....	22
1.2 – Mecanismo de Fenimore.....	32
1.3 – Emissão de poluentes em função da razão de equivalência.....	33
1.4 – Distribuição das reservas mundiais de gás natural.....	35
1.5 - Evolução das reservas mundiais de petróleo e gás natural.....	36
1.6 - Produção de gás natural no Brasil.....	36
2.1 – Esquema da Câmara de Combustão.....	43
2.2 – Câmara de Combustão com o queimador e o sistema de atuação acústica.....	44
2.3 – Esquema detalhado do queimador e alto-falante.....	45
2.4 – Detalhe da saída do queimador no injetor do Combustor.....	46
2.5 – Esquema do injetor de gás, com disco e tela.....	48
2.6 – Esquema da linha de alimentação do ar e do combustível.....	49
2.7 – Esquema do módulo gerador de sinais e amplificador.....	54
2.8 – Painel da linha dos gases dos analisadores.....	58
2.9 – Analisadores.....	58
2.10 – Esquema do sistema de tratamento dos gases da exaustão.....	59
2.11 – Amostragem da tela do sistema de aquisição de dados.....	60
2.12 – Número de Reynolds para o ar em função de ϕ	62
2.13 – Chama com $f = 1,00$	63
2.14 – Chama com $f = 0,78$	63

2.15 – Chama com $f = 0,49$	64
2.16 – Chama com $f = 0,30$	64
3.1 – Efeito da variação da frequência sobre a amplitude de pressão para $f = 1,00$	69
3.2 – Efeito da variação da frequência sobre a amplitude de pressão para $f = 0,89$	70
3.3 – Efeito da variação da frequência sobre a amplitude de pressão para $f = 0,78$	70
3.4 – Efeito da variação da frequência sobre a amplitude de pressão para $f = 0,69$	71
3.5 – Efeito da variação da frequência sobre a amplitude de pressão para $f = 0,59$	71
3.6 – Efeito da variação da frequência sobre a amplitude de pressão para $f = 0,49$	72
3.7 – Efeito da variação da frequência sobre a amplitude de pressão para $f = 0,39$	72
3.8 – Efeito da variação da frequência sobre a amplitude de pressão para $f = 0,30$	73
3.9 – Máxima tensão que pode ser proporcionada ao alto-falante.....	73
3.10 – Eficiência da atuação para $f = 1,00$	75
3.11 – Eficiência da atuação para $f = 0,89$	76
3.12 – Eficiência da atuação para $f = 0,78$	76
3.13 – Eficiência da atuação para $f = 0,69$	77
3.14 – Eficiência da atuação para $f = 0,59$	77
3.15 – Eficiência da atuação para $f = 0,49$	78
3.16 – Eficiência da atuação para $f = 0,39$	78
3.17 – Eficiência da atuação para $f = 0,30$	79
3.18 – Emissão de CO para $f = 1,00$	82
3.19 – Emissão de NO _x para $f = 1,00$	82
3.20 – Temperatura a 10 cm do queimador em função de P1 para várias frequências e $f = 1,00$	83

3.21 - Emissão de CO para $f = 0,89$	84
3.22 – Emissão de NO _x para $f = 0,89$	85
3.23 – Temperatura a 10 cm do queimador em função de P1 para várias frequências e $f = 0,89$	85
3.24 - Emissão de CO para $f = 0,78$	87
3.25 – Emissão de NO _x para $f = 0,78$	87
3.26 – Temperatura a 10 cm do queimador em função de P1 para várias frequências e $f = 0,78$	88
3.27 - Emissão de CO para $f = 0,69$	88
3.28 – Emissão de NO _x para $f = 0,69$	89
3.29 – Temperatura a 10 cm do queimador em função de P1 para várias frequências e $f = 0,69$	89
3.30 - Emissão de CO para $f = 0,59$	90
3.31 – Emissão de NO _x para $f = 0,59$	90
3.32 – Temperatura a 10 cm do queimador em função de P1 para várias frequências e $f = 0,59$	91
3.33 - Emissão de CO para $f = 0,49$	93
3.34 – Emissão de NO _x para $f = 0,49$	93
3.35 – Temperatura a 10 cm do queimador em função de P1 para várias frequências e $f = 0,49$	94
3.36 - Emissão de CO para $f = 0,39$	94
3.37 – Emissão de NO _x para $f = 0,39$	95
3.38 – Temperatura a 10 cm do queimador em função de P1 para várias frequências e $f = 0,39$	95
3.39 - Emissão de CO para $f = 0,30$	96
3.40 – Emissão de NO _x para $f = 0,30$	96

3.41 – Temperatura a 10 cm do queimador em função de P1 para várias frequências e $f = 0,30$	97
3.42 – Máximas e mínimas emissões de NO_x para combustão pulsada e emissão para combustão não pulsada, em função de f	98
3.43 – Frequências que apresentam emissões máximas e mínimas de NO_x em função de f	99
3.44 – Amplitudes que apresentam emissões máximas e máximas e mínimas de NO_x em função de f	99
3.45 – Emissões de CO para situações de máximas e mínimas emissões de NO_x para combustão pulsada e emissão de CO para combustão não pulsada, em função de f	101

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
1.1 – Resumo dos trabalhos realizados em combustão pulsante no LCP/INPE.....	27
1.2 – Reservas totais de gás natural, por localização (terra e mar), 1991-2000.....	38
1.3 – Propriedades químicas e físicas do gás natural (Bacia de Campos/RJ).....	39
1.4 – Especificação para o gás natural comercializado no Brasil.....	40
2.1 – Correspondência entre f e a	50
2.2 – Balanço de massa para 0,30 g/s de gás natural.....	51
2.3 – Condições dos testes realizados.....	52
2.4 – Erro de medida dos analisadores.....	57

LISTA DE SÍMBOLOS

D_e	diâmetro equivalente, mm
m_t	vazão mássica do fluido, g/s
PCI	poder calorífico inferior, Kcal/m ³
PCS	poder calorífico superior, Kcal/m ³
P'	-pressão acústica, Pa
Q	-taxa de calor instantânea transferida ao escoamento, J/s
Re	número de Reynolds, adimensional
t	tempo, s
T	temperatura, K
v	velocidade média, m/s
a	excesso de ar utilizado, adimensional
m	viscosidade do fluido, g/ms
ρ	massa específica média, g/m ³
f	razão de equivalência, adimensional
[]	concentração, moles/cm ³

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Histórico da Combustão Pulsante

Devido a problemas ambientais como a destruição da camada de ozônio, a chuva ácida e o efeito estufa, aliado à necessidade de economia de combustível e à escassez de energia elétrica, tornou-se fundamental nos dias atuais, a utilização de novas tecnologias que minimizem a emissão de poluentes e o custo de investimento. Dentro desse cenário, a combustão pulsante tem se mostrado uma possibilidade para conciliar tais fatores em dispositivos que utilizam a combustão como fonte de energia térmica.

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

Hanby em 1968, comprovou que a combustão pulsante promove uma maior transferência de calor convectiva, obtendo-se assim uma elevada eficiência térmica.

O processo de combustão pulsante foi observado pela primeira vez em 1777, quando Higgins (Tyndall, 1970) notou que a queima difusiva de hidrogênio dentro de um tubo

com extremidade inferior aberta ou fechada produzia som, a chamada “singing flame” na língua inglesa, que ocorre pela excitação do modo acústico fundamental do tubo ou de um de seus harmônicos.

Posteriormente, em 1859, Rijke percebeu que ao colocar uma tela metálica a $\frac{1}{4}$ do comprimento de um tubo vertical (ver Figura 1.1) aberto em ambas as extremidades, som era produzido (Lord Rayleigh). Rijke acreditou que esse som era produzido pela expansão do ar ao passar pela tela, seguida de uma compressão devido ao contato com a parede fria do combustor, sendo que ambos os fenômenos ocorriam rapidamente; acreditou ainda que o fluxo deveria necessariamente utilizar-se da convecção natural, pois quando colocou o tubo na horizontal o som cessava. Entretanto não conseguiu explicar porque ao colocar a tela a $\frac{3}{4}$ do tubo não havia a produção de som, ou o porque Sondhaus em 1850 obteve som usando um tubo aberto somente em uma das extremidades, sem utilizar-se da convecção natural (Tyndall, 1970).

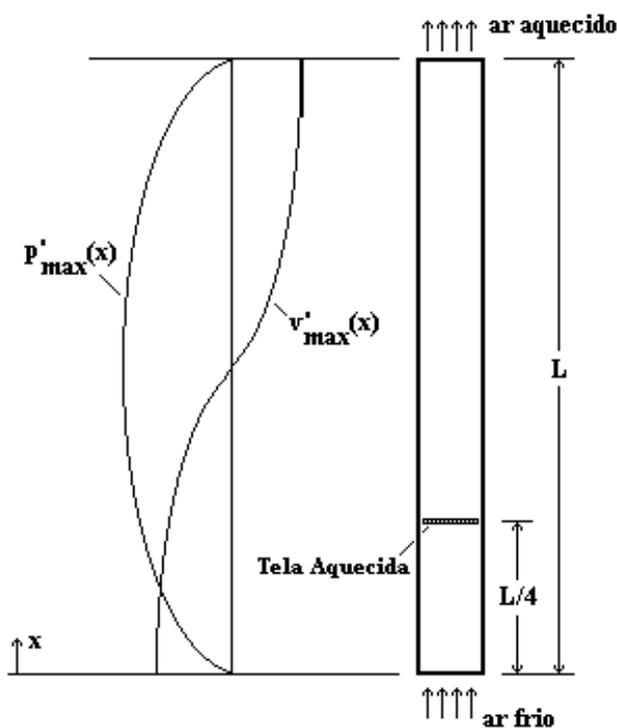


FIGURA 1.1 – Esquema do Tubo de Rijke com estrutura de onda do modo acústico fundamental.

Também em 1859, Bosscha e Riess obtiveram oscilações acústicas ao passar ar aquecido por uma tela refrigerada colocada a $\frac{3}{4}$ de um tubo com fundo aberto (Lord Rayleigh, 1945).

Carvalho et al.(1989), fizeram uma análise teórica para verificar onde ocorreria o máximo de amplitude de pressão em um tubo de Rijke, concluindo que o máximo de oscilação de pressão no primeiro harmônico ocorria quando o aquecedor era colocado a $\frac{1}{4}$ do comprimento do tubo. Os resultados teóricos foram comprovados através de um experimento simples.

Alguns combustores são concebidos com geometria propícia para que o próprio processo de combustão gere oscilações, este é o caso do tubo de Rijke e de Bosscha e Riess (Zinn, 1986). Entretanto, nos projetos convencionais de câmaras de combustão é necessário utilizar atuadores externos como alto-falantes, os quais poderão tanto atenuar como amplificar o sinal acústico (Botura, 1998). Mesmo em combustores desenhados para geração de instabilidades acústicas, isso ocorre apenas em algumas circunstâncias, o que restringe o intervalo operacional do dispositivo.

Para que ocorra a combustão pulsante é necessário que o queimador e a chama possuam características apropriadas. Pode-se verificar se através do critério de Rayleigh, se ocorrerá amplificação ou atenuação da oscilação de pressão pela adição de calor. O critério de Rayleigh foi estabelecido em 1878 por Lord Rayleigh, que constatou uma amplificação da oscilação de pressão quando a energia térmica era adicionada ao processo de combustão no instante de máxima compressão, ou retirado calor quando houvesse máxima rarefação, sendo que o contrário implicaria em atenuação na oscilação de pressão (Lord Rayleigh, 1945). Esta condição é necessária mas não suficiente, pois não explica o mecanismo responsável pelo surgimento das oscilações.

Em 1953, Putnam e Dennis desenvolveram uma forma matemática para o critério de Rayleigh, estabelecendo que teremos amplificação na oscilação de pressão se ocorrer o descrito na equação a seguir:

$$\oint Q P' dt > 0 \quad (1.1)$$

onde:

Q - é a taxa de energia instantânea adicionada,

P' - é a pressão acústica (pressão média),

t - é o tempo,

\oint - denota a integração sobre um ciclo de oscilação

Esta mesma integral foi obtida por Chu em 1956, através das equações de conservação, representando o aumento da energia total após cada ciclo de oscilação para um aquecedor plano.

O critério de Rayleigh pôde ser confirmado por Richardson em 1922 (citado por Raun et al., 1993), ele estudou a relação entre calor liberado e pressões oscilantes, usando um aparato experimental que consistia de uma chama difusiva oriunda da queima de carvão no interior de um tubo de ressonância. O tubo de ressonância era feito de latão e tinha uma janela para observar a chama. Uma chama externa separada do tubo de ressonância foi usada para detectar pressões flutuantes perto da chama interna. Ele usou um estroboscópio para observar as relações entre as duas chamas. A partir disso, ele deduziu que a pressão máxima coincidia com o máximo de calor liberado, confirmando assim as explicações de Rayleigh sobre o fenômeno.

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 e concluíram que as pulsações aumentam não só a taxa de reação entre combustível e oxidante, como também a transferência convectiva de calor dos gases quentes para a parede do combustor; ainda verificou-se uma baixa emissão de particulados. Como inconveniente, houve acúmulo de matéria inerte, o que depois de certo tempo levava ao colapso as oscilações e ao arraste das partículas de carvão parcialmente queimadas, tornando o combustor menos eficiente, além de provocar a formação de canais preferenciais de escoamento de ar, devido à fusão das cinzas, sendo estes canais os

responsáveis pela mistura heterogênea entre combustível e oxidante no processo de combustão (Carvalho, 1983; Ferreira, 1989; Ferreira et al., 1990).

Martins (1998), analisando a queima pulsante e não pulsante de GLP em um tubo de Rijke, com injeção de amônia como elemento dopante, confirmou que a combustão pulsante é muito mais eficiente que a não pulsante, pois houve menor formação de CO para o caso pulsante. Entretanto, as emissões de NO_x 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. Um aumento na vazão de GLP, para as mesmas razões de equivalência, provocou aumento na amplitude de pressão e na frequência de oscilação e houve maior formação de fuligem na combustão não pulsante.

O efeito do campo acústico sobre a estrutura da chama e ainda sobre a taxa de mistura entre o combustível e o oxidante foi estudado em 1999 em chamas pré-misturadas de GLP com ar, pulsadas acusticamente com alto falante (Lacava et al., 1999). Através de imagens obtidas por câmeras CCD, pôde-se verificar que as oscilações acústicas modificaram fortemente a estrutura da chama, e conseqüentemente os processos físicos e químicos que ali se desenvolveram.

Chamas difusivas pulsantes livres usando GLP foram estudadas por Bastos (2001) indicando que a combustão pulsante altera sensivelmente a aparência da chama, transformando-a de amarela em azul, o que denota uma melhor mistura entre combustível e oxidante e diminui as emissões de fuligem. Foi verificado que o aumento de temperatura na região de mistura e combustão aumentou a emissão de NO_x devido ao aumento de temperatura para o processo pulsante.

Ferreira (2001) estudou a influência da atuação acústica sobre a linha de pré-mistura do queimador para chamas confinadas. Verificou-se que em chamas predominantemente difusivas (16 a 25% de pré-mistura), não houve muita alteração na emissão de NO_x com a atuação acústica, mas as emissões para chamas difusivas foram um pouco menores que para as pré-misturadas com ou sem atuação. Para $\phi=0,9$ e $\phi=1$ em chamas difusivas, há redução de CO.

onde:

$$\phi = \frac{n^{\circ} \text{Oxigênio na reação estequiométrica}}{n^{\circ} \text{Oxigênio na reação real}}$$

Amplitudes elevadas desfavoreceram a mistura entre combustível e oxidante, dispersando parte do desenvolvimento das reações das proximidades do queimador, conseqüentemente tem-se uma combustão incompleta com aumento nas emissões de CO e diminuição nas de NO_x. Notou-se ainda pela análise tomográfica que em chamas parcialmente pré-misturadas (50 e 60% de pré-mistura), para $f = 0,9$ e $f = 1$, com e sem atuação, não houve presença de fuligem; entretanto, em chamas difusivas (15 e 25% de pré-mistura), a presença da fuligem foi reduzida pela presença do campo acústico, isso devido a melhor taxa de mistura entre os reagentes.

Na Tabela 1.1 apresentamos um resumo dos trabalhos feitos em combustão pulsante no LCP/INPE.

TABELA 1.1 – Resumo dos trabalhos realizados em combustão pulsante no LCP/INPE.

<u>Autor</u>	<u>Combustível/Área concentração</u>	<u>Parâmetros Estudados</u>
Carvalho et al., 1989	Madeira	Pressão acústica e frequência
Ferreira, 1989	Carvão vegetal	Pressão acústica e frequência
Couto, 1989	Álcool etílico	Pressão acústica e frequência
Torres, 1990	Casca de dendê	Eficiência da combustão
Momma, 1993	GLP	Pressão acústica e frequência
Lacava, 1995	Álcool etílico	Pressão acústica, frequência e diâmetro médio de sprays
Ferreira, 1997	GLP	Pressão acústica, frequência e concentrações de CO, CO ₂ , O ₂
Martins, 1998	GLP	Pressão acústica, frequência e concentrações de CO, CO ₂ , O ₂ e NO _x
Botura, 1998	Estudo e Projeto de Controlador	Simulação da aplicação da lógica fuzzy em processos de combustão
Bastos, 2001	GLP	Pressão acústica, frequência, concentrações de CO, CO ₂ , O ₂ , NO _x , transferência de calor e Tomografia de Chama.
Ferreira, 2001	GLP	Pressão acústica, frequência, concentrações de CO, CO ₂ , O ₂ , NO _x , transferência de calor e tomografia de chama.

1.2 Poluentes Gasosos Atmosféricos

Os principais poluentes gasosos atmosféricos são o monóxido de carbono (CO), os óxidos de nitrogênio (NO_x), o dióxido de enxofre (SO₂) e os hidrocarbonetos não queimados ou parcialmente queimados, designados por UHC (Unburned Hydrocarbons).

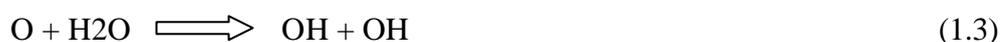
As emissões de NO_x e de SO₂ contribuem para a formação da chuva ácida, pois em presença da umidade do ar e do ozônio das baixas camadas, se oxidam e formam HNO₃ e H₂SO₄. A chuva ácida (pH menor ou igual a 5,5) libera do solo metais tóxicos (como Zn, Pb, Cu, Cd, e Hg). Esses metais podem alcançar rios, ser utilizados pelo homem e causar sérios problemas à saúde. Além dos problemas ambientais, o H₂SO₄ ataca as partes metálicas dos equipamentos, podendo causar altas taxas de corrosão.

O enxofre é encontrado na maioria dos combustíveis líquidos usados atualmente, principalmente em frações pesadas da destilação do petróleo e em carvões minerais.

O combustível utilizado nesse trabalho foi o gás natural, que depois de processado não possui enxofre em sua composição. Entretanto compostos de enxofre em pequenas quantidades é adicionado para a detecção de vazamentos por.

Os principais gases responsáveis pelo efeito estufa são o CO₂ (encontrado em maior quantidade), juntamente com CO, o metano e os CFC's. Este impede que a energia emitida pelo sol se dissipe para o espaço. Embora esse fenômeno seja uma característica natural, a ação do homem tem aumentado demasiadamente a concentração desses gases na atmosfera, principalmente a partir da década de 80, fazendo com que a temperatura da Terra aumente de forma excessiva. Segundo estudos do IPCC ("Intergovernmental Panel on Climate Change"), a temperatura da Terra aumentou entre 0,3 a 0,6 graus Celsius nos últimos 100 anos.

As moléculas dos hidrocarbonetos reagindo com oxigênio se quebram formando CO, que posteriormente se oxida a CO₂; o processo de oxidação é bastante lento, salvo se houver H₂ ou H₂O presentes, pois CO reage mais rapidamente com OH do que com O ou O₂. Esse processo pode ser visto pelo mecanismo a seguir (Glassman,1987): a primeira reação (1.2) é lenta, resultando em baixa taxa de formação de CO₂, sendo este formado em sua maior parte na terceira reação (1.4). As reações (1.5) e (1.6) correspondem à presença de H₂ em quantidade considerável. Se tivermos alta pressão e na presença de HO₂ ocorrerá a reação (1.8).



A oxidação do CO a CO₂, assim como a formação de UHC, são dependentes da taxa de mistura entre oxidante e combustível e do tempo de residência suficiente dentro do combustor, e ambos possuem o mesmo comportamento com relação à sua emissão e à taxa de reação.

NO_x é o termo que designa a soma NO + NO₂. Embora no processo de combustão haja maior emissão de NO que NO₂, ao entrar em contato com a atmosfera há a oxidação do NO a NO₂ (Lacava, 2000). A emissão do NO e do NO₂ está associada às altas temperaturas; portanto, torna-se necessário evitar picos de temperatura, como o que ocorre na estequiometria, onde a combustão ocorre localmente. Segundo Lyons (1981), em uma combustão onde haja um excesso de oxidante, se ocorrer uma melhor mistura entre os reagentes, haverá redução na formação de NO_x. Dos poluentes atmosféricos, o NO_x é aquele que de forma direta apresenta menos riscos à saúde. No entanto, o NO_x 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, componentes 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 quantidade, o smog ameaça as pessoas, os animais e as plantas. O poluente atmosférico predominante no smog ao nível do solo, encontrado em áreas urbanas é o ozônio (O₃).

O NO_x pode ser formado por três mecanismos distintos:

- Mecanismo de Zeldovich (NO_x térmico), predominante em altas temperaturas (acima de 1500 °C), formado pela oxidação do N₂ atmosférico e numa faixa ampla de razões de equivalência, formado principalmente na região de pós-chama, ou seja, depois de ocorrer a oxidação completa do combustível, por ser uma reação mais lenta do que o processo de combustão. Este mecanismo é constituído das seguintes reações (Hayhurst et al, 1980):



Segundo Westenberg (1971), pode-se estimar a taxa de formação do NO térmico, demonstrando a importância da temperatura na sua formação, através da equação:

$$\frac{dNO}{dt} = 6.10^{10} T^{-1/2} \cdot \exp(-69090/T) \cdot [\text{O}_2]^{1/2} \cdot [\text{N}_2] \quad (1.12)$$

onde:

t = tempo, s

T = temperatura, K

[O₂] = concentração de O₂, moles/cm³

[N₂] = concentração de N₂, moles/cm³

- NO_x imediato (“prompt” NO_x), cujo mecanismo foi proposto por Fenimore em 1971 (ver Figura 1.2). Ele se origina de forma mais rápida que o térmico, formado na região de frente de chama, a partir de radicais de hidrocarbonetos que não foram totalmente consumidos (principalmente CH e CH₂, segundo Blauwens et al. ,1977) provenientes do combustível, com nitrogênio atmosférico, para formar NO, cujas principais reações do mecanismo se encontram na sequência:



O HCN é então convertido em N através das seguintes etapas:



Então o N se converte em NO seguindo os mecanismos:



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 (Lacava, 2000).

- NO_x do combustível, resultante da oxidação do nitrogênio existente no combustível, que em geral é quebrado em radicais de menor peso molecular como o HCN, CN, NH_2 , NH e N, que posteriormente se converte em NO, por reações que ocorrem no mecanismo proposto por Fenimore, como mostra a Figura 1.2.

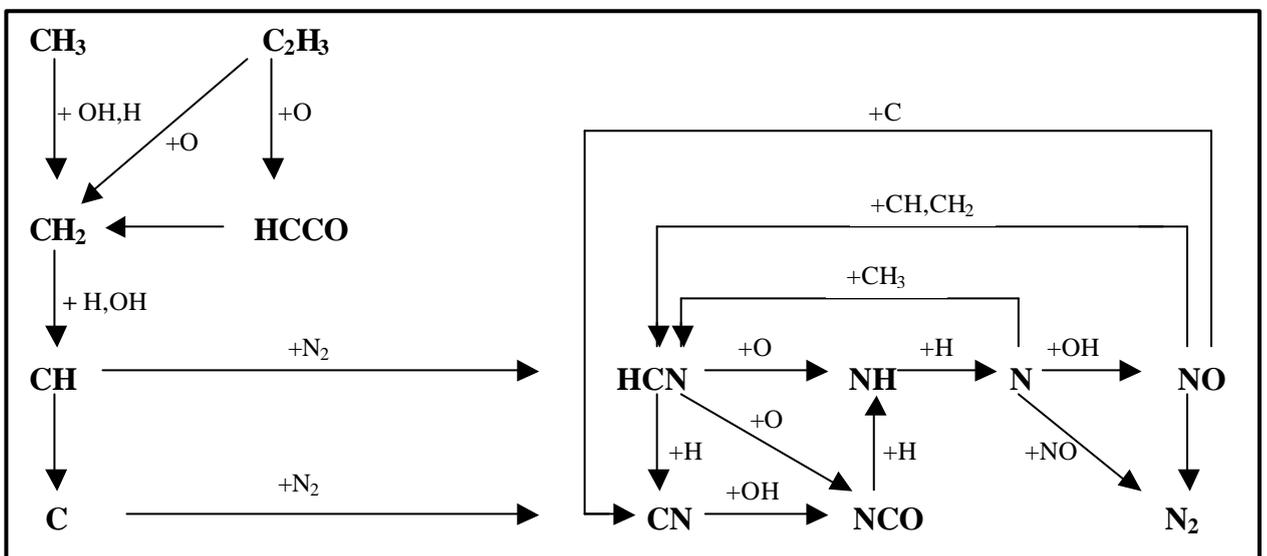


FIGURA 1.2 – Mecanismo de Fenimore.

FONTE: Glarborg (1993).

Olhando-se a Figura 1.3 (Lefebvre, 1983), nota-se que 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.

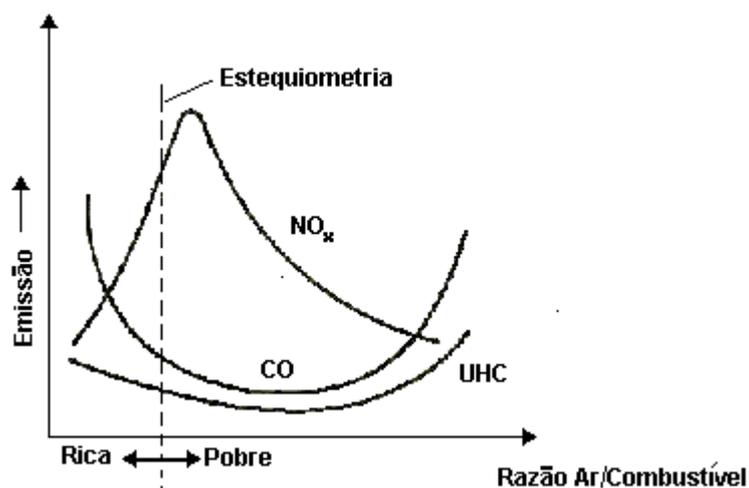


FIGURA 1.3 – Emissão de poluentes em função da razão de equivalência.

Os hidrocarbonetos não queimados (UHC) podem ser definidos como aqueles que são emitidos na atmosfera sem que tenham sido oxidados totalmente, ou os resultantes da degradação térmica de hidrocarbonetos de maior peso molecular naqueles de menor peso (Lefebvre, 1983). Normalmente, sua emissão está associada à mistura entre combustível e oxidante e o tempo de residência na câmara, seu comportamento e atitudes para seu controle são próximos aos tomados com relação às emissões de CO.

A emissão de fuligem está diretamente ligada à falta de oxigênio e à taxa de mistura entre combustível e oxidante, está associada às reações de craqueamento dos hidrocarbonetos, reações que em fase gasosa geram núcleos condensados sólidos que competem com o mecanismo de oxidação, ocorrendo mais significativamente em misturas ricas e elevada temperatura (Williams, 1976). Como no presente trabalho usou-se excesso de ar, não houve emissões aparentes de fuligem.

1.3 Gás Natural

O gás natural é encontrado em reservatórios subterrâneos tanto em terra quanto no mar, acumulado em rochas porosas, podendo ser encontrado juntamente com petróleo (gás associado), ou sozinho (gás não associado). É um combustível fóssil, obtido pela degradação da matéria orgânica por bactérias anaeróbias, pela degradação da matéria orgânica e do carvão por temperatura e pressão elevada, ou pela alteração térmica dos hidrocarbonetos líquidos.

A matéria orgânica fóssil é também chamada de querogêneo e pode ser dois tipos: querogêneo seco, proveniente de matéria vegetal, e o querogêneo gorduroso, proveniente de algas e matéria animal.

No processo de formação do planeta, a transformação da matéria orgânica vegetal, celulose e lignina, produziu o querogêneo seco, que ao alcançar maiores profundidades na crosta terrestre sofreu um processo gradual de cozimento, transformando-se em linhito, carvão negro, antracito, xisto carbonífero e metano, dando origem às reservas de carvão do planeta.

Já o querogêneo gorduroso não sofreu o processo de cozimento e deu origem ao petróleo. Nos últimos estágios de degradação deste, o petróleo apresenta-se como condensado volátil associado a hidrocarbonetos gasosos com predominância do metano, é esta a razão de se encontrar o gás natural associado. Assim o gás natural bruto é uma mistura variada de hidrocarbonetos, cujo principal componente é o metano (CH_4). O gás natural não associado apresenta maiores teores de metano, enquanto o associado apresenta maiores porcentagens de etano, propano, butano e outros hidrocarbonetos mais pesados.

O gás natural não tem cor e é inodoro, sendo adicionado de compostos de enxofre para se detectar vazamentos. Não se trata, portanto, de um produto derivado do petróleo, mas sim de formação semelhante.

Enquanto as reservas mundiais de petróleo se concentram no Oriente Médio (cerca de 64%), as reservas de gás natural estão mais distribuídas ao redor do mundo como podemos ver na Figura 1.4. Isso permite que se tenha acesso ao gás natural em diversas fontes diferentes, garantindo um mercado competitivo, com reservas diversificadas e pouco dependentes de crises internacionais e políticas, com estabilidade de preços e garantia de fornecimento, mesmo mediante conflitos políticos.

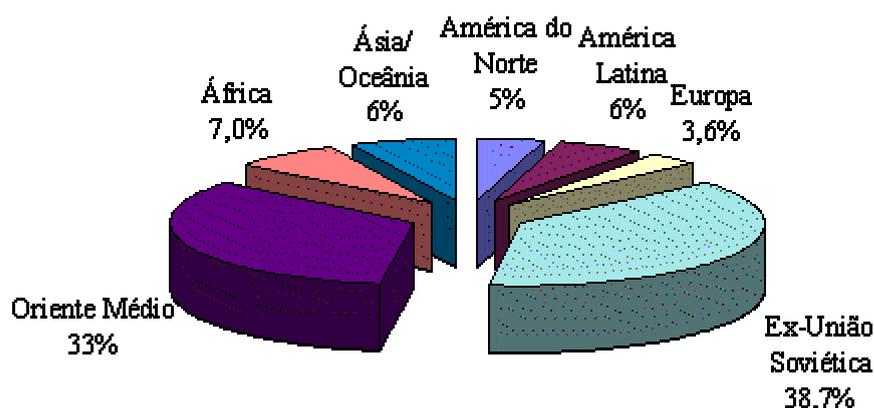


FIGURA 1.4 – Distribuição das reservas mundiais de gás natural

FONTE: Anuário Estatístico ANP (1999).

A Figura 1.5 compara o aumento das reservas mundiais de gás natural a partir de 1990 em relação ao petróleo, verificando-se seu rápido crescimento. Segundo o anuário estatístico de 1999 da ANP, Agência Nacional de Petróleo, o Brasil produzia mais de 32 milhões de m³ de gás natural por dia em 1999, como pode ser visto na Figura 1.6, atualmente esse número ultrapassa os 33 milhões de m³/dia.

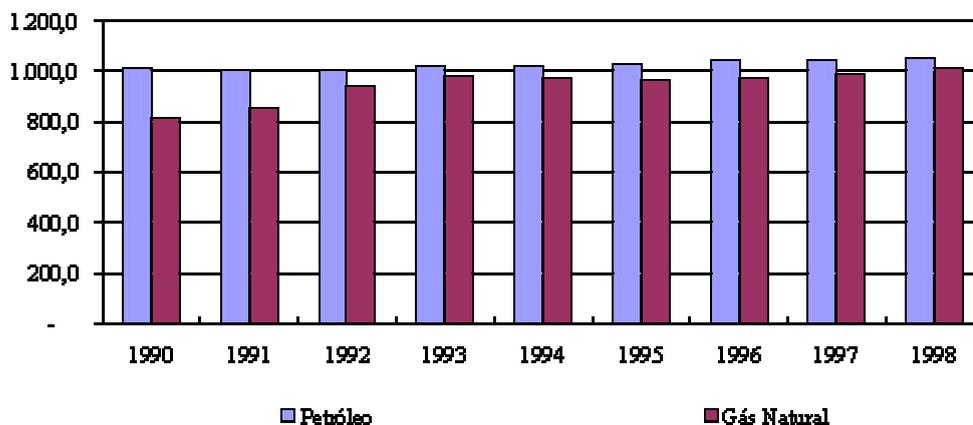


FIGURA 1.5 - Evolução das Reservas Mundiais de Petróleo e Gás Natural-10⁶ bep.

FONTE: Anuário estatístico ANP (1999).

A Tabela 1.2 mostra um panorama das reservas brasileiras de gás natural, segundo unidades da Federação, tanto em terra quanto em mar.

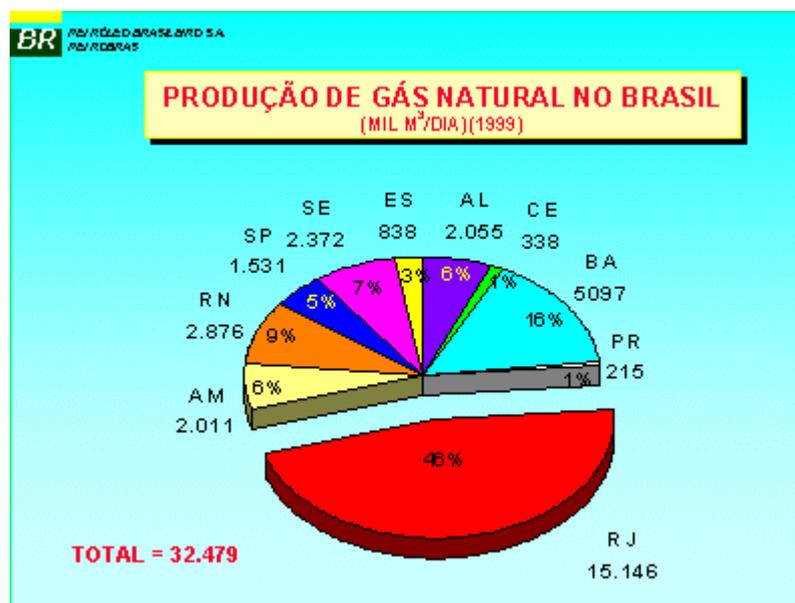


FIGURA 1.6 – Produção de Gás Natural no Brasil.

FONTE: Anuário estatístico ANP (1999).

Com relação ao aspecto de segurança, podemos destacar que possui massa específica menor que a do ar, o que facilita sua dispersão para a atmosfera, e para que ele se inflame é necessário que seja submetido a uma temperatura superior à 620°C (o álcool se inflama a 200°C e a gasolina a 300°C). Ele ainda não provoca asfixia, ou seja, ele não se acumula nas camadas inferiores, pois dissipa-se para a atmosfera.

Quanto à toxicidade, o gás natural não é quimicamente tóxico se inalado ou ingerido acidentalmente, pois ao contrário do CO que se combina com a hemoglobina ocupando o lugar do oxigênio, transportando-o do pulmão para todo o organismo, causando falência dos sistemas, o gás natural é inerte no corpo humano.

Observando-se a Tabela 1.3 podemos verificar que seu limite de inflamabilidade inferior é alto, ou seja, para se atingir as condições de auto-sustentação da combustão se faz necessário uma quantidade significativa de combustível em relação à quantidade total de ar em um ambiente, e como este é menos denso que o ar se dissipa rapidamente. Observa-se ainda que a faixa entre os limites de inflamabilidade superior e inferior é estreita, significando que mesmo que o limite de inflamabilidade inferior seja atingido em um ambiente interno, e se inicie a combustão, sua auto-sustentação é logo perdida, pois rapidamente se atinge o limite de inflamabilidade superior e o gás natural se torna diluente do ar.

Dos combustíveis utilizados atualmente, o gás natural é um dos mais ecológicos, pois reduz bastante a emissão de poluentes em relação à queima de outros combustíveis. Sua queima é limpa, praticamente isenta de resíduos tóxicos como o SO₂, sua redução é de até 98%. Possui menores emissões de CO, de hidrocarbonetos não queimados ou parcialmente queimados, e uma grande redução de NO_x, além de formar pouca fuligem. Um exemplo dessa conscientização ecológica é a Lei 12.140/96, promulgada pela Câmara Municipal de São Paulo. Tal lei obriga a substituição do óleo diesel por gás natural em toda a frota de ônibus do município até o ano 2008.

TABELA 1.2: Reservas totais de gás natural, por localização (terra e mar),
1991-2000.

Unidades da Federação	Localização	Reservas totais de gás natural (milhões m ³)									
		1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Total		288.725	304.624	284.771	323.790	343.131	398.373	435.459	409.811	403.870	360.782
Subtotal	Terra	126.217	133.502	135.586	149.745	152.211	168.901	176.828	157.148	151.164	137.614
	Mar	162.508	171.122	149.185	174.045	190.920	229.472	258.631	252.662	252.706	223.168
Amazonas	Terra	66.254	72.594	75.141	83.145	83.261	98.088	108.619	96.775	91.013	88.138
Pará	Mar	-	-	-	10	10	10	10	-	-	-
Amapá	Mar	-	-	-	5.055	5.055	5.055	5.055	-	-	-
Maranhão	Terra	101	-	-	117	117	245	245	-	-	-
Ceará	Terra	7	-	-	10	12	15	24	1	1	-
	Mar	1.438	1.572	1.741	1.832	1.841	1.841	2.169	1.814	2.520	2.124
Rio Grande do Norte	Terra	4.845	4.281	4.539	4.310	4.838	4.895	5.659	4.669	6.675	4.177
	Mar	17.522	15.888	15.530	17.310	17.633	19.025	20.931	19.687	19.442	16.892
Alagoas	Terra	14.735	14.619	14.563	15.879	15.750	15.443	14.396	10.282	10.163	9.386
	Mar	1.405	1.405	1.505	1.608	1.608	1.653	1.542	1.298	1.569	1.472
Sergipe	Terra	1.064	1.049	1.095	1.246	1.229	1.225	1.227	1.144	1.026	904
	Mar	4.865	5.498	5.490	5.996	5.779	6.732	7.377	6.955	7.368	7.746
Bahia	Terra	36.540	38.075	37.442	42.054	44.255	46.574	43.388	40.359	38.108	30.947
	Mar	2.348	6.566	7.672	3.642	14.152	7.316	6.546	3.521	8.768	9.129
Espírito Santo	Terra	2.672	2.884	2.807	2.984	2.748	2.416	2.471	3.119	3.378	3.262
	Mar	373	267	248	1.266	1.253	13.215	5.674	5.638	8.316	16.705
Rio de Janeiro	Mar	118.617	124.222	98.539	119.570	126.953	163.821	198.932	205.863	198.221	162.827
São Paulo	Mar	11.987	10.749	13.584	13.216	12.754	6.607	5.917	5.664	4.940	4.669
Paraná	Terra	-	-	-	-	-	-	800	800	800	800
	Mar	3.953	4.920	4.838	4.470	3.810	4.126	3.965	2.222	1.562	1.605
Santa Catarina	Mar	-	35	35	70	72	72	514	-	-	-

FONTES: ANP, conforme a Portaria ANP n.º 009, de 21/01/00, a partir de 1999;Petrobras/SERPLAN, para os anos anteriores.

Nota: Reservas em 31 de dezembro dos anos de referência.

A Tabela 1.3 apresenta algumas propriedades do gás natural utilizado nesse trabalho, proveniente da Bacia de Campos/RJ.

TABELA 1.3 – Propriedades químicas e físicas do gás natural (Bacia de Campos/RJ).

Composição Química do Gás Natural (% volumétrica)	
Metano (CH ₄)	89,44 %
Etano (C ₂ H ₆)	6,7 %
Propano (C ₃ H ₈)	2,26 %
Pentano (C ₅ H ₁₂)	0,31 %
Iso-Butano (iC ₄ H ₁₀)	0,15 %
Nitrogênio (N ₂)	0,8 %
Dióxido de Carbono (CO ₂)	0,34 %

Composição física do Gás Natural (% volumétrica)	
Massa Específica (kg/m ³)	0,741
Densidade	0,624
Poder calorífico inferior (PCI)	8283 kcal/m ³
Poder calorífico superior (PCS)	9400 kcal/m ³
Massa Molecular Aparente	17,367 g/mol
Velocidade de Chama (H ₂ =346)	49,4 cm/seg
Limite Flamabilidade Superior (LSF)	14,9 (% gás no ar)
Limite de Flamabilidade Inferior(LIF)	4,8 (% gás no ar)
Relação Gás / Ar	1 / 9,96 (m ³ /m ³)

FONTE: COMGAS / BR (2001).

O gás natural usado no Brasil obedece à Portaria nº 41 de 15 de abril de 1998 da ANP (Agência Nacional de Petróleo). Segundo o Regulamento Técnico ANP nº 001/98, o máximo teor admissível de gás sulfídrico (H₂S) no gás natural é de 20mg/m³, sendo que o teor máximo de enxofre mercaptídico e de H₂S juntos não pode ultrapassar 80mg/m³ (ASTM D 5504 ou ISO 6326-3), como podemos verificar na Tabela 1.4. Esse teor é considerado baixo se comparado aos outros combustíveis comerciais.

A comercialização do gás natural no Brasil, de origem interna ou externa, aplicáveis à fase de produção, transporte e distribuição deverá atender às especificações apresentadas na Tabela 1.4, de acordo com a Portaria nº 41, de 15 /04/98 da ANP.

TABELA 1.4 – Especificação para o gás natural comercializado no Brasil.

Características ⁽¹⁾	Unidades	Grupos			Métodos de Ensaio
		B (baixo)	M (médio)	A (Alto)	
Poder Calorífico Superior (PCS)	kcal/m ³	8000 a 9000	8800 a 10 200	10 000 a 12 500	ASTM D 3588
Densidade Relativa ao ar		0,54 a 0,6	0,55 a 0,69	0,66 a 0,82	ASTM D 3588
Teor máximo de Enxofre (H ₂ S e enxofre mercaptídico)	mg/m ³	80	80	80	ASTM D 1945 ou ISO 6326-3
Teor máximo de inertes ⁽²⁾	%	4	4	4	ASTM D 1945 ou ISO 6974
Teor máximo de gás sulfídrico(H ₂ S)	mg/m ³	20	20	20	ASTM D 5504 ou ISO 6326-3
Teor máximo de CO ₂ ⁽³⁾	% volume	2	2	2	ASTM D 1945 ou ISO 6974
Teor máximo de O ₂	% volume	0,5	0,5	0,5	ASTM D 1945 ou ISO 6974

OBS: (1) Limites são especificados para 20°C e 1 atm.

(2) Para as regiões Norte e Nordeste, admite-se o valor de 6,0.

(3) Para as regiões Norte e Nordeste, admite-se o valor de 3,5.

1.4 Objetivos do Trabalho

São os seguintes os objetivos da presente dissertação:

- Projetar e construir um queimador com sistema de atuação acústica a ser acoplado ao combustor, construir o injetor de gás, assim como adquirir os equipamentos periféricos necessários.
- Caracterizar as faixas de amplitude e frequência onde se obtêm as máximas amplitudes de pressão na câmara de combustão mantendo a chama ancorada, bem como o máximo excesso de ar que permite o ancoramento da chama.
- Procura-se aqui estudar a eficiência do processo de atuação acústica, através da comparação entre os poluentes emitidos na condição de pulsação e sem pulsação, tendo por meta principal obter as condições de trabalho adequadas que conciliem a emissão de baixas concentrações de CO com a redução nas emissões de NO_x.

CAPÍTULO 2

ARRANJO EXPERIMENTAL

2.1 Combustor e Queimador

O combustor utilizado foi desenvolvido no trabalho de Ferreira (2001), seu esquema incluindo o queimador é mostrado na Figura 2.1. Uma fotografia do combustor, do queimador e do sistema de atuação acústica é mostrada na Figura 2.2. O equipamento foi construído em aço inoxidável 304, possui paredes refrigeradas por camisa d'água, com 25 cm de diâmetro interno, comprimento de 100 cm, possui também uma janela de 13 x 24 x 0,5 cm, em borossilicato para visualização da chama.

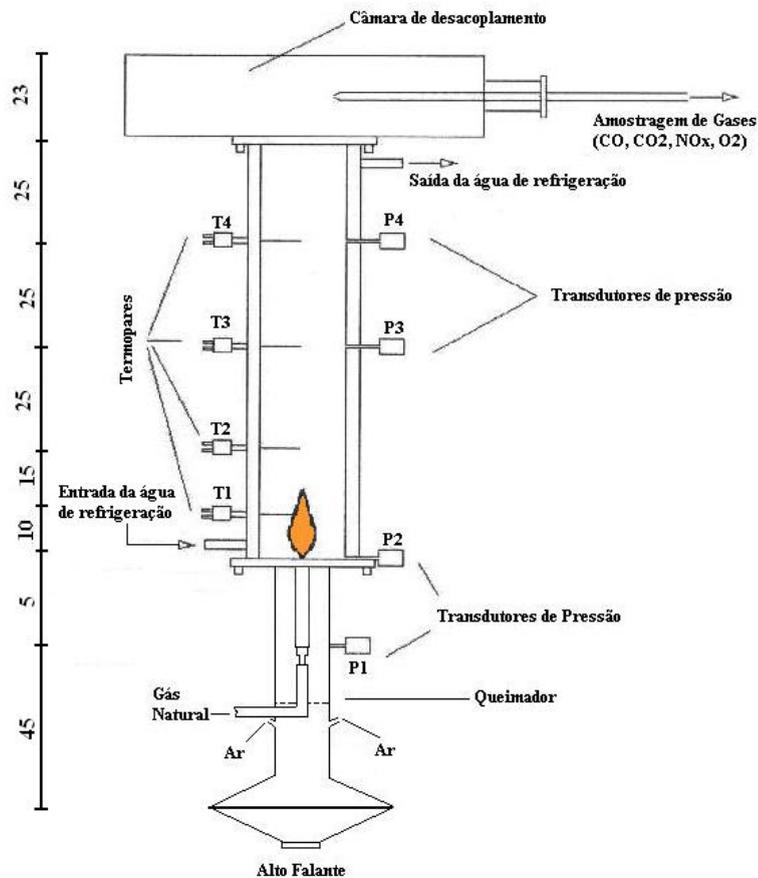


FIGURA 2.1 – Esquema da câmara de combustão.

Acima do combustor foi adaptada uma câmara de desacoplamento com diâmetro interno de 60cm e 23cm de altura, que permite a 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, que simula um tubo aberto para a atmosfera.



FIGURA 2.2 – Câmara de combustão com o queimador e o sistema de atuação acústica.

O queimador, também em aço inoxidável 304, foi acoplado na extremidade inferior da câmara de combustão, conforme mostram as Figuras 2.1 e 2.2. Suas dimensões são 50 cm de comprimento e 7,2 cm de diâmetro interno.

O ar foi injetado tangencialmente através de duas aberturas laterais, para criar uma zona de circulação na saída do queimador e facilitar sua mistura com o combustível. Próximo à entrada de ar foi colocada uma tela metálica com 7,2 cm de diâmetro para uniformização de seu fluxo. A Figura 2.3 mostra um esquema do queimador.

Para estabilizar a chama, foi posicionada uma tela metálica com 7,2 cm de diâmetro, na extremidade superior do queimador e um disco em aço inoxidável, com diâmetro interno de 1,27 cm e diâmetro externo de 3,6 cm, conforme mostram as Figuras 2.3 e 2.4.

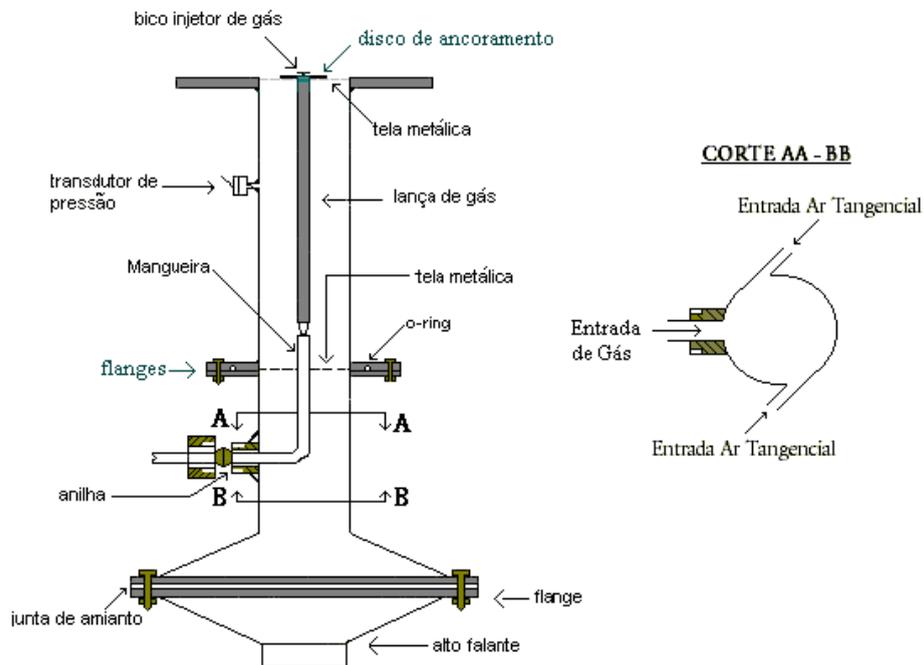


FIGURA 2.3 – Esquema detalhado do queimador e alto-falante.

Foi usado um alto-falante, posicionado na base do queimador, para a atuação acústica sobre o escoamento. Detalhes do alto-falante e de todo sistema de atuação acústica são apresentados na seção 2.4.



FIGURA 2.4 – Detalhe da saída do queimador no interior do Combustor.

2.2 Injetor de Gás

O injetor de gás utilizado foi desenvolvido no trabalho de Ferreira (1997) e também utilizado por Martins (1998). Seu desenho esquemático é apresentado na Figura 2.5. Tal injetor foi construído em aço inoxidável, com diâmetro interno de 1,2 cm e comprimento de 30,0 cm (parte C na Figura 2.5).

Na extremidade superior foi soldado um cilindro maciço de 1,2 cm de altura, no qual foram feitos 6 furos de 0,1 cm de diâmetro, igualmente espaçados (parte B na Figura 2.5) em torno de uma circunferência de diâmetro 0,75 cm, os quais permitiam a passagem do combustível. Nesta peça foi feito um furo cego roscado central, que permitia o acoplamento de um cilindro de 0,33 cm de espessura (parte A na Figura 2.5), cuja finalidade é desviar radialmente o jato axial de combustível gasoso.

O escoamento do gás pelos orifícios de 0,1 cm e o desvio radial do fluxo, foram obtidos por um ressalto de 0,03 cm de altura e 0,6 cm de diâmetro na parte A do injetor.

Na base do queimador, utilizou-se uma mangueira de ¼” seguida de uma anilha para permitir o movimento vertical quando necessário. Esta ligação é mostrada na Figura 2.3.

O injetor de gás permite o ancoramento da chama em um amplo intervalo de vazões de combustível, de 0,15g/s a 0,30g/s (utilizado nesse trabalho), mesmo em regime de combustão com elevados excessos de ar.

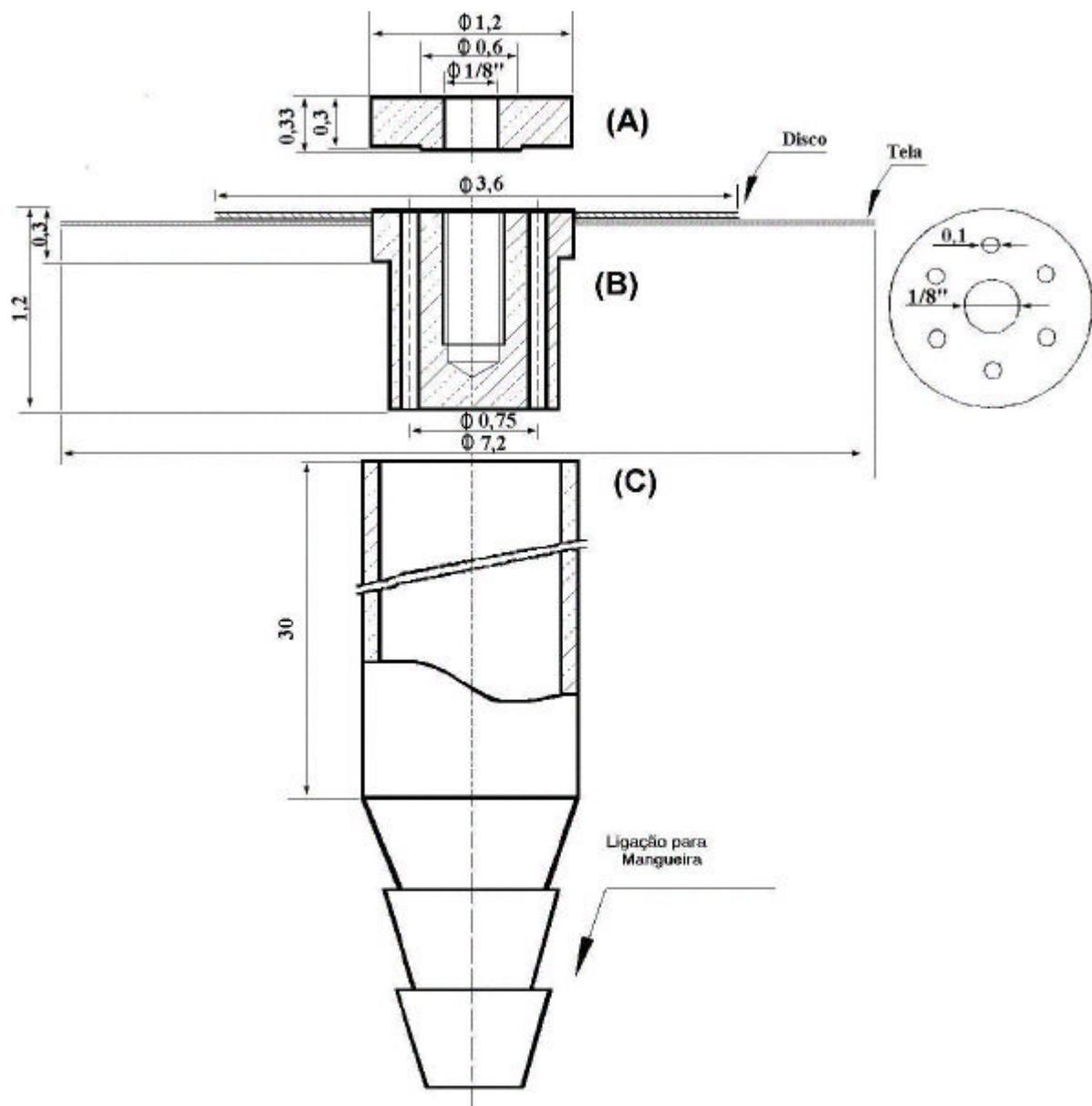


FIGURA 2.5 – Esquema do injetor de gás, com disco e tela.

2.3 Combustível e Oxidante

Como combustível foi utilizado o gás natural com vazão de 0,30g/s, queimando difusivamente com ar estequiométrico ou em excesso, conforme descrito no item 2.3.1 a seguir, pulsado acusticamente. O gás natural é proveniente de cilindros de estocagem que se encontram alocados próximos ao combustor, chega até o combustor pela pressão do próprio cilindro por uma linha com mangueiras 3/8” de diâmetro interno. Para maior segurança e controle da vazão, na saída dos cilindros foram colocados um “manifold”, uma válvula reguladora de pressão e uma válvula corta passagem, a qual permite o fechamento do fluxo mediante qualquer risco, conforme mostra a Figura 2.6.

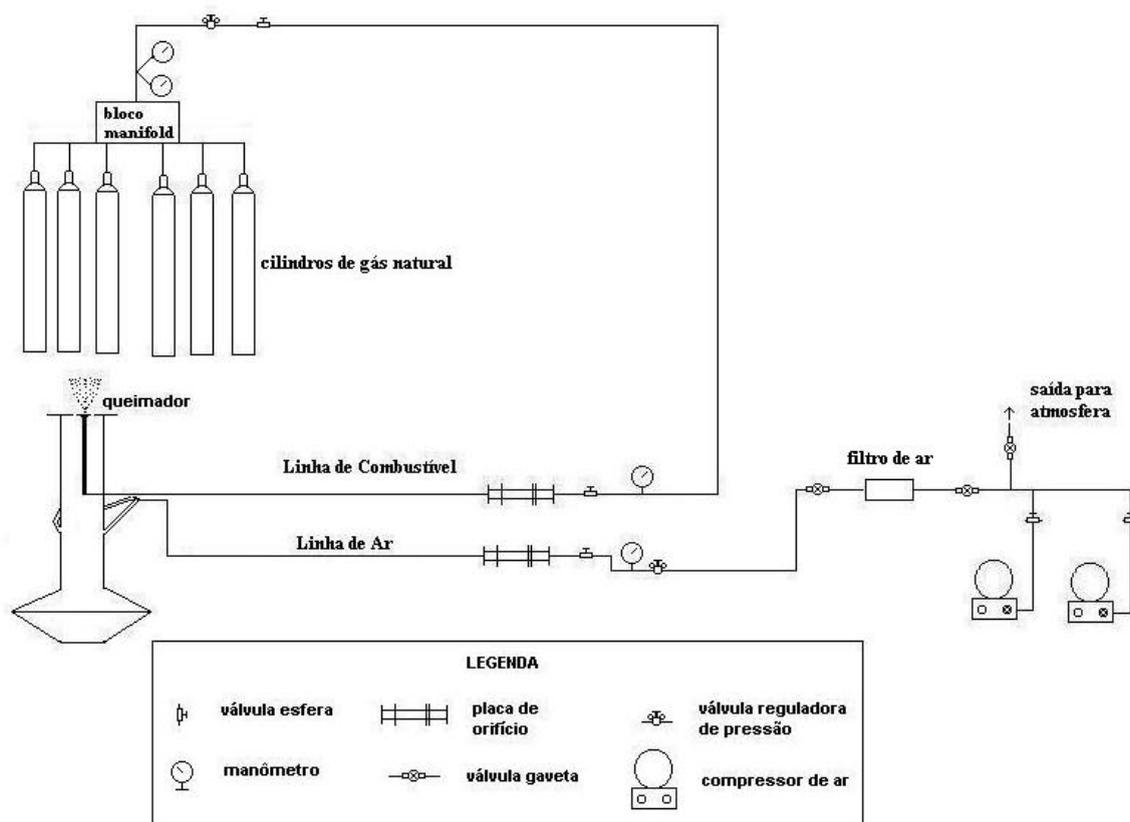


FIGURA 2.6 – Esquema da linha de alimentação do ar e do combustível.

O ar da combustão foi fornecido por dois compressores radiais IBRAM, modelo CR-8, ligados em paralelo. Para as vazões menores de ar utilizou-se apenas um dos compressores, mas à medida que se reduzia o f tornou-se necessário o uso dos dois compressores, chegando-se à vazão de 16,9 g/s de ar para $f = 0,30$.

2.3.1 Testes Preliminares para Escolha das Condições de Trabalho

Foram realizados testes preliminares com o intuito de se determinar quais as frequências e as amplitudes de pressão a serem utilizadas neste trabalho. Inicialmente verificou-se qual seria a máxima vazão de ar possível de se aplicar no queimador para manter a chama ancorada. Verificou-se que mesmo para vazões de ar bem superiores à da estequiometria, sem atuação, a chama permanecia ancorada.

O máximo excesso de ar utilizado era ilimitado no que concerne à estabilidade da chama. A Tabela 2.1 mostra uma correspondência das razões de equivalência (f) e dos excessos de ar (a) escolhidos. Em a e f igual a 1,00 temos a proporção estequiométrica. Escolheu-se então as condições dos testes a serem realizados, correspondentes a oito razões de equivalência, tendo-se arbitrado como máximo de excesso de ar 3,4 vezes o utilizado na estequiometria.

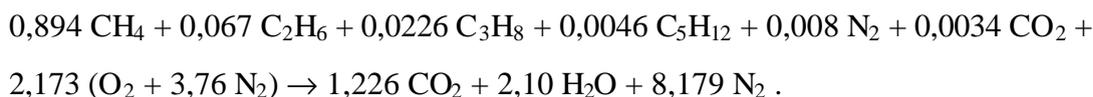
TABELA 2.1 – Correspondência entre f e a em base mássica.

f	1,00	0,89	0,78	0,69	0,59	0,49	0,39	0,30
a	1,00	1,13	1,28	1,46	1,7	2,03	2,6	3,4

A Tabela 2.2 mostra a relação entre f e a vazão de ar utilizada, bem como o balanço de massa para a reação estequiométrica. Temos na estequiometria a reação de 1,00 mol de gás natural (GN) com 10,34 mol de ar, gerando como produtos dióxido de carbono

(CO₂), água (H₂O) e nitrogênio (N₂). O gás natural é o da Bacia de Campos/RJ (COMGAS/BR).

Na estequiometria:



Massa molecular: O₂ = 32g/gmol

GN = 17,999g/gmol

N₂ = 28g/gmol

TABELA 2.2 – Balanço de massa para 0,30 g/s gás natural.

<i>f</i>	1,00	0,89	0,78	0,69	0,59	0,49	0,39	0,30
Vazão de ar (g/s)	4,97	5,62	6,36	7,26	8,43	10,1	12,7	16,9
Vazão de ar (kg/h)	17,9	20,2	22,9	26,1	30,3	36,3	45,6	60,7

Posteriormente realizou-se testes a frio, sem combustão, usando somente o ar, e testes a quente, com queima de gás natural, para todas as razões de equivalência (*f*) usadas nesta dissertação para se obter as frequências correspondentes às máximas amplitudes de pressão no queimador (P1), lidas através do osciloscópio Tektronix 7633. Mediu-se também a amplitude de pressão na base do queimador (P2) para se verificar o comportamento da amplitude no combustor com e sem o processo de combustão.

Obteve-se então as frequências de ressonância e notou-se que para praticamente todas as razões de equivalência as frequências coincidiam para os mesmos valores. Obteve-se também os máximos valores de amplitude nessas frequências. Uma descrição mais detalhada das frequências utilizadas é apresentada no Capítulo 3.

Para todas as frequências adotadas em cada razão de equivalência, variou-se a amplitude de atuação até o limite possível de tensão suportado pelo alto-falante ou até o limite onde a chama permanecesse ancorada. Foram realizados testes com a amplitude máxima e amplitudes menores, para verificar o comportamento da chama, o das emissões gasosas, bem como da temperatura e das condições de oscilação (amplitude e frequência) ao longo do combustor. Realizaram-se ainda testes sem atuação acústica para todas as razões de equivalência propostas.

Foram conduzidos 21 testes para cada f , resultando um total de 168 testes. A Tabela 2.3 mostra o roteiro desses testes.

TABELA 2.3 – Condições dos testes realizados.

Hz	$f = 1,00$				$f = 0,89$				$f = 0,78$				$f = 0,69$			
	mBar															
154	5,0	7,0	9,5	10,0	5,0	8,0	11,0	12,0	6,0	9,0	10,5	12,5	6,0	11,0	13,5	17,0
338	5,5	10,5	15,0	20,5	5,0	11,0	15,5	20,0	6,0	12,0	15,0	21,5	6,5	12,0	19,5	25,0
394	6,0	9,0	15,0	17,0	5,0	9,0	14,5	16,0	6,0	10,5	16,0	19,0	4,0	7,0	11,5	16,0
665	12,5	23,5	34,5	47,0	10,0	19,5	26,0	36,5	12,0	24,0	35,0	42,0	10,5	20,0	31,0	40,0
1230	13,5	28,0	43,0	51,5	16,5	32,5	45,0	60,0	13,0	20,0	32,5	42,0	11,0	21,0	33,0	40,0

Hz	$f = 0,59$				$f = 0,49$				$f = 0,39$				$f = 0,30$			
	mBar															
154	5,0	10,5	16,5	23,0	6,5	14,5	22,0	27,0	5,0	7,5	12,0	14,0	4,8	6,0	8,0	9,5
338	10,5	19,0	27,0	34,0	14,5	27,0	40,0	53,0	15,0	30,5	45,0	58,5	14,0	23,0	33,0	47,0
394	5,5	11,0	15,5	21,5	9,0	12,5	18,0	25,0	8,0	13,5	19,5	26,0	7,5	13,5	17,0	22,5
665	11,0	21,0	30,5	40,0	7,5	13,5	18,0	22,5	7,5	14,5	22,0	28,0	7,0	13,0	19,0	25,0
1230	9,5	18,5	27,5	33,5	8,5	19,0	30,0	38,0	6,5	10,5	16,5	22,0	6,0	8,0	11,5	15,5

Para cada f foi realizado um teste sem atuação acústica.

Amplitudes de pressão medidas no transdutor P1.

2.4 Sistema de Atuação Acústica

O sistema responsável pela oscilação da chama pode ser visto na Figura 2.7. Os sinais obtidos do gerador de funções Hewlett-Packard, modelo HP8116A, ajustado para amplitude de 1,55 V RMS (2,19 V Pico), e a frequência desejada. O sinal foi então amplificado até o valor desejado por um amplificador Proximity, modelo 750AP (480 W). O sinal amplificado chegava até o alto falante SNAKE, modelo ESX 125 de 12”, com impedância nominal de 8 ohms e 400 W de potência, responsável pela excitação acústica do ar.

Ao longo do sistema combustor-queimador foram colocados quatro transdutores de pressão piezoelétrico Kistler 7261, responsáveis pela conversão do sinal de pressão acústica em sinal elétrico. O transdutor denominado P1 foi colocado próximo à entrada de ar, e os demais transdutores ao longo da câmara, e denominados respectivamente P2, P3 e P4, conforme pode ser observado na Figura 2.1. Os sinais provenientes dos transdutores de pressão passam por amplificadores de carga da Kistler 5006; sendo na sequência, lidos pelo sistema de aquisição de dados. O sinal do transdutor P1 foi utilizado como referência, onde se observou a frequência e a amplitude de pressão imposta ao escoamento de ar no interior do queimador em cada teste. Assim, o sinal proveniente deste transdutor foi lido em um osciloscópio Tektronix 7633, permitindo visualizar a onda acústica senoidal aplicada.

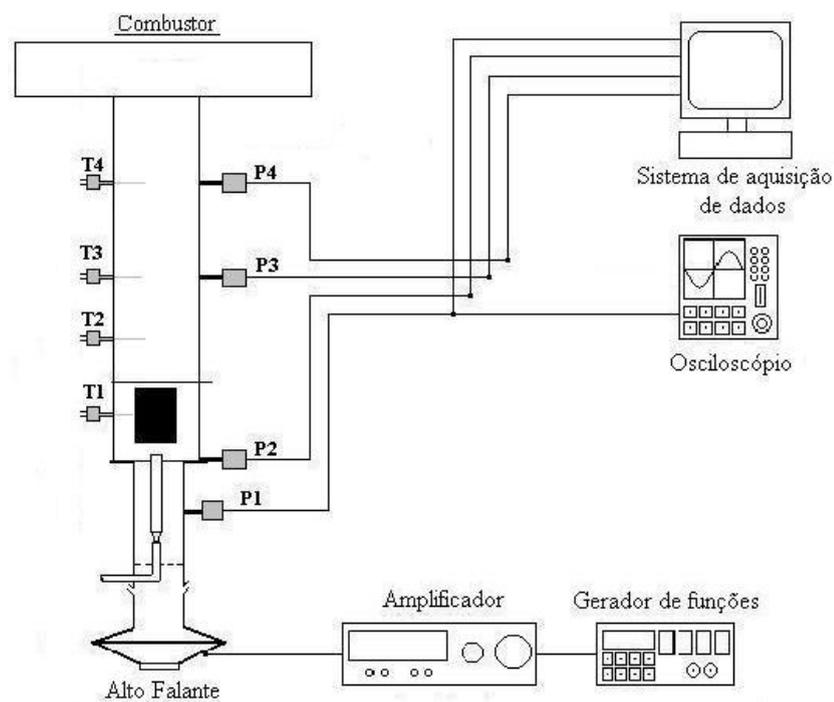


FIGURA 2.7 – Esquema do módulo gerador de sinais e amplificador.

2.5 Medidas de Vazão e Temperatura

A vazão do ar de combustão foi medida através de placa de orifício, com 1,554 cm de diâmetro, colocada em uma tubulação de 3,5 cm de diâmetro, possuindo um erro de medida de 5%, de acordo com o “Manual de Medição de Vazão” (Delmé, 1989). O ajuste da vazão foi feito descarregando para a atmosfera parte do ar proveniente dos compressores.

A vazão do combustível também foi medida por um sistema de placa de orifício do tipo “corner taps”, com 0,424 cm de diâmetro e colocada em um tubo de 1,93 cm de diâmetro. A vazão foi controlada através de válvula de passagem do tipo esfera e uma válvula agulha, para os ajustes grosso e fino, respectivamente. A Figura 2.6 mostra um esquema da linha de alimentação do ar e combustível.

A vazão da camisa d'água do combustor, medida por rotâmetro, foi mantida constante em 1,14 gpm (4,32 l/min), necessária para tornar as paredes refrigeradas, mantendo a resistência mecânica do material da câmara.

Foram colocados, ao longo do combustor, quatro termopares Chromel-Alumel tipo "K", com bitola de 0,5 cm e comprimento de 20 cm, isolamento mineral, junta isolada e bainha metálica, os quais suportam o máximo de 1200 °C. Os termopares foram posicionados a 10, 25, 50, e 75 cm à jusante da base do combustor, denominados T1, T2, T3 e T4, conforme pode ser observado na Figura 2.1.

Foram utilizados ainda termopares para se verificar a temperatura de entrada e saída da água da camisa de refrigeração do combustor e as temperaturas do ar e do combustível nos sistemas de placa de orifício para o cálculo da vazão.

Os sinais elétricos enviados pelos termopares foram lidos em indicadores digitais alocados em um painel próximo ao combustor. Tais sinais também foram enviados para o sistema de aquisição de dados. Esses indicadores permitiam o controle da temperatura em tempo real (variando apenas de acordo com o tempo de resposta do termopar), aumentando a margem de segurança mediante qualquer imprevisto e tornando viável a operação na câmara de combustão.

No sistema de aquisição de dados, a temperatura lida era armazenada em uma planilha, sendo esta o resultado de leituras feitas a cada dois segundos pelos termopares. No item Sistema de Aquisição de Dados, este processo será detalhado.

2.6 Gases da Exaustão

A análise dos gases da combustão é de fundamental importância neste trabalho, pois é através desta que se torna possível a avaliação dos resultados decorrentes da variação da frequência e da amplitude de pressão nos testes.

Foram analisadas as emissões de NO_x , através de um analisador do tipo quimiluminescente, no qual é possível obter as concentrações de NO e NO_x em separado. Para as análises de CO e CO_2 , utilizaram-se analisador do tipo infravermelho, e para o O_2 , um analisador do tipo termomagnético.

O analisador de NO_x faz com que o NO presente no gás analisado reaja com O_3 (ozônio) e forme NO_2 e O_2 , através de uma reação de quimiluminescência. O ozônio é formado no próprio analisador a partir de O_2 pressurizado fornecido a ele. Assim, ao contrário dos demais analisadores que estão ligados em série por não alterarem a composição química dos gases analisados, o analisador de NO_x necessita de uma linha de amostragem separada das demais.

Os analisadores eram ligados duas horas antes dos testes para aquecimento e devidamente calibrados com misturas gasosas de teores conhecidos. Primeiramente, usou-se N_2 para calibração do zero, depois os gases com composição próxima ao fundo de escala de cada analisador (99ppm para o NO_x , 18 % para o CO_2 , 4,27 % para o CO quando $f = 1$, 0,91 % para o CO nos demais f 's, e 18 % de O_2), e como última medida passava-se novamente o N_2 para confirmação do zero e para expelir qualquer resíduo nas linhas.

Na Tabela 2.4 podemos verificar o erro de medida dos analisadores utilizados nesse trabalho.

TABELA 2.4 – Erro de medida dos analisadores.

Analisador	NO _x	CO 5%	CO 1%	O ₂	CO ₂
Erro	± 0,5 %	± 0,05 %	±0,01	± 0,2 %	± 0,1 %

Na câmara os gases da combustão são captados por uma sonda em aço inoxidável refrigerada com camisa d'água. Tal refrigeração é necessária não somente para proteção do material da sonda, mas também para que as reações químicas não se propaguem no seu interior, o que tornaria a amostra não representativa.

A partir da sonda, os gases são succionados por uma bomba de vácuo do tipo diafragma, escoam por uma linha de ¼" em aço inoxidável e são resfriados em um banho de água gelada a 3 °C por meio de duas serpentinas. Para retenção de material particulado, os gases passam por três filtros montados em série. O primeiro filtro está localizado antes do primeiro resfriamento, o segundo após o resfriamento e o terceiro filtro está localizado na sequência da segunda etapa de refrigeração; esses filtros retêm condensados e particulados maiores que 25 µm.

A seguir o fluxo é dividido em três partes, 2 l/min para o analisador de NO_x e 1 l/min para os analisadores de O₂, CO e CO₂, montados em série, e o restante descarregado para a atmosfera. Para segurança dos analisadores, antes dos gases os atingirem, estes passam por filtros de membrana Millipore de fibra de vidro para retenção de particulados menores. Além dos indicadores existentes nos próprios analisadores, sinais de tensão correspondentes às medidas são enviados ao sistema de aquisição de dados. Na Figura 2.8 pode ser visto o painel utilizado para ajustar as vazões da linha de amostragem dos gases, bem como as válvulas usadas na calibração dos analisadores; a Figura 2.9 mostra os analisadores, na parte superior à esquerda, temos o de NO_x e à direita em sequência partindo da parte superior para a inferior o de CO (0-10%), CO₂, CO (0-5%) e o de O₂. Um esquema do sistema de tratamento das amostras dos gases da exaustão pode ser visto na Figura 2.10.



FIGURA 2.8 – Painel da linha dos gases dos analisadores.



FIGURA 2.9 – Analisadores.

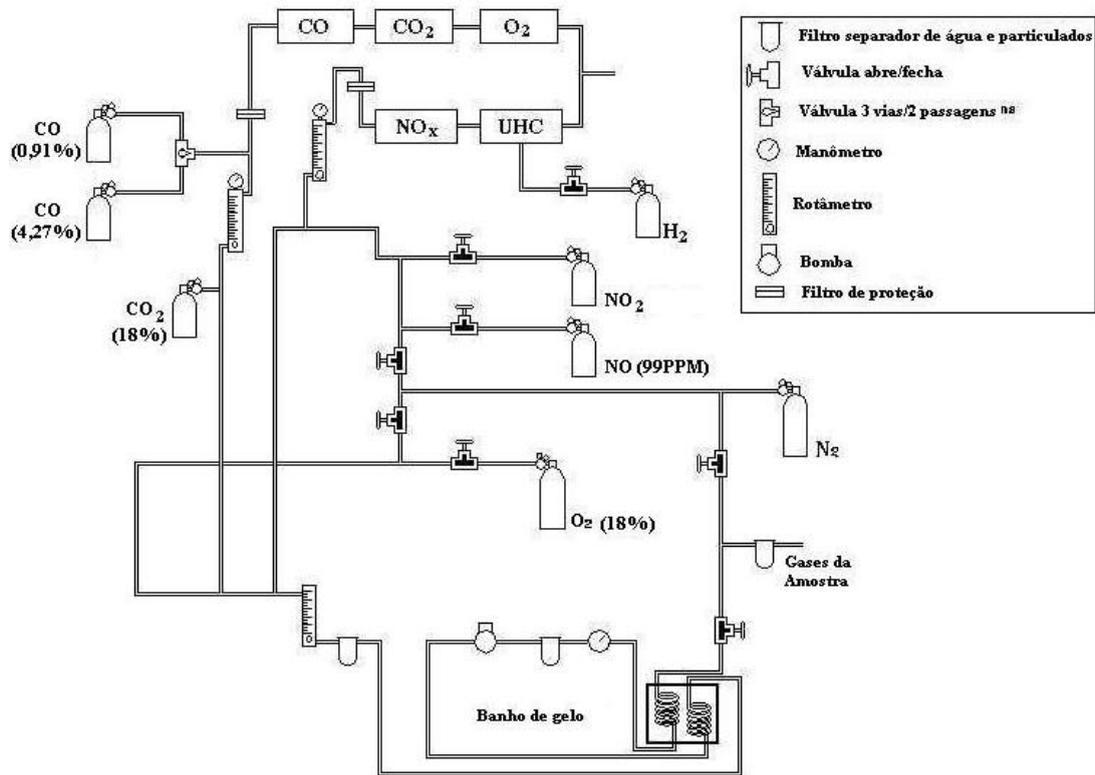


FIGURA 2.10 – Esquema do sistema de tratamento dos gases da exaustão.

2.7 Sistema de Aquisição de Dados

Esse sistema é formado por uma placa de aquisição de dados de 1,25 MS, com dezesseis canais de entrada analógicos e dois canais de saída analógicos, podendo ser multiplexados para 32 entradas cada um deles; conta ainda com um sistema de condicionamento de sinais para aquisição dos sinais de termopares, denominado SCXI1000 da National Instruments,.

São enviados para esse sistema, as medidas de seis termopares, correspondentes às temperaturas ao longo da câmara de combustão e da entrada e saída da água da camisa de refrigeração do combustor, oito pressões (4 pressões pico a pico e 4 pressões v RMS), conforme descrito no item 2.5, e a leitura das concentrações dos quatro

analísadores. Na Figura 2.11 podemos ver uma imagem do monitor com as medidas obtidas no sistema de aquisição de dados.

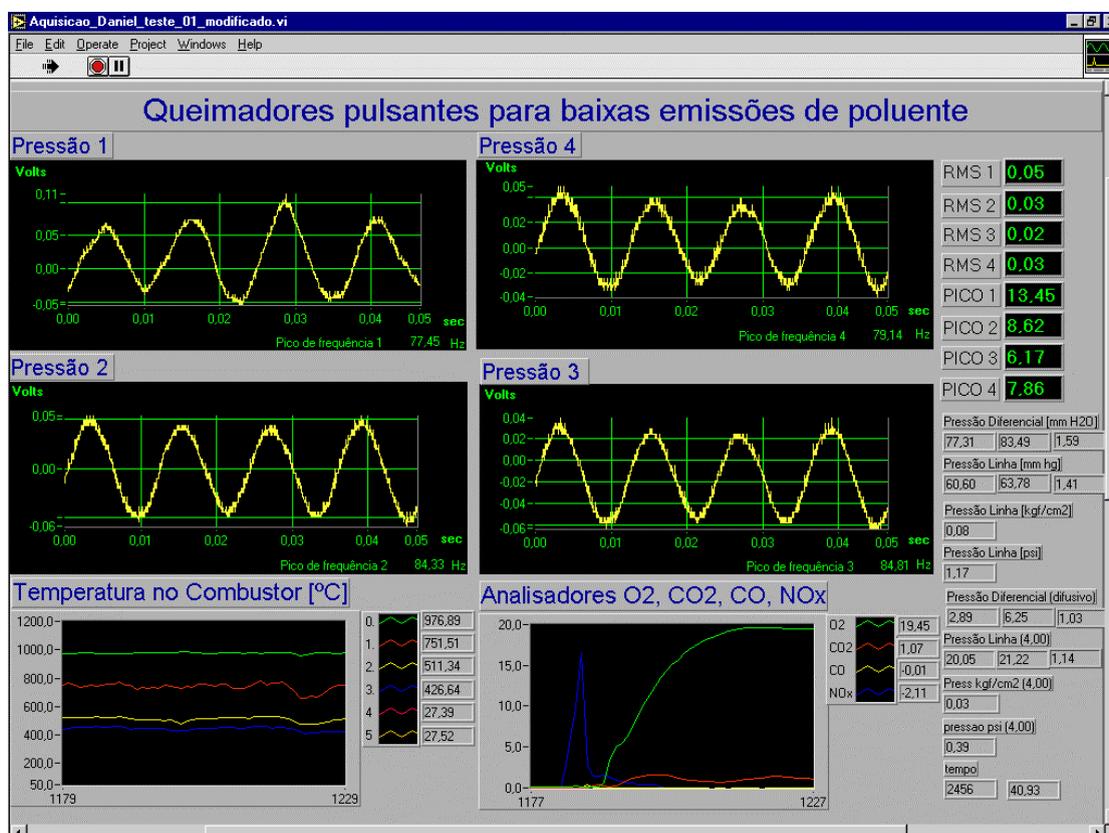


FIGURA 2.11 – Amostragem da tela do sistema de aquisição de dados.

Os números apresentados nesta dissertação são o resultado da média dos dados obtidos por cinco minutos de testes para cada condição. A cada dois segundos é impressa em uma planilha a leitura das medições de pressão, temperatura e concentração dos gases dos analisadores. Cada leitura impressa é na verdade uma média de várias leituras; por exemplo, cada leitura de temperatura é uma média de 20 temperaturas, enquanto a de pressão é uma média de 100 medidas, e a dos analisadores é uma média de 50 medições.

Para cada condição de teste, esperava-se que o sistema entrasse em regime permanente e só então se iniciava a coleta dos dados.

O Apêndice A apresenta a média aritmética dos dados impressos para cada condição de trabalho, dos quais foram gerados gráficos e planilhas e apresentados no Capítulo de resultados.

2.8. Cálculo do Número de Reynolds

Foi calculado o número de Reynolds para se verificar o nível de turbulência do ar e o do gás natural dentro do combustor, que leva em consideração a área equivalente, ou seja, aquela por onde passam os gases dentro do combustor. O número de Reynolds é:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D_e}{\mu} = \frac{4 \cdot m_t}{\rho \cdot m D_e}, \quad (2.1)$$

onde:

ρ = massa específica média (kg/m^3),

v = velocidade média (m/s),

μ = viscosidade do fluido (kg/m s),

D_e = diâmetro equivalente (m),

m_t = vazão mássica do fluido (kg/s).

Para o gás natural, tem-se:

$$\mu = 0,010669 \times 10^{-3} \text{ kg/m s},$$

$$m_t = 0,30 \times 10^{-3} \text{ kg/s},$$

$$A_{\text{equivalente}} = A_{\text{escoamento radial do gás}}$$

$$\pi \cdot D_e^2 / 4 = \pi \cdot 12,0,30, \text{ de onde tiramos } D_e = 0,003795 \text{ m, e } Re = 9434.$$

Temos assim um escoamento turbulento para o gás natural.

Para o ar de combustão temos:

$$D_{\text{ext disco}} = 36 \times 10^{-3} \text{ m},$$

$$D_{\text{queimador}} = 72 \times 10^{-3} \text{ m},$$

$$A_{\text{equivalente}} = A_{\text{externa}} - A_{\text{interna}},$$

$$\pi \cdot D_e^2 / 4 = \pi \cdot (72 \times 10^{-3})^2 / 4 - \pi \cdot (36 \times 10^{-3})^2 / 4, \text{ de onde tiramos } D_e = 62,36 \times 10^{-3} \text{ m}.$$

Temos, segundo a equação (2.1), um Reynolds diferente para cada valor de f , devido à variação de μ e da m_f . Assim, para todos os valores de f temos escoamento turbulento, que vai aumentando à medida que se aumenta a vazão do ar, ou seja, conforme se diminui o f , conforme pode ser observado na Figura 2.12.

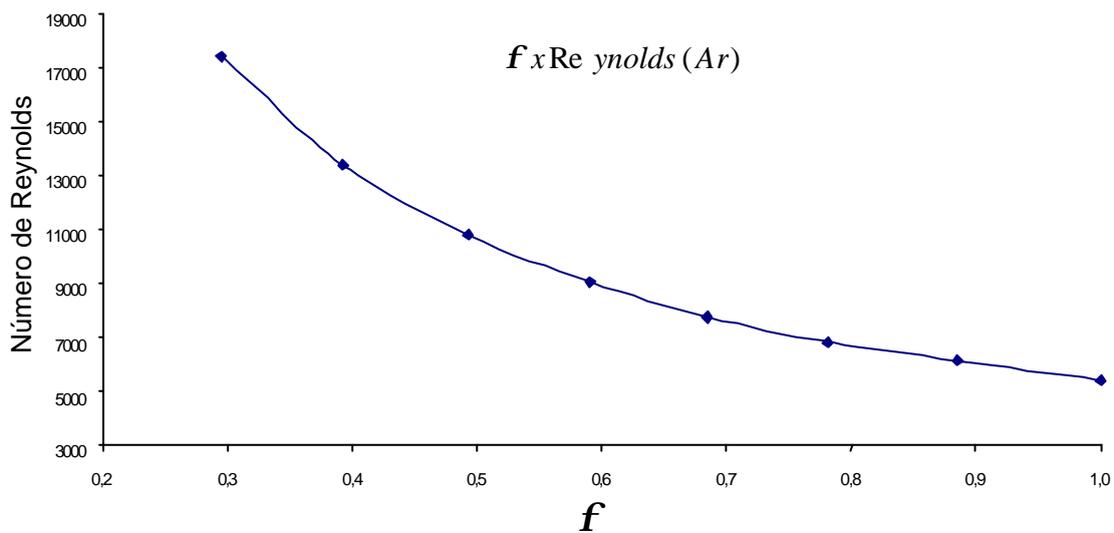


FIGURA 2.12 – Número de Reynolds para o ar em função de f .

As Figuras 2.13 a 2.16 mostram algumas imagens de chamas obtidas nos testes realizados, nota-se que aparentemente possuem regime turbulento, como foi previsto. Em todos os casos temos chamas sem atuação acústica, variando apenas a razão de equivalência destas.



FIGURA 2.13 - Chama com $f = 1,00$ sem atuação.



FIGURA 2.14 - Chama com $f = 0,78$ sem atuação.



FIGURA 2.15 - Chama com $f = 0,49$ sem atuação.



FIGURA 2.16 - Chama com $f = 0,30$ sem atuação.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS E COMENTÁRIOS

Neste Capítulo está reunido o conjunto de resultados experimentais relevantes obtidos no presente trabalho. Para melhor apresentação dos resultados, o Capítulo foi dividido em três seções. Na primeira seção, Análise do Conjunto Queimador – Sistema de Atuação Acústica – Câmara de Combustão, observou-se como o queimador e a câmara de combustão responderam quando as condições de oscilação foram impostas. Nesta primeira seção, ainda se discute a escolha das condições de frequência e amplitude que foram utilizadas nos ensaios relativos às emissões de gases. A segunda seção, Emissão de Gases, apresenta e discute justamente esses resultados. Na terceira seção, Comentários e Comparações, faz-se uma análise entre o processo de combustão convencional e algumas situações de combustão pulsante onde se obteve algum resultado relevante.

3.1 Análise do Conjunto Queimador – Sistema de Atuação Acústica – Câmara de Combustão

O objetivo desses ensaios foi verificar como o conjunto alto-falante – queimador – câmara de combustão responde à imposição de um campo acústico. Inicialmente, sem combustão, mas com ar escoando ao longo do queimador e da câmara, verificou-se para quais frequências de excitação se obtinha alguma resposta favorável de amplitude de pressão no transdutor P1 posicionado no corpo do queimador. Nessas frequências encontradas, amplificou-se o sinal aplicado ao alto-falante até que a tensão máxima suportada por este fosse atingida, 30V, determinando assim as respostas de amplitude de pressão no queimador (P1) e ao longo da câmara (P2, P3 e P4) para situação limite do sistema de atuação. Esse procedimento foi feito para escoamentos de ar correspondentes ao intervalo de razão de equivalência entre 0,30 e 1,00. Os ensaios também foram repetidos para situação de combustão com vazão de 0,30g/s de gás natural; com isso, foi

possível verificar em quais situações a combustão tende a amplificar ou atenuar a oscilação imposta.

As Figuras 3.1 a 3.8 mostram o comportamento da amplitude de pressão no transdutor do queimador (P1) e no primeiro transdutor da câmara de combustão (P2), em função da frequência de oscilação, para as situações com e sem combustão e à medida que a combustão se torna mais pobre em combustível. Os resultados dessas Figuras mostram que qualitativamente a resposta do sistema não se altera com o aumento do excesso de ar, permitindo uma análise global.

Sem a presença de combustão, através de P1, nota-se que o escoamento no interior do queimador responde bem a oscilação imposta pelo alto-falante entre 234Hz e 338Hz, chegando a atingir 64mbar, e em 1230Hz, atingindo 40mbar. No entanto, os resultados apresentados pelo transdutor 2 (P2) mostraram que as oscilações do escoamento na câmara respondem diferente que no interior do queimador. Em 234Hz a oscilação de pressão em P2 apresenta um pico entre 30 e 37mbar, dependendo da razão de equivalência. Provavelmente, neste caso, a frequência do escoamento que emerge do queimador corresponde à frequência natural da cavidade acústica que representa a câmara de combustão. Por outro lado, é interessante notar que em 338Hz, apesar do escoamento interno ao queimador apresentar entre 50mbar e 64mbar, no interior da câmara de combustão a oscilação é totalmente atenuada. Em 1230 Hz, a boa resposta observada no interior do queimador, não se propaga para o interior da câmara de combustão, pois a amplitude de pressão atingiu cerca de 12 mbar em P2, enquanto que em P1 era cerca de 40mbar.

Com a presença de combustão, para algumas razões de equivalência ensaiadas não foi possível aplicar o máximo de tensão permitido pelo alto-falante (30V) em algumas frequências, devido a extinção da chama em tensões inferiores a esse valor, conforme pode ser verificado na Figura 3.9. Desta forma, a amplitude máxima aplicada nessas situações foi aquela onde a chama ainda permanecia ancorada. Para razão de

equivalência igual a 1 ($f = 1,00$) esse problema ocorre entre as frequências de 154Hz e 394Hz. Com o aumento da vazão de ar (redução de f) esse intervalo de sensibilidade na estabilidade da chama vai diminuindo. Para razões de equivalência entre 0,89 e 0,59 esse intervalo fica restrito às frequências de 338Hz e 394Hz. Para razões de equivalência inferiores a 0,59 sempre se pode atingir o limite de tensão permitido pelo alto-falante. A explicação para essa maior estabilidade pode ser atribuída ao fato do aumento da vazão de ar intensificar a estrutura de circulação do escoamento formado à jusante do disco posicionado um pouco abaixo da saída dos jatos de gás combustível, o que facilita o ancoramento e estabilização da chama. A Figura 3.9 mostra a tensão que pode ser aplicada para cada frequência e razão de equivalência.

É importante observar que na fase de testes para se determinar a configuração final do queimador, a ausência do disco mostrou maiores dificuldades para se estabilizar a chama, mesmo para as situações não pulsadas.

Outro fato a se notar, é que para os casos sem oscilação e frequências de 338Hz e 1230Hz, as amplitudes medidas no corpo do queimador (P1) e na base da câmara (P2) foram maiores para situação com combustão do que para sem combustão. Desta forma, pode-se dizer que nessas frequências, além da propagação da onda acústica imposta pelo alto-falante, as condições da chama foram capazes de amplificar essa onda, atendendo ao critério de Rayleigh.

Nos testes a quente, a vazão de água na camisa de refrigeração do combustor foi mantida constante. Além das Figuras 3.1 a 3.8, os resultados dos testes a frio e a quente também são apresentados no Apêndice A.

Analisando os resultados discutidos na presente seção, escolheu-se as frequências de 154Hz, 338Hz, 394Hz, 665Hz, e 1230Hz para os ensaios onde se realizou a análise de gases. As frequências escolhidas foram referentes àquelas onde ocorrem as maiores

amplitudes em P1 e estas se mantêm razoavelmente em P2, para os diferentes excessos de ar. Nessa escolha, levou-se em consideração a faixa onde se tem a melhor resposta do alto-falante, entre 100 a 2500Hz. Verificou-se que a partir de 1600Hz as amplitudes de pressão eram muito baixas, em comparação com valores anteriores.

A frequência de 154Hz foi escolhida por manter para todas as razões de equivalência uma amplitude de pressão relativamente alta e constante em P1 nos testes a frio. Nos ensaios a quente ela se manteve ou foi amplificada em algumas razões de equivalência. Embora a amplitude em P2 tenha sido relativamente baixa nos testes a frio, ela aumentou nos testes a quente para todos os $f's$, como decorrência do processo de combustão.

Nota-se que entre 310 e 338Hz houve aumento progressivo na amplitude de pressão, sendo o valor máximo obtido em 338Hz. As maiores amplitudes de pressão obtidas nos ensaios a frio ocorreram nessa frequência. Nos ensaios a quente houve o problema de estabilização da chama para alguns $f's$, conforme comentado anteriormente.

Tanto nos ensaios a frio como a quente, em 394Hz houve uma boa resposta de amplitude nos sensores P1 e P2, com valores relativamente altos e constantes para todas as razões de equivalência, justificando a sua escolha.

Em 665Hz a amplitude em P1 sofreu um grande aumento nos ensaios com combustão, em relação aos sem combustão. Para alguns $f's$ este aumento chegou a ser de quatro vezes. Tal fato também foi observado no sensor P2.

Em 1230Hz surgiram amplitudes de pressão relativamente altas nos testes a frio, sendo estas amplificadas com o processo de combustão para todos os valores de f , em ambos os sensores P1 e P2.

As demais frequências foram consideradas de menor relevância, pois nessas situações as respostas do conjunto queimador – sistema de atuação acústica – câmara de combustão não foram tão positivas para amplitude de propagação da onda acústica tanto no queimador como na câmara de combustão, em relação às frequências escolhidas.

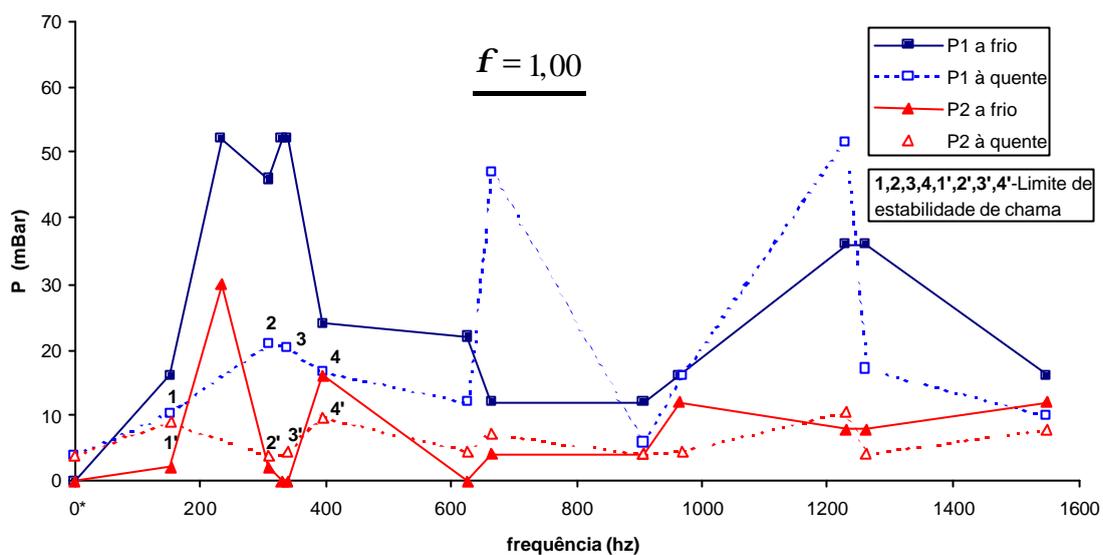


FIGURA 3.1–Efeito da variação da frequência sobre a amplitude de pressão para $f = 1,00$.

Nota: 0* - denota processo sem atuação acústica.

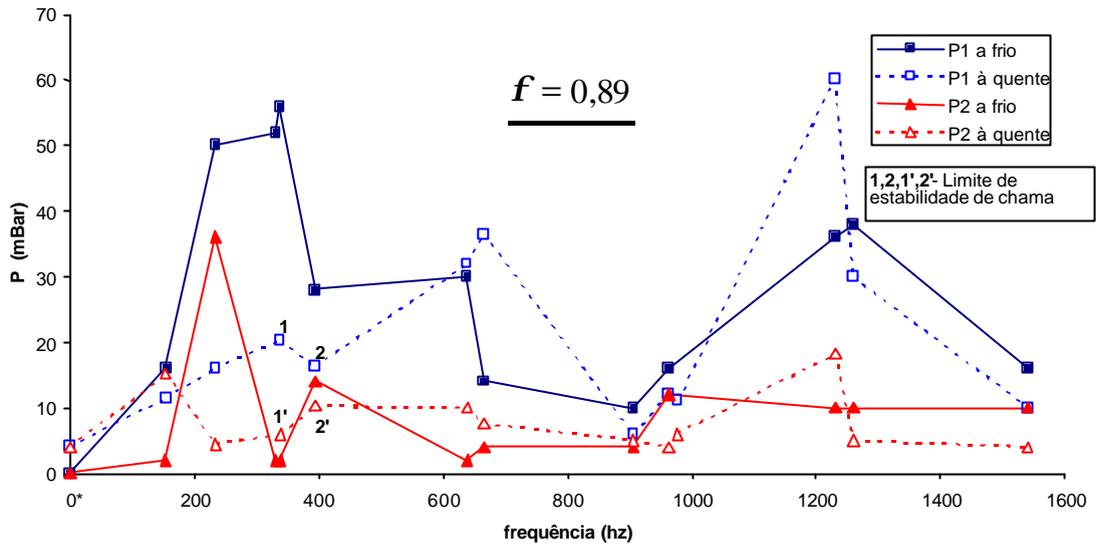


FIGURA 3.2–Efeito da variação da frequência sobre a amplitude pressão para $f = 0,89$.

Nota: 0* - denota processo sem atuação acústica.

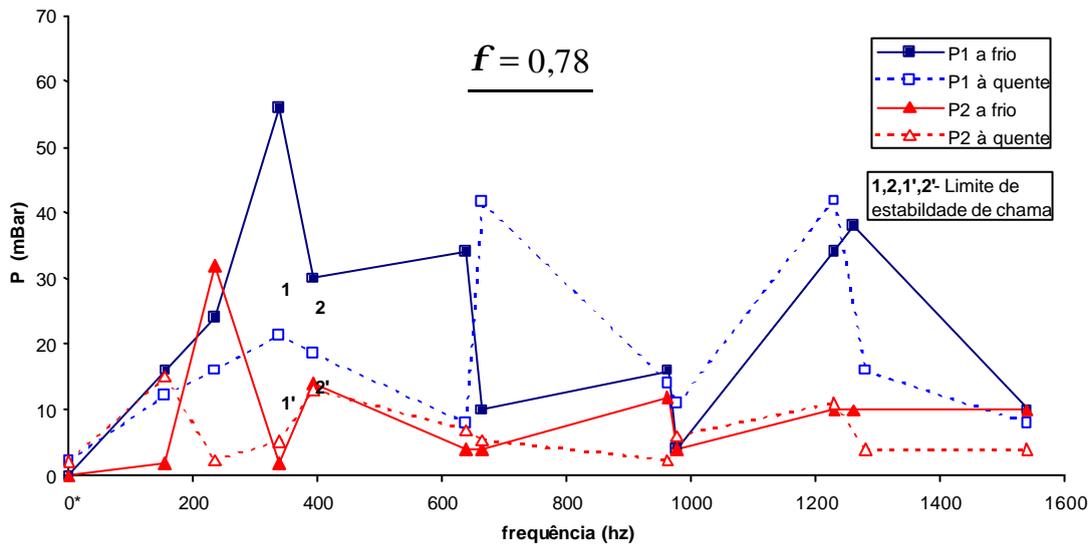


FIGURA 3.3–Efeito da variação da frequência sobre a amplitude de pressão para $f = 0,78$.

Nota: 0* - denota processo sem atuação acústica.

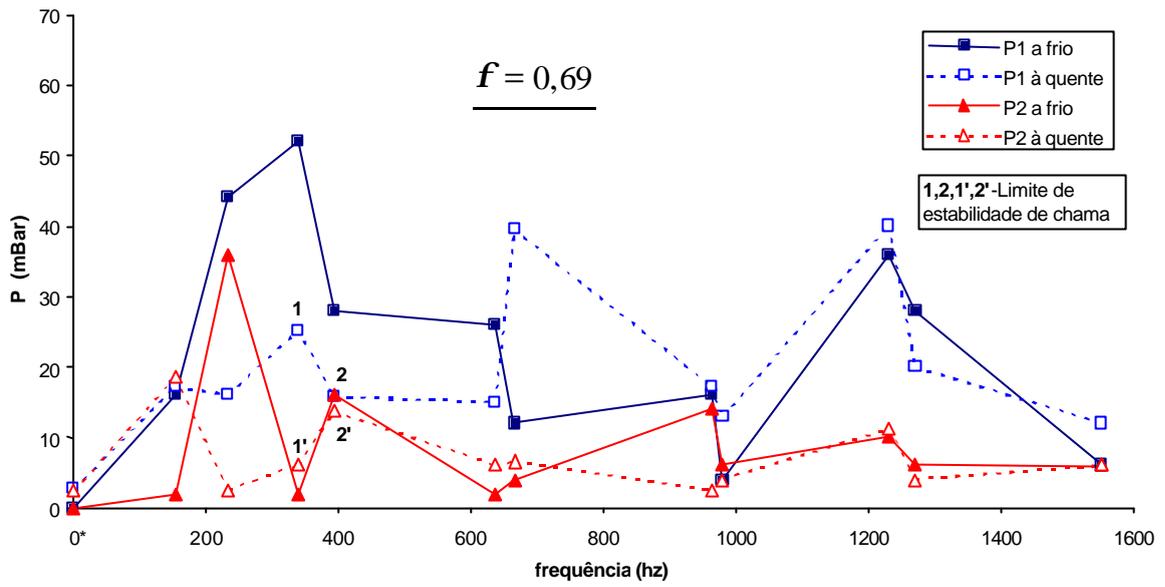


FIGURA 3.4-Efeito da variação da frequência sobre a amplitude de pressão para $f = 0,69$.

Nota: 0* - denota processo sem atuação acústica.

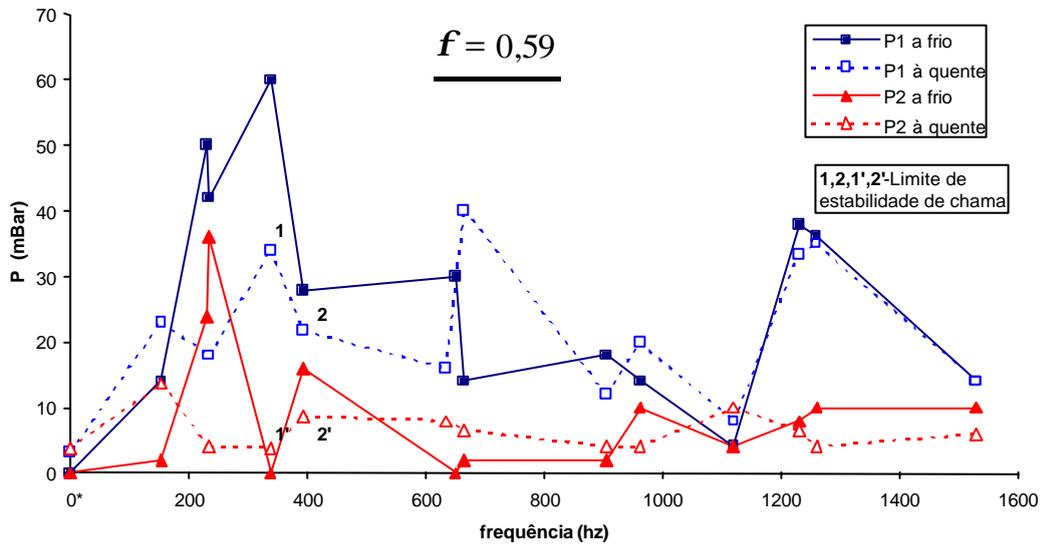


FIGURA 3.5-Efeito da variação da frequência sobre a amplitude de pressão para $f = 0,59$.

Nota: 0* - denota processo sem atuação acústica.

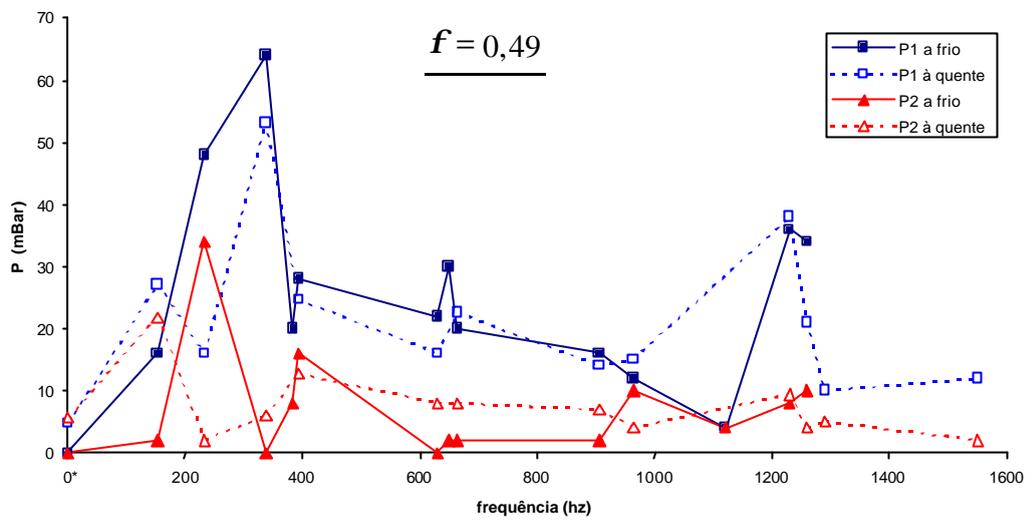


FIGURA 3.6-Efeito da variação da freqüência sobre a amplitude de pressão para $f = 0,49$.

Nota: 0* - denota processo sem atuação acústica.

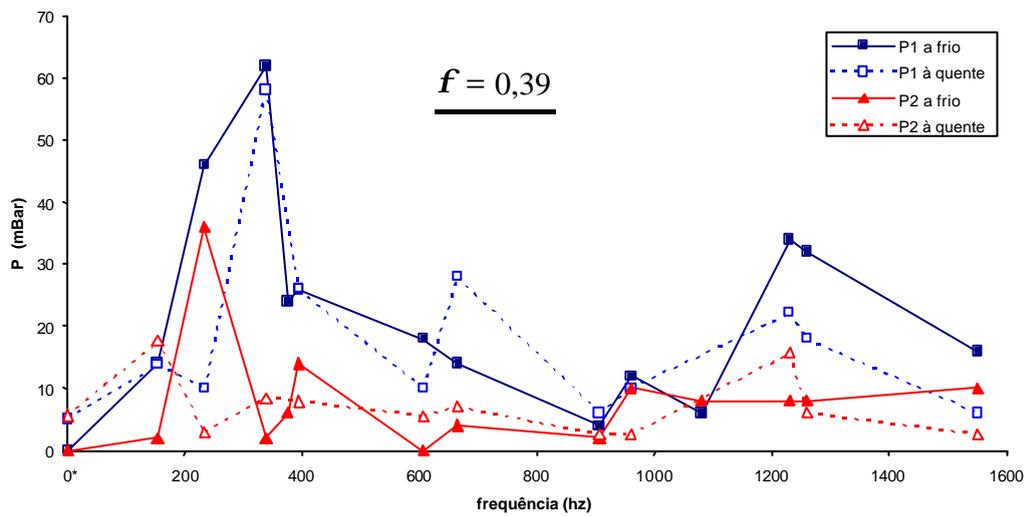


FIGURA 3.7-Efeito da variação da freqüência sobre a amplitude de pressão para $f = 0,39$.

Nota: 0* - denota processo sem atuação acústica.

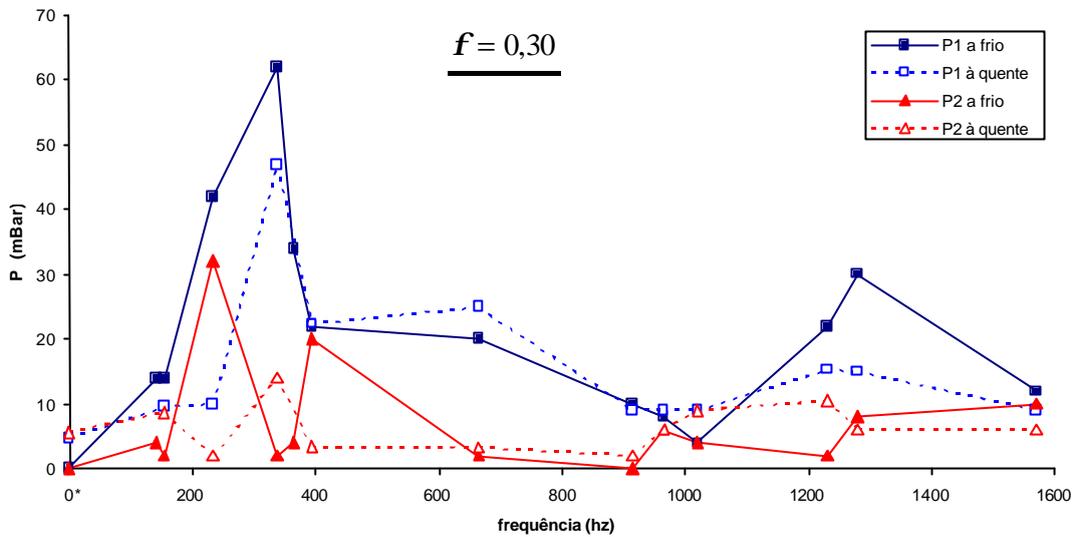


FIGURA 3.8 - Efeito da variação da frequência sobre a amplitude de pressão para $f = 0,30$.

Nota: 0* - denota processo sem atuação acústica.

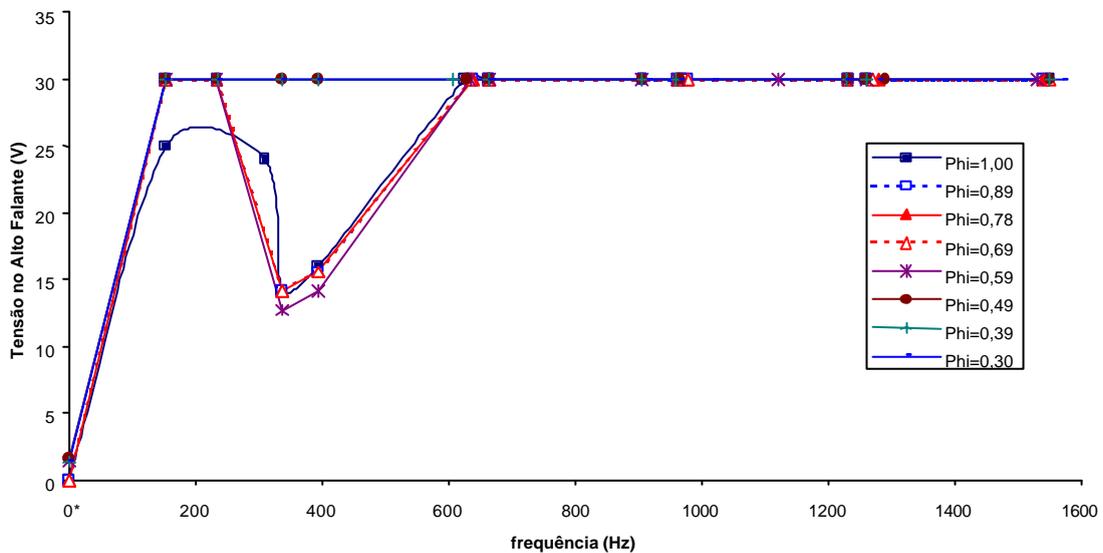


FIGURA 3.9—Máxima tensão que pode ser proporcionada ao alto-falante. As tensões abaixo de 30V indicam situações de instabilidade de chama.

Nota: 0* - denota processo sem atuação acústica.

As Figuras 3.10 a 3.17 apresentam as razões entre os resultados obtidos nos transdutores de pressão posicionados ao longo da câmara (P2, P3 e P4) e o obtido no corpo do queimador (P1), em função do próprio valor em P1, para diferentes frequências, f 's e

potência máxima possível fornecida pelo alto-falante. Tais curvas mostram como a amplitude de oscilação acústica se propaga ao longo da câmara, em relação à amplitude que é medida no corpo do queimador, imposta pelo alto-falante.

Observa-se que a forma de propagação da onda acústica ao longo do combustor varia não só com o f , mas também com a frequência. Sem atuação acústica, o próprio processo de combustão gera oscilação, e esta se propaga com amplitude uniforme ao longo do combustor e no interior do duto de ar do queimador, para todas as razões de equivalência.

Em 154Hz, para as três razões de pressão analisadas ao longo da câmara, a amplitude é maior nas proximidades do queimador (P2) e o centro da câmara é o ponto de mínimo (P3). Para $f = 0,39, 0,69, 0,78$ e $0,89$, a P2 é maior que a amplitude de atuação (P1), indicando que a própria combustão amplificou a oscilação.

Em 338Hz a amplitude se mantém constante ao longo da câmara, no entanto com valores entre 15 e 30% da amplitude observada em P1.

Em 394Hz há uma tendência de aumento das razões de pressão em relação a 338Hz. Nota-se que o centro da câmara (P3) torna-se o ponto de máxima amplitude e as razões de pressão vão aumentando à medida que f diminui, atingindo o máximo em $f = 0,69$, onde se tem P3/P1 maior que 1. Para excessos de ar maiores que $f = 0,69$ há uma tendência de redução nas razões de pressão. Tal resultado é semelhante ao observado por Lacava (1995) queimando álcool etílico em um combustor pulsante tipo tubo de Rijke. Conforme apresentado na Figura 3.11, com a redução de f há um acentuado aumento do número de Reynolds na câmara, o que intensifica a mistura entre os reagentes concentrando a chama nas proximidades do queimador, criando uma condição favorável para que energia liberada amplifique a propagação da onda acústica. Por outro lado, a partir de um certo ponto, o empobrecimento da mistura faz com que o excedente

de oxidante seja tal que a energia anteriormente disponibilizada para gerar ou amplificar as oscilações, agora simplesmente aquece esta massa de ar adicional.

Em 665Hz o comportamento é semelhante ao de 338Hz, ou seja, a propagação da onda se mantém aproximadamente uniforme e com baixas razões de pressão.

Em 1230Hz o comportamento também foi semelhante ao de 338 e 665Hz, apenas para vazões altas de ar ($f = 0,39$ e $0,30$), houve amplificação no sinal acústico com relação a 665Hz.

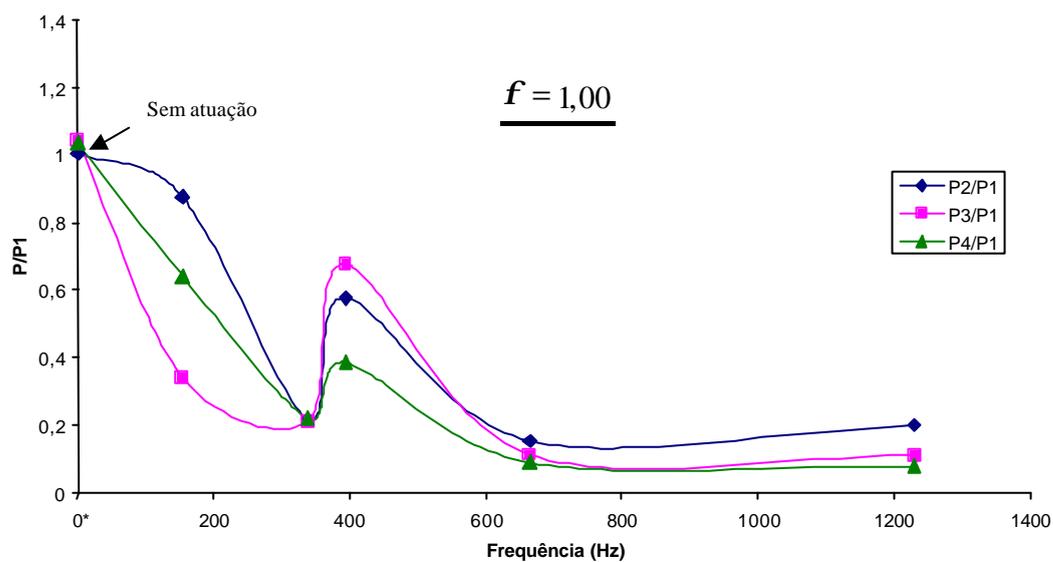


FIGURA 3.10 – Eficiência da atuação para $f = 1,00$.

Nota: 0* - denota processo sem atuação acústica.

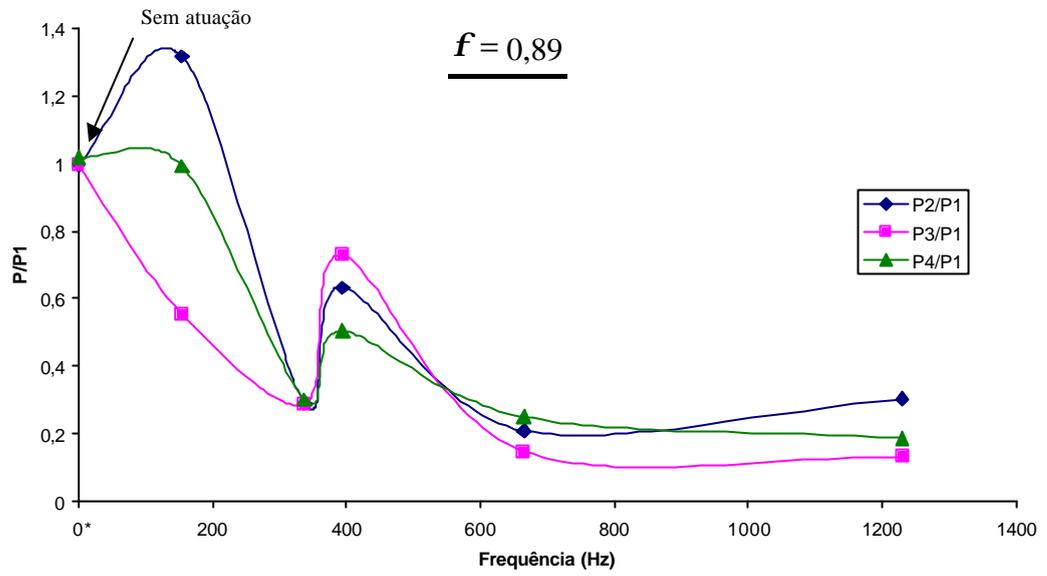


FIGURA 3.11 – Eficiência da atuação para $f=0,89$.

Nota: 0* - denota processo sem atuação acústica.

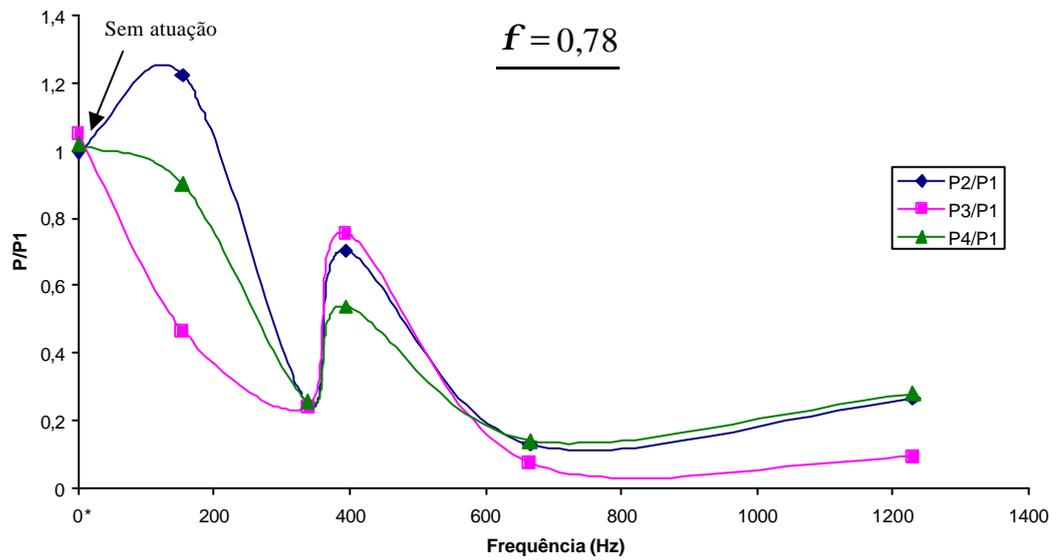


FIGURA 3.12 - Eficiência da atuação para $f = 0,78$.

Nota: 0* - denota processo sem atuação acústica.

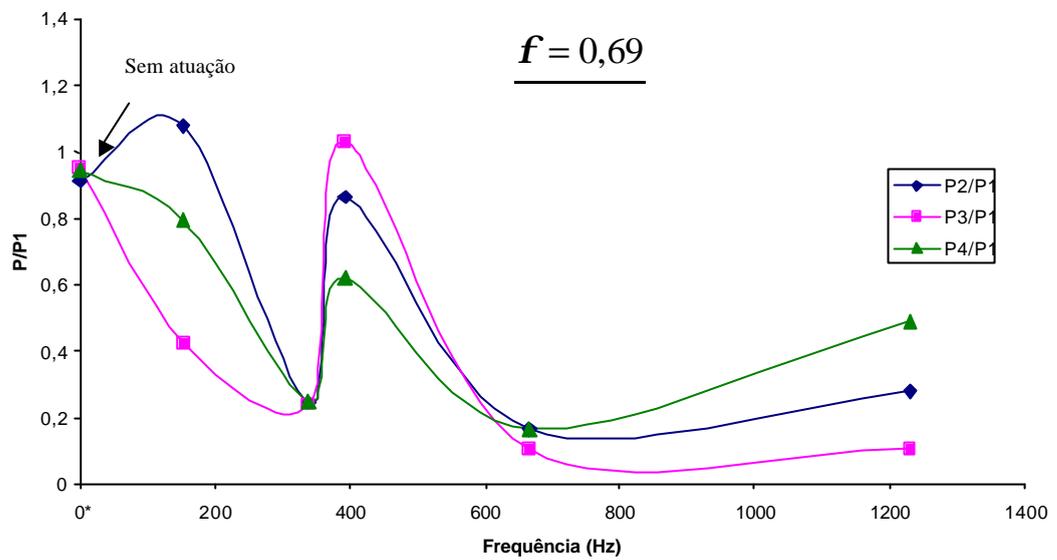


FIGURA 3.13 - Eficiência da atuação para $f = 0,69$.

Nota: 0* - denota processo sem atuação acústica.

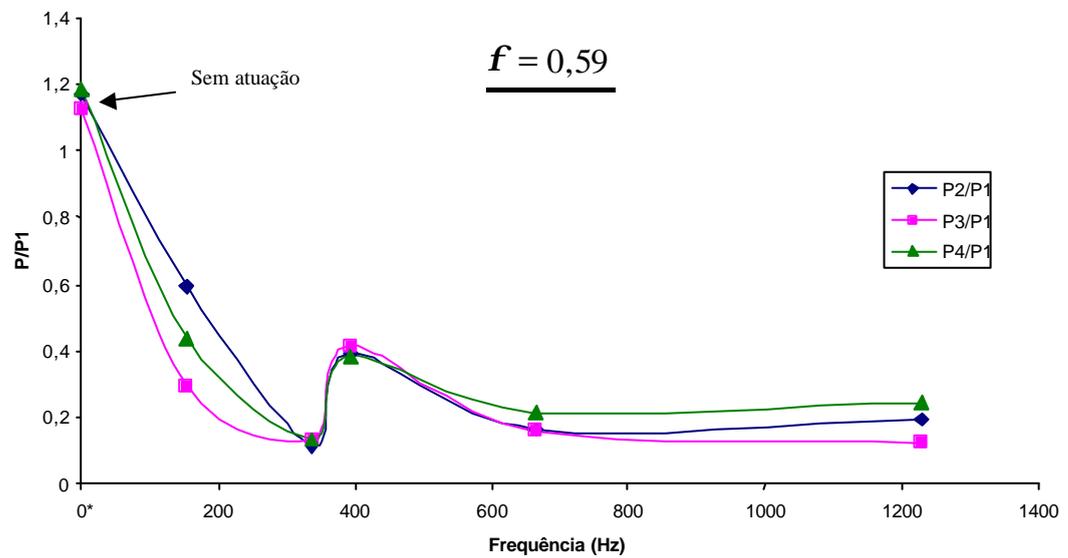


FIGURA 3.14 - Eficiência da atuação para $f = 0,59$.

Nota: 0* - denota processo sem atuação acústica.

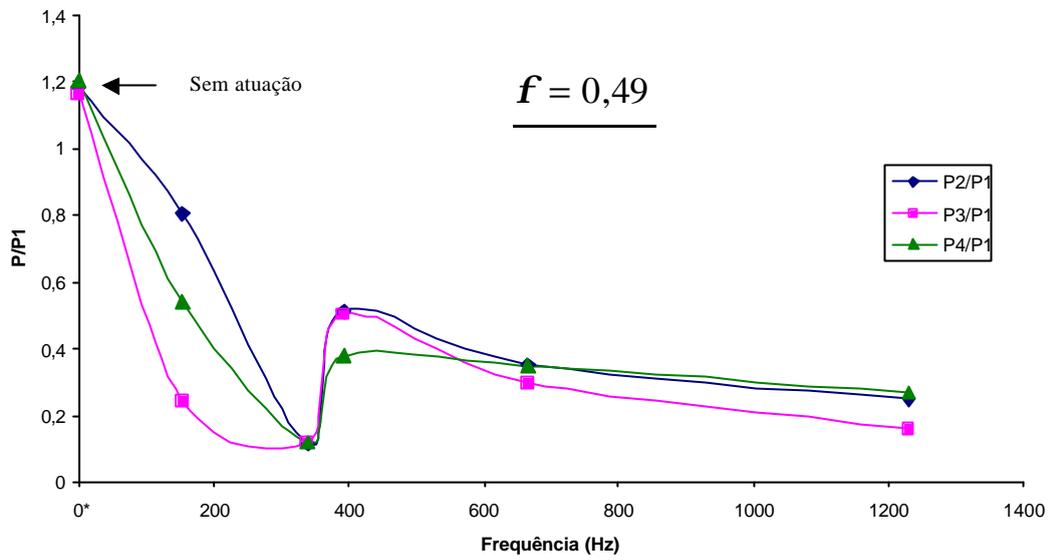


FIGURA 3.15 - Eficiência da atuação para $f = 0,49$.

Nota: 0* - denota processo sem atuação acústica.

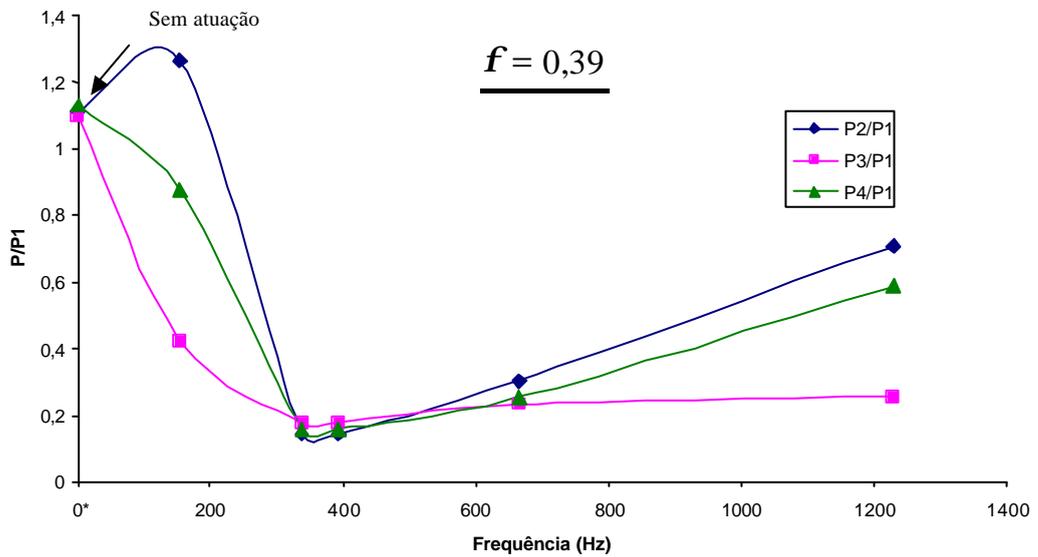


FIGURA 3.16 - Eficiência da atuação para $f = 0,39$.

Nota: 0* - denota processo sem atuação acústica.

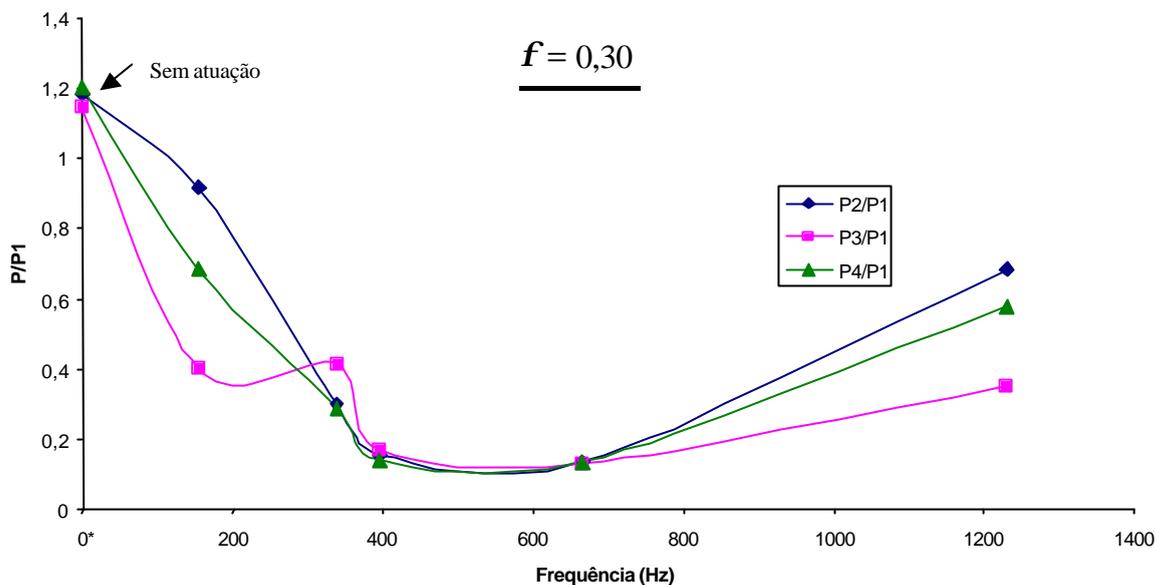


FIGURA 3.17 - Eficiência da atuação para $f = 0,30$.

Nota: 0* - denota processo sem atuação acústica.

3.2 Emissão de Gases

A análise dos gases da exaustão se torna essencial para se verificar a eficiência de queima e emissão de poluentes na combustão pulsante. Nesta seção são apresentados os resultados da concentração dos gases de exaustão, mais precisamente CO e NO_x para diversas razões de equivalência e frequências, em função da amplitude de pressão (P1).

As concentrações de O₂ e CO₂ podem ser indicadores de como se desenvolve o processo de combustão. No entanto, isso também pode ser observado através da concentração de CO. Sendo assim, como em todos ensaios houve coerência entre as emissões de O₂, CO₂ e de CO, para evitar redundância o presente Capítulo se limita a apresentar os resultados apenas deste último, já que este também se apresenta como um poluente preocupante. Contudo, no Apêndice A pode ser encontrado o resultado completo da análise de gases,

para todas as frequências, amplitudes de pressão e razão de equivalência abordadas nos ensaios.

3.2.1 – Emissões para $f = 1,00$

As Figuras 3.18 e 3.19 mostram a concentração de CO [%] e NO_x [ppm], respectivamente, em função da amplitude de pressão medida no transdutor 1 para $f = 1,00$.

Nota-se que na estequiometria há uma grande emissão de CO para situação sem atuação acústica, cerca de 1,5%. Para as frequências 154Hz, 338Hz e 394Hz, inicialmente o aumento da amplitude do campo acústico intensificou a mistura reagente e houve uma redução na emissão de CO. Contudo, quando a amplitude se aproxima do valor limite para a presença de uma chama estabilizada à jusante do queimador (ver Figura 3.1), há uma tendência de aumentar a emissão desse poluente; no entanto, ainda em um nível inferior ao da situação não pulsada. Provavelmente, o problema da estabilidade de chama nessas situações limites de amplitude, afeta de forma negativa o processo de mistura entre os reagentes.

Para essas mesmas frequências (154Hz, 338Hz e 394Hz) há um comportamento inverso ao da emissão de CO para o NO_x, o que é de se esperar de acordo com conhecimentos prévios na literatura (Lefebvre, 1983), visto a resposta antagônica no processo de formação desses poluentes com a intensidade de mistura. Segundo Lyons (1981), há o incremento da intensidade da mistura entre reagentes nas proximidades da introdução desses, em proporção estequiométrica. Este fato está relacionado com a distribuição de temperatura mais uniforme nas regiões de chama e pós chama em torno de um valor mais alto, quando a taxa de mistura aumenta. A Figura 3.20 mostra a temperatura média obtida no termopar 1 (10cm de base do combustor) em função da amplitude de atuação (P1) e para várias frequências. Nota-se que o comportamento observado para o NO_x na Figura 3.19 segue o da temperatura para qualquer frequência.

Um comportamento surpreendente observado foi para a frequência de 665Hz onde tanto a emissão de NO_x como a de CO aumentaram. Para uma melhor compreensão dos fatos seriam necessários diagnósticos feitos na região de combustão, o que não foi previsto no presente trabalho. Aparentemente, pode-se pensar que a estrutura criada na região de queima nessa frequência pode ter ocasionado situações extremas. É possível que parte da queima tenha se dado em condições de combustão rica, em razão de uma hipotética deficiência de mistura entre os reagentes. Quando os produtos de combustão de oxidação parcial formados nessas regiões, como o CO, se misturem com oxidante remanescente, não encontram condição para propagação do mecanismo reacional em função da queda acentuada de temperatura ao longo da câmara devido a parede resfriada. Por outro lado, o aumento do NO_x indica que parte da zona de queima ocorre sobre intensa mistura entre os reagentes, provavelmente com razões de equivalência e temperaturas favoráveis ao mecanismo de formação desse poluente. Contudo, a existência dessas condições extremas para dinâmica de mistura entre os fluxos de reagentes é apenas uma hipótese levantada, não sendo possível comprová-la apenas com os resultados aqui obtidos.

Analisando os resultados para as emissões de CO, NO_x , O_2 e CO_2 (esses dois últimos apresentados no Apêndice A) e para a temperatura medida no termopar 1, observa-se que para a frequência de 1230 Hz não há alteração significativa no processo de combustão. Utilizando a mesma câmara de combustão do presente trabalho, Ferreira, 2001, através de uma análise visual baseada em tomografia de chama, notou que para frequências acima de 900Hz a presença do campo acústico obtido através de excitação na linha de combustível, pouco alterava a geometria de uma chama predominantemente difusiva (16% de pré-mistura) de um jato de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) queimado com ar atmosférico com $f=0,9, 1,0$ e $1,1$.

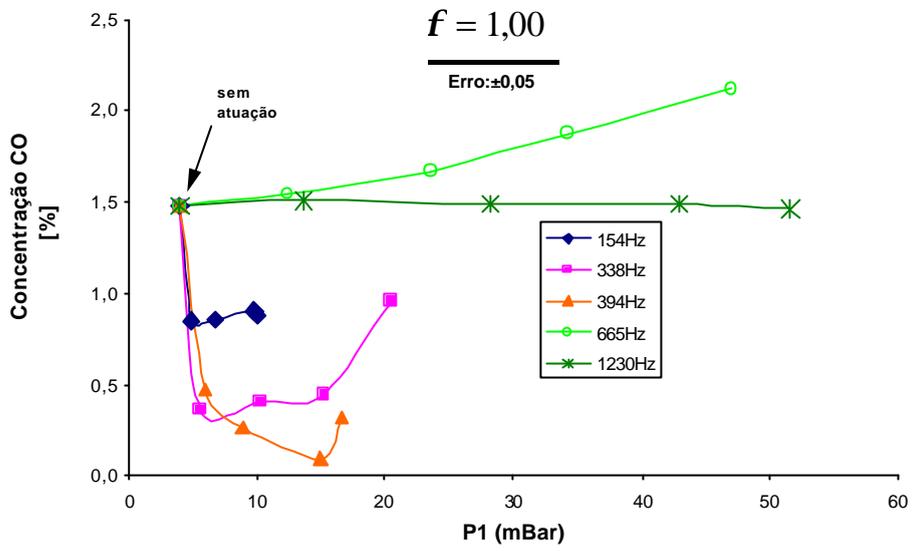


FIGURA 3.18 – Emissão de CO para $f = 1,00$.

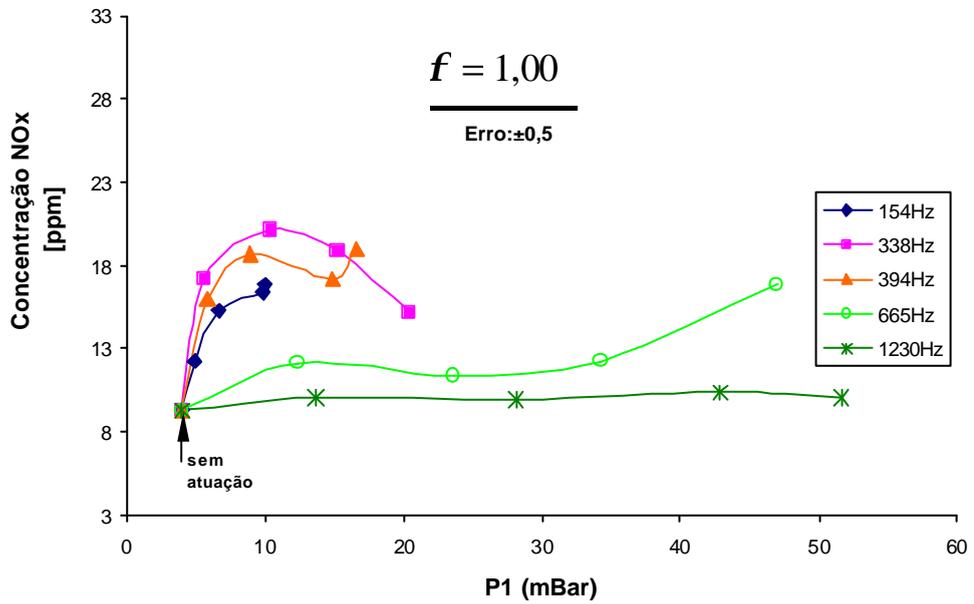


FIGURA 3.19 – Emissão de NO_x para $f = 1,00$.

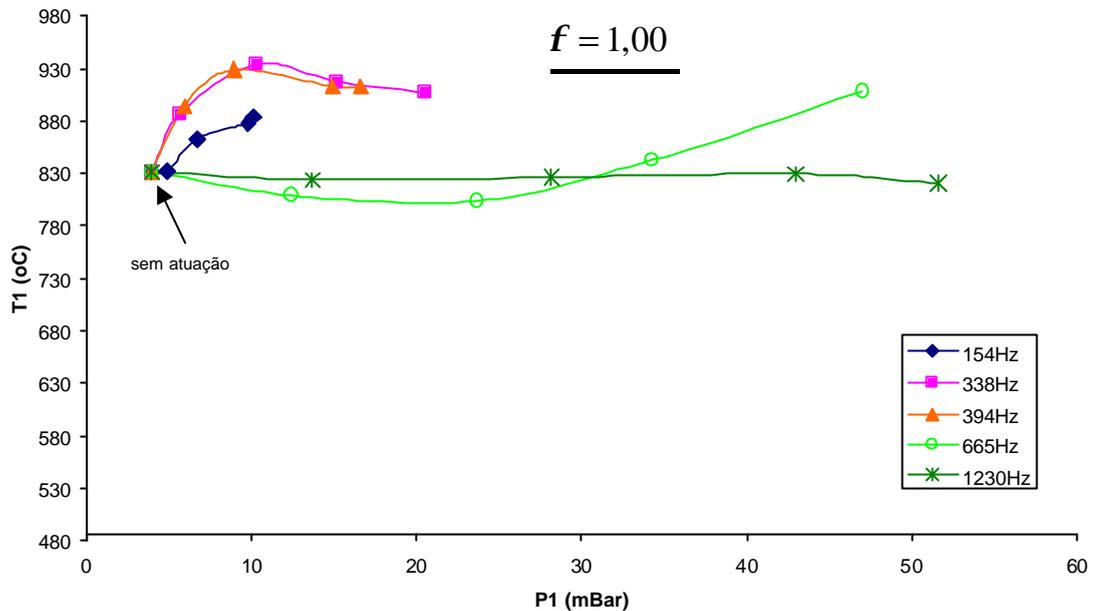


FIGURA 3.20 – Temperatura a 10 cm do queimador em função de P1 para várias frequências e $f = 1,00$.

3.2.2 – Combustão com Excesso de Oxidante entre $f = 0,89$ e $f = 0,59$.

Nesta subseção estão apresentados os resultados entre $f = 0,89$ e $f = 0,59$, pois nesta faixa de razão de mistura, aumentando a vazão de oxidante, os comportamentos qualitativos da análise de gases e da temperatura medida no termopar 1 seguem os observados $f = 1,00$. Desta forma, a maior parte dos comentários feitos na subseção anterior podem ser considerados válidos, salvo algumas particularidades abordadas na sequência.

As Figuras 3.21, 3.22 e 3.23 mostram as emissões de CO e NO_x e a temperatura no termopar 1 para $f = 0,89$, respectivamente. Como era de se esperar, mesmo para a situação sem atuação acústica há uma acentuada redução na emissão CO que caiu de 1,48% para 0,17%. Esta acentuada redução da emissão de CO também é observada para

as frequências de 154Hz, 338Hz e 394Hz, chegando a valores inferiores ao erro de leitura do analisador (0,01%) entre amplitudes de 9mbar a 20mbar.

A emissão de NO_x para $f = 0,89$ diminuiu em relação a $f = 1,00$; no entanto, como o excesso de oxidante aumentou, os gases estão mais diluídos e uma comparação direta só poder ser feita se os valores fossem convertidos para uma determinada porcentagem de O_2 na saída da câmara. Contudo, como o interesse maior é comparar as situações de regime oscilatório com as sem atuação para um mesmo f , esta conversão não se faz necessária.

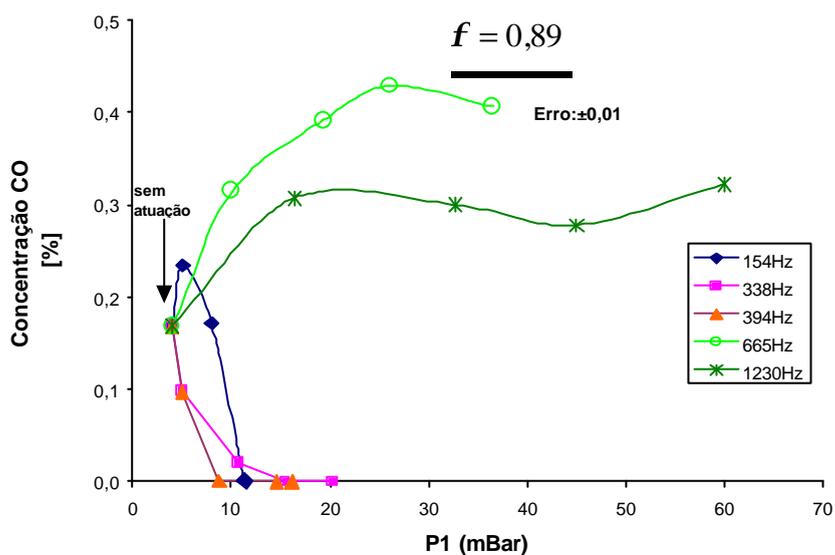


FIGURA 3.21 – Emissão de CO para $f = 0,89$.

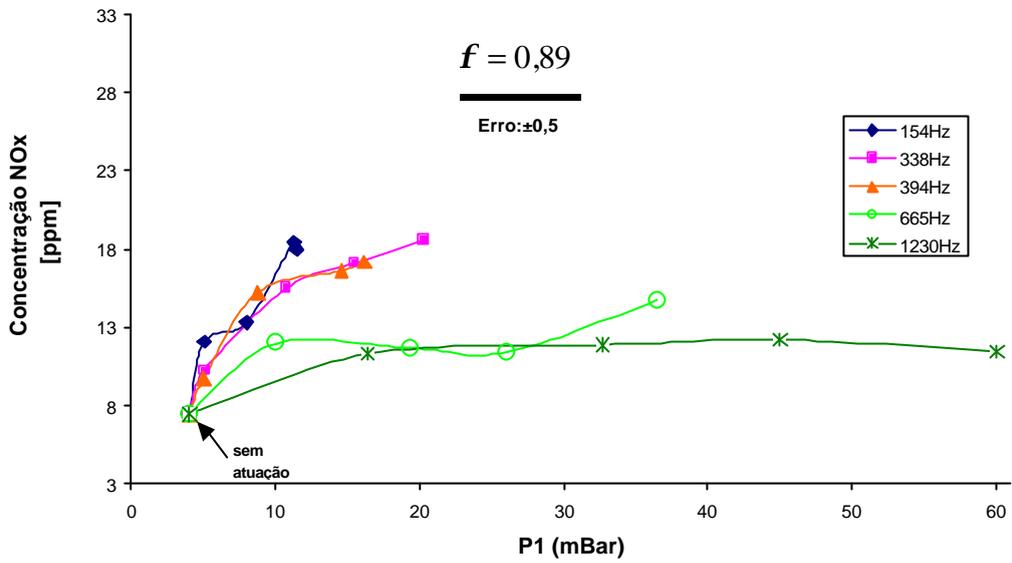


FIGURA 3.22 – Emissão de NO_x para $f = 0,89$.

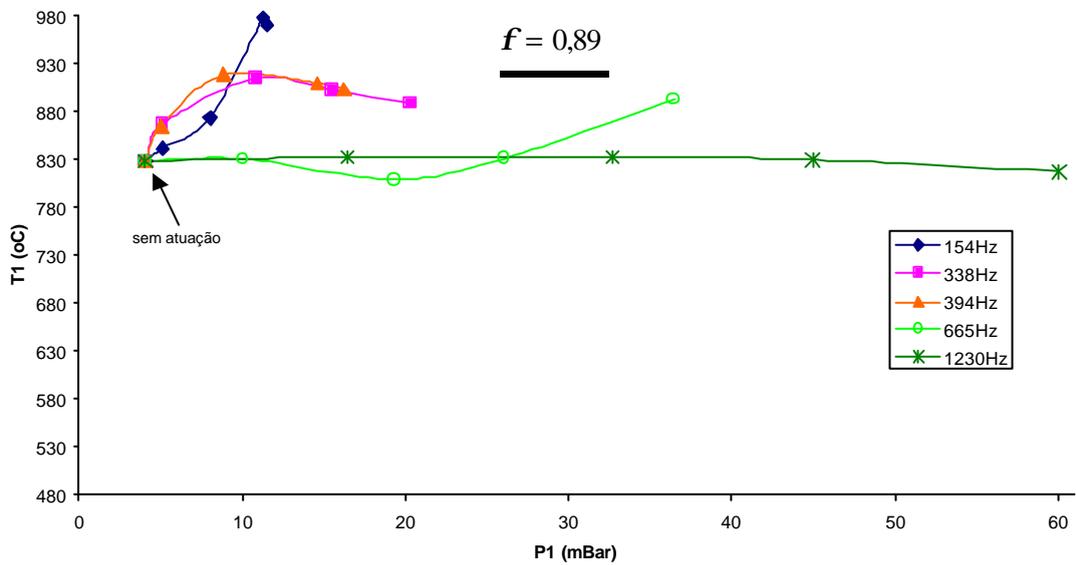


FIGURA 3.23 – Temperatura a 10 cm do queimador em função de P_1 para várias frequências e $f = 0,89$.

As Figuras 3.24, 3.25 e 3.26 apresentam as concentrações de CO e NO_x e a temperatura no termopar 1 para $f = 0,78$, respectivamente. As Figuras 3.27, 3.28 e 3.29 apresentam essa mesma seqüência para $f = 0,69$ e as Figuras 3.30, 3.31 e 3.32 para $f = 0,59$. Nessas condições de f os teores de CO se tornaram muito próximos do erro do analisador (0,01%).

Quanto a emissão de NO_x, nota-se que para f 's = 0,78, 0,69 e 0,59 começam a ocorrer situações onde as taxas de emissão deste poluente aparecem com valores inferiores aos da situação sem pulsação. Com o aumento do excesso de oxidante, a intensificação da mistura pode representar uma distribuição de temperatura mais homogênea em torno de um valor médio mais baixo (Lyons, 1981), ao contrário do que se observa na situação de combustão estequiométrica. Desta forma, é possível que para determinadas combinações de amplitude e freqüência o incremento da mistura tenha sido favorável à redução da emissão de NO_x.

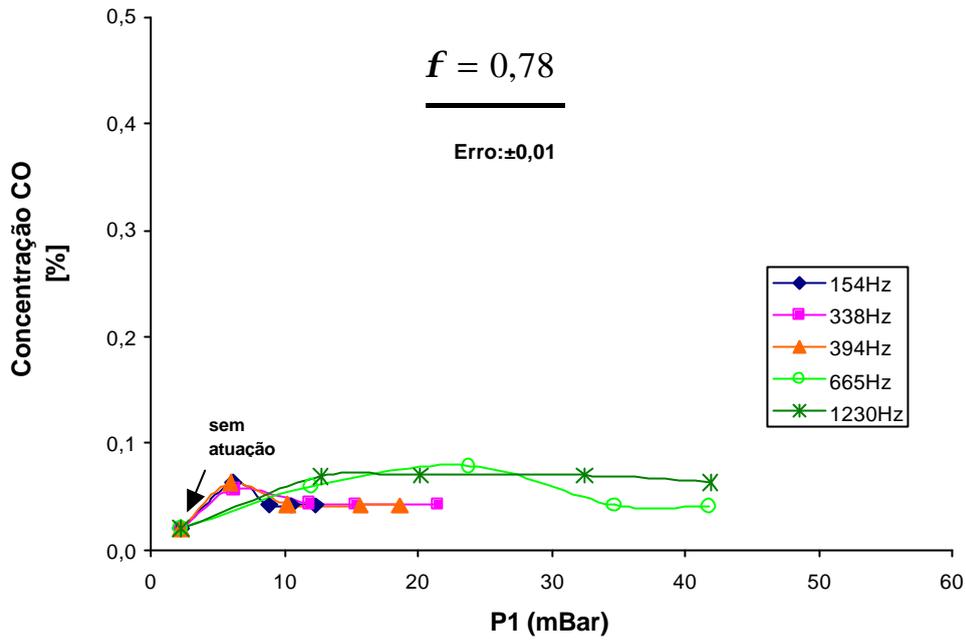


FIGURA 3.24 – Emissão de CO para $f = 0,78$.

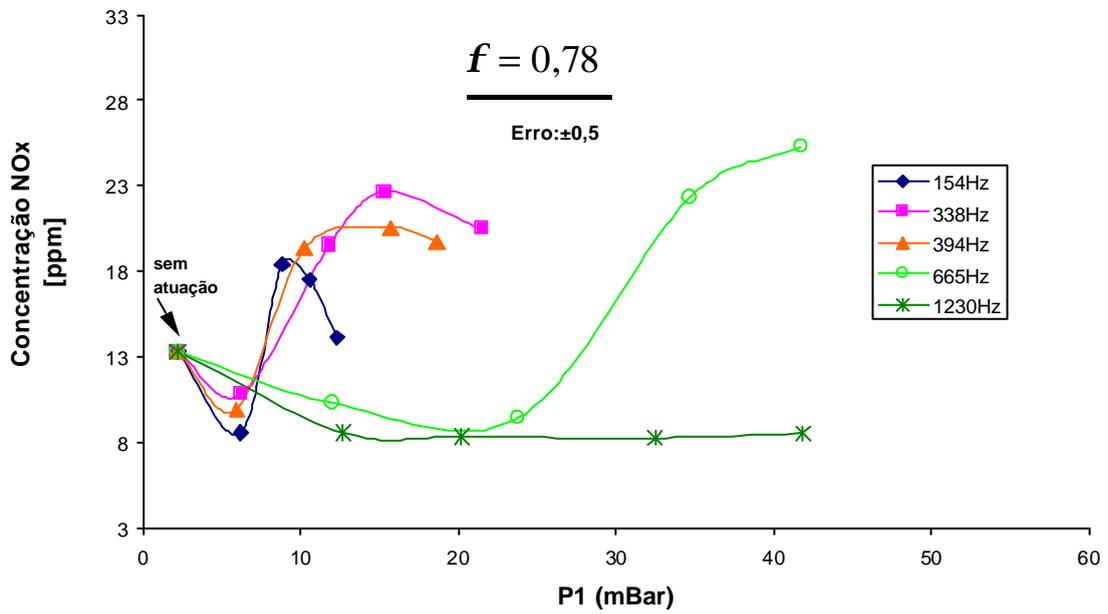


FIGURA 3.25 – Emissão de NO_x para $f = 0,78$.

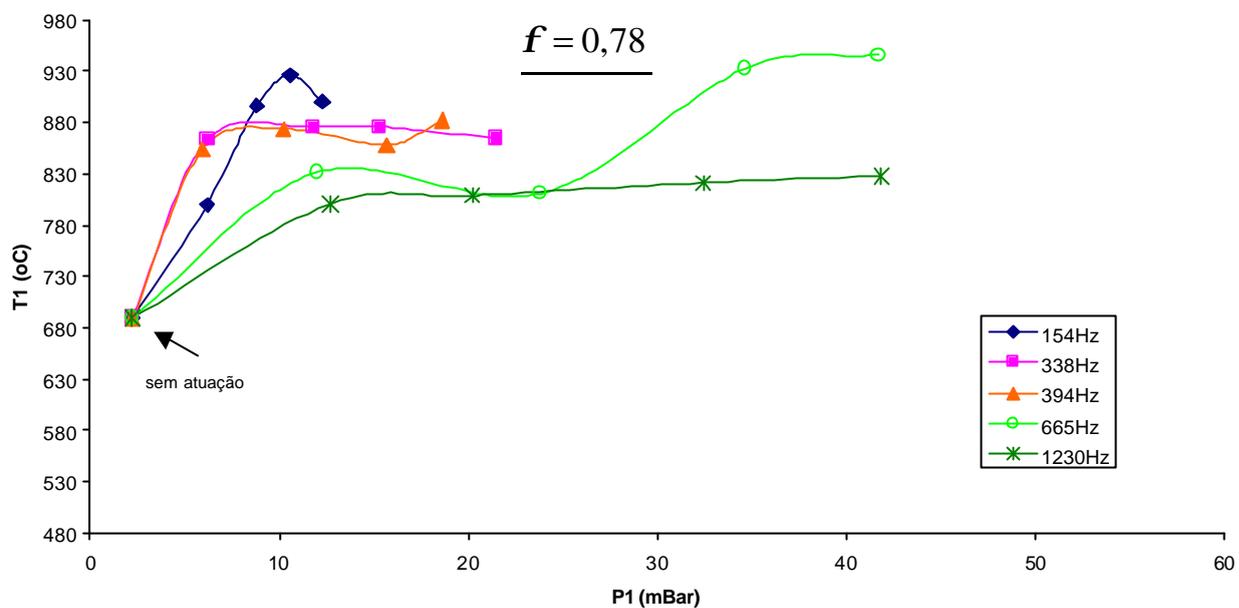


FIGURA 3.26 – Temperatura a 10 cm do queimador em função de P1 para várias frequências e $f = 0,78$.

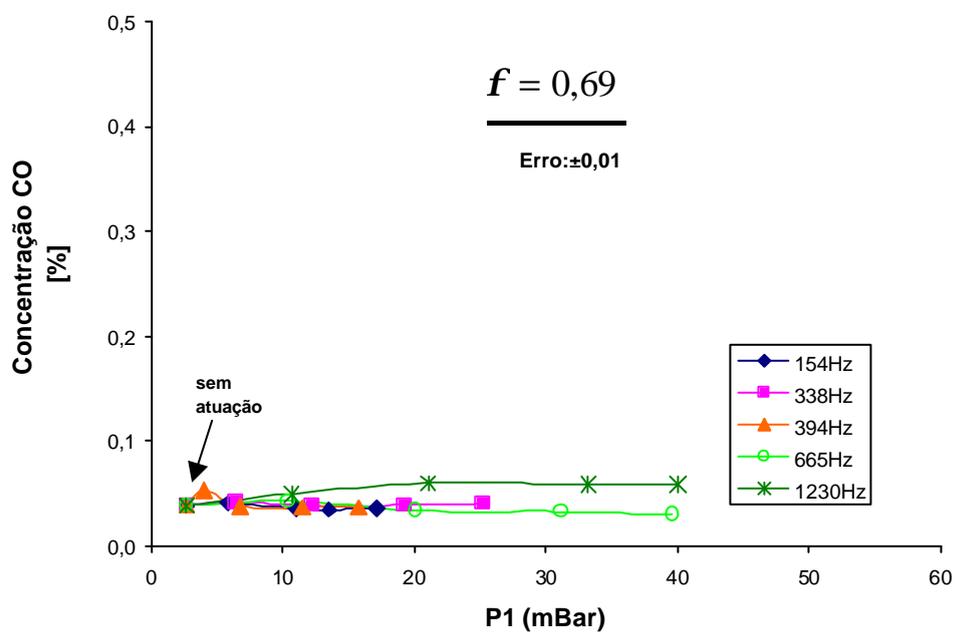


FIGURA 3.27 – Emissão de CO para $f = 0,69$.

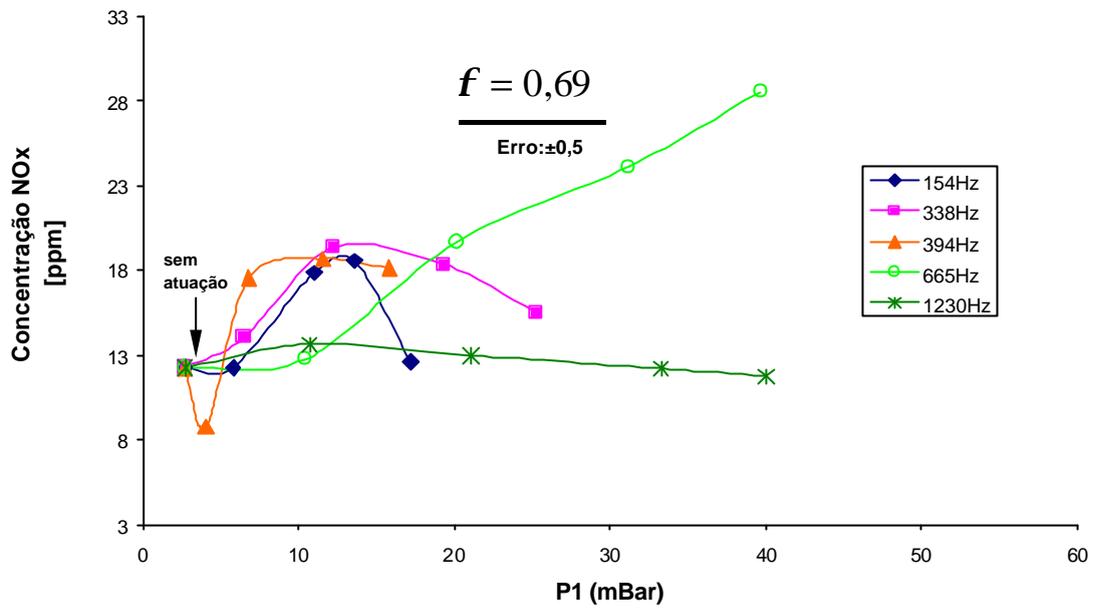


FIGURA 3.28 – Emissão de NO_x para $f = 0,69$.

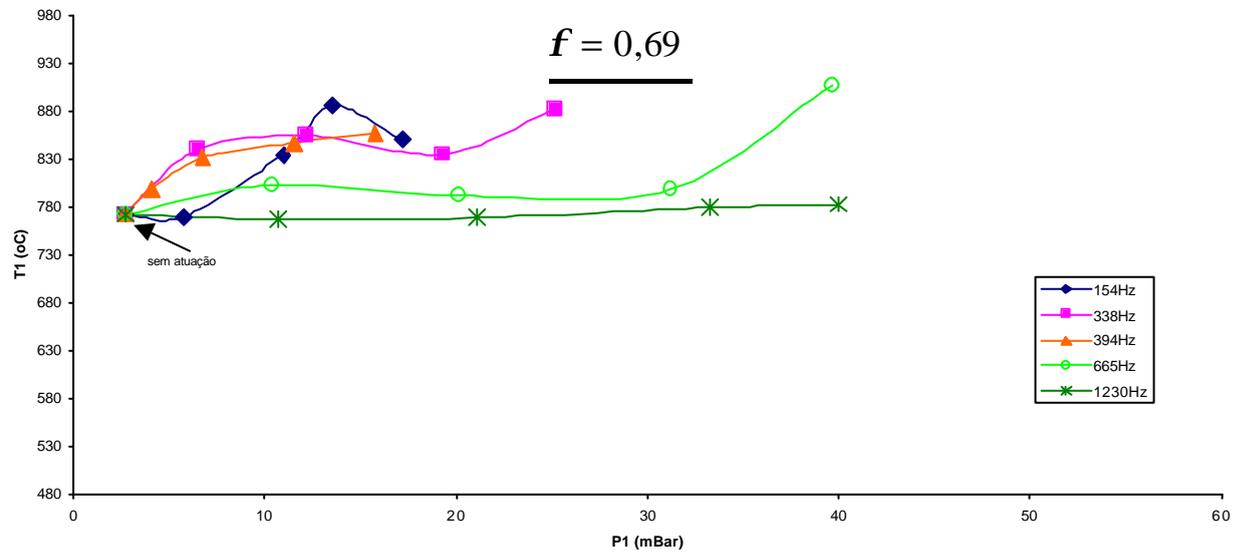


FIGURA 3.29 – Temperatura a 10 cm do queimador em função de P1 para várias frequências e $f = 0,69$.

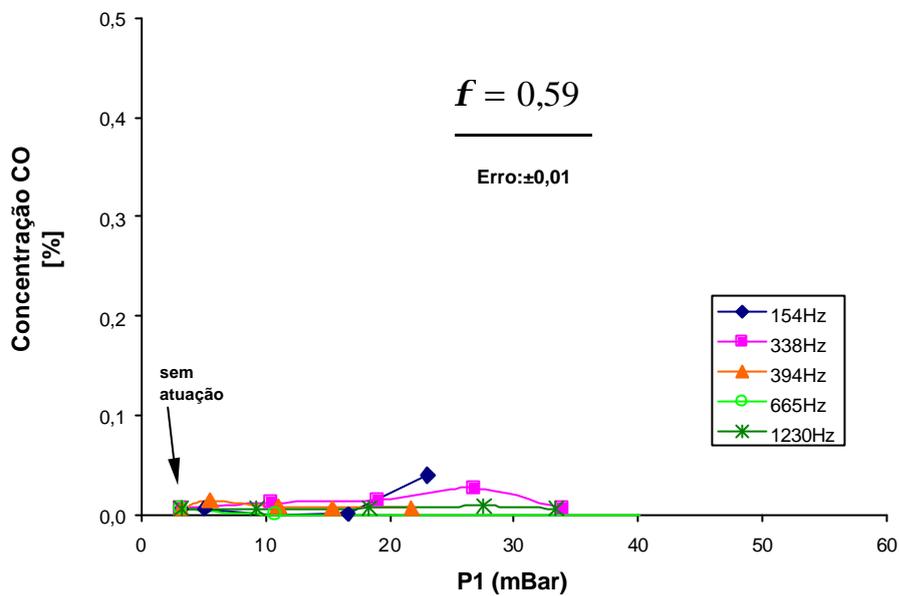


FIGURA 3.30 – Emissão de CO para $f = 0,59$.

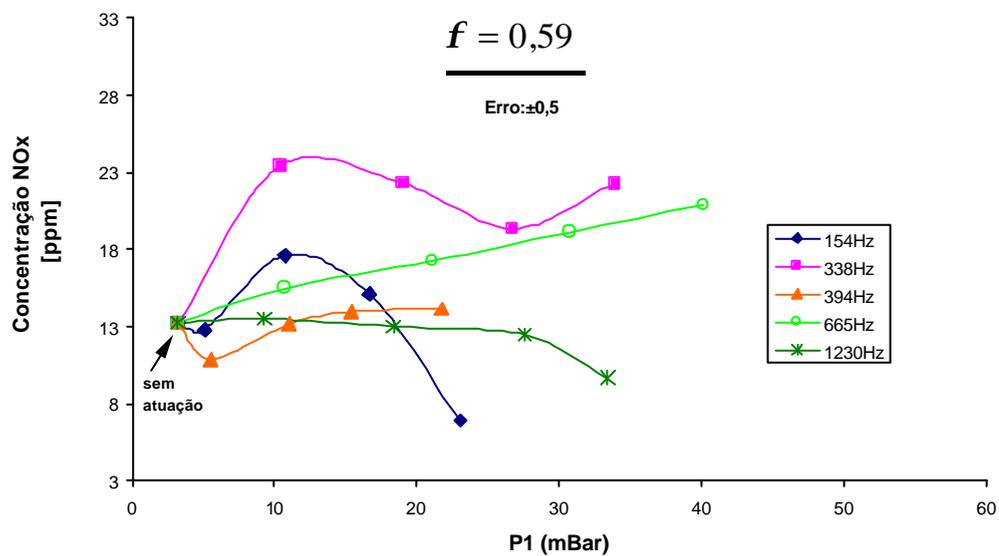


FIGURA 3.31 – Emissão de NO_x para $f = 0,59$.

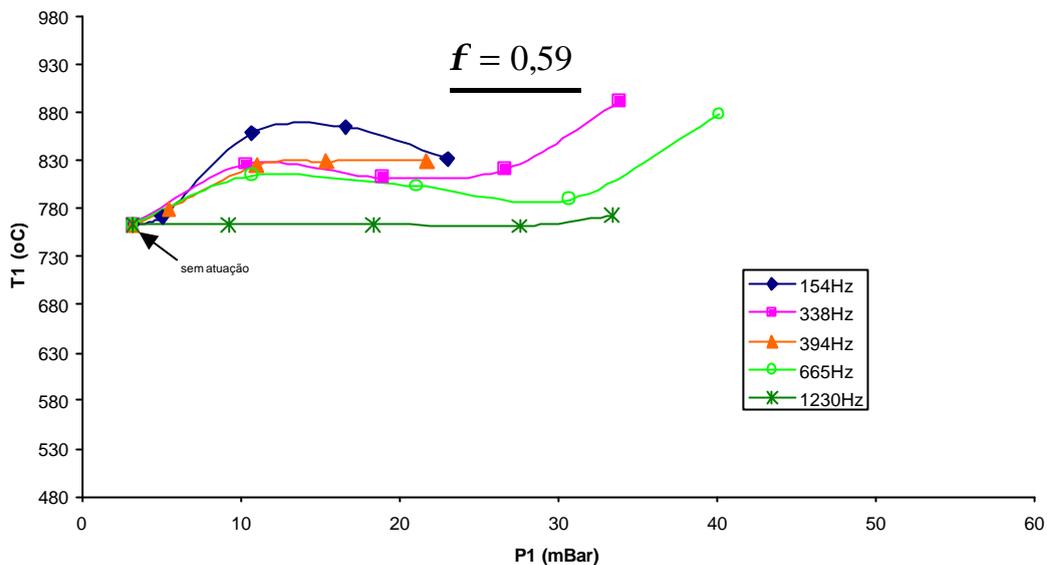


FIGURA 3.32 – Temperatura a 10 cm do queimador em função de P_1 para várias frequências e $f = 0,59$.

3.2.3 – Combustão com Excesso de Oxidante entre $f = 0,49$ e $f = 0,30$.

Esta faixa de excesso de oxidante apresenta uma mudança bastante radical para o comportamento da emissão de gases e temperatura no termopar 1, em comparação com certas tendências que foram observadas nas subseções anteriores.

Para $f = 0,49$, conforme mostra a Figura 3.33, a emissão de CO aumenta consideravelmente em relação ao que se observa na Figura 3.30 para $f = 0,59$. Além disso, ao contrário dos resultados anteriores, o aumento da amplitude para as frequências de 154Hz, 338Hz e 394Hz aumentou a emissão de CO.

Retornando ao Capítulo 2, mais precisamente à Figura 2.15, que apresenta uma fotografia da chama sem a presença do campo acústico para $f = 0,49$. Comparando

essa imagem com as das Figuras 2.13 e 2.14, que são para $f = 1,00$ e $f = 0,78$, respectivamente, nota-se que a região de chama para $f = 0,49$ é menos abrangente e menos intensa, indicando que em algumas regiões a combustão não ocorre; além disso, conforme mostra a Figura 3.33 a presença do campo acústico e o aumento da amplitude em alguns casos pioraram essa situação. Esse comportamento pode estar relacionado com o comportamento do número de Reynolds apresentado na Figura 2.12, também no Capítulo 2. A Tabela 2.2 mostra que há um intenso aumento da vazão de ar com a redução de f ; desta forma, com a velocidade mais alta, o jato de oxidante pode estar carregando parte do combustível das imediações do queimador e, mesmo que à jusante tenham se misturado, é provável que não haja mais na câmara uma distribuição de temperatura favorável para que se tenha oxidação completa.

A Figura 3.34 apresenta a emissão de NO_x para $f = 0,49$. Como era de se esperar, com a deficiência do processo de mistura, as condições favoráveis de temperatura e razão de equivalência para os mecanismos de formação de NO_x , deixam de acontecer na região de chama. A Figura 3.35 apresenta a temperatura medida no termopar 1 para $f = 0,49$.

Novamente retornando ao Capítulo 2, a Figura 2.16 apresenta uma fotografia da chama para $f = 0,30$ sem pulsação. Nota-se uma piora na homogeneidade da zona de chama com o aumento do excesso de ar, concordando com a idéia apresentada nos parágrafos anteriores. As Figuras 3.36, 3.37 e 3.38 mostram as emissões de CO e NO_x e a temperatura no termopar 1 para $f = 0,39$, respectivamente, e as Figuras 3.39, 3.40 e 3.41 essa mesma seqüência para $f = 0,30$. Nota-se a inoperância do processo de atuação acústica em melhorar as condições de combustão nesta situação de queima onde os reagentes estão em proporção extremamente pobre em combustível.

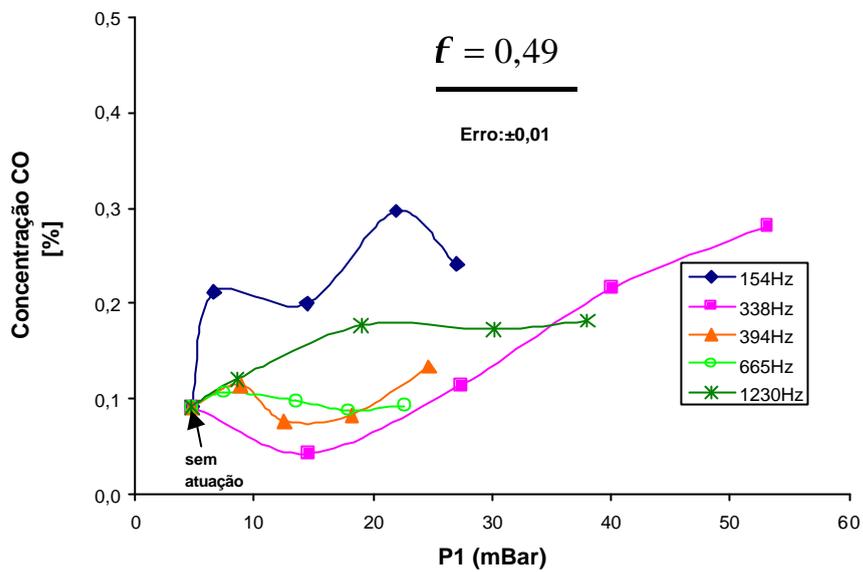


FIGURA 3.33 – Emissão de CO para $f = 0,49$.

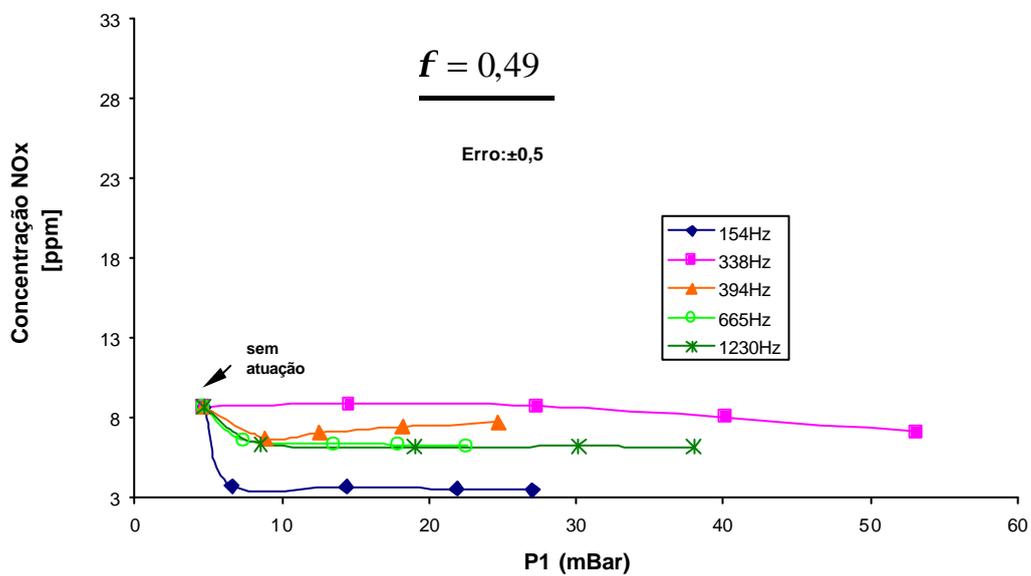


FIGURA 3.34 – Emissão de NO_x para $f = 0,49$.

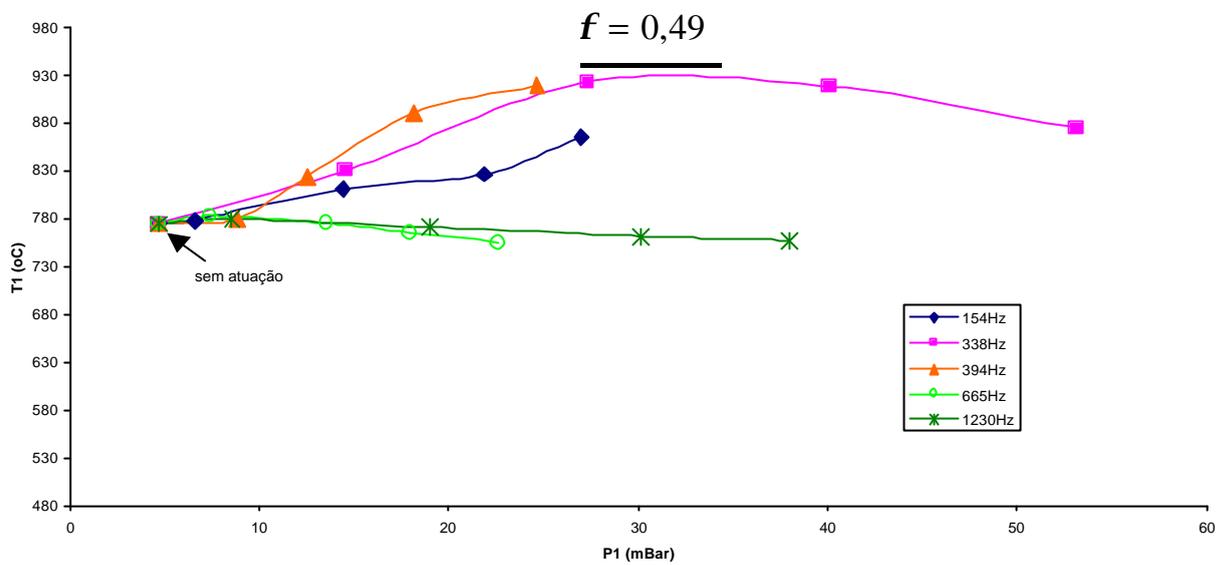


FIGURA 3.35 – Temperatura a 10 cm do queimador em função de P1 para várias frequências e $f = 0,49$.

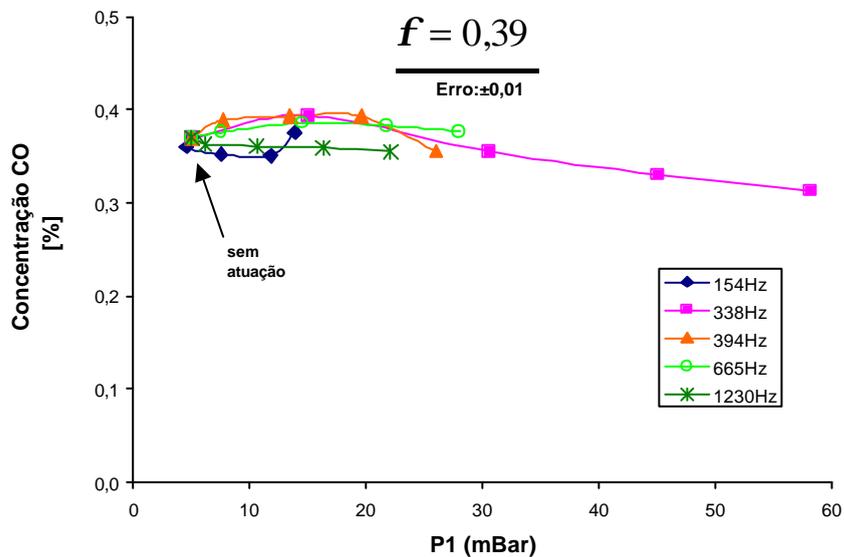


FIGURA 3.36 – Emissão de CO para $f = 0,39$.

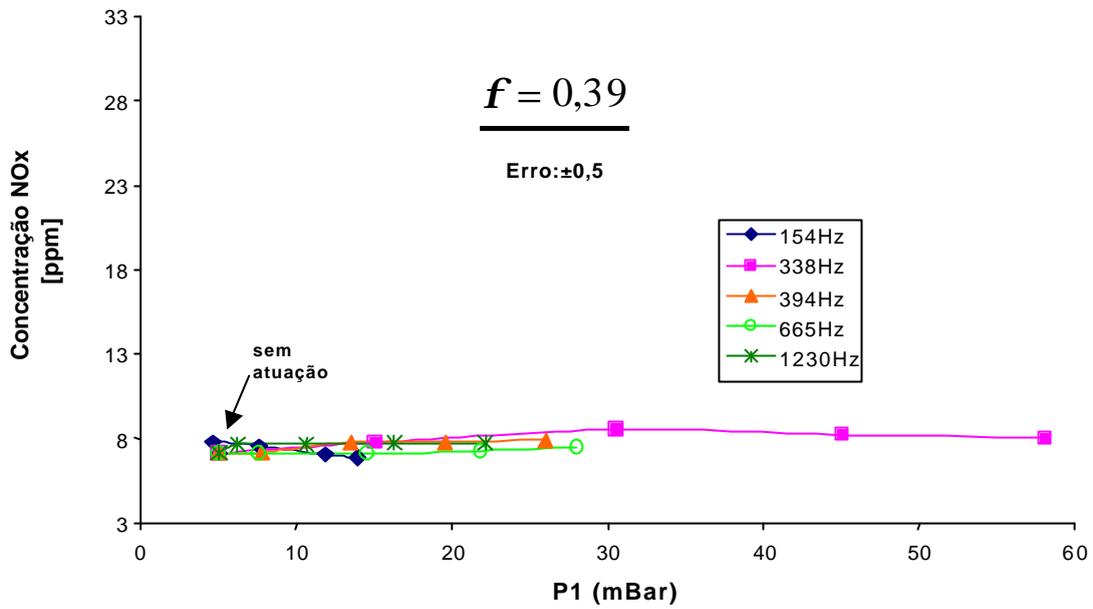


FIGURA 3.37 – Emissão de NO_x para $f = 0,39$.

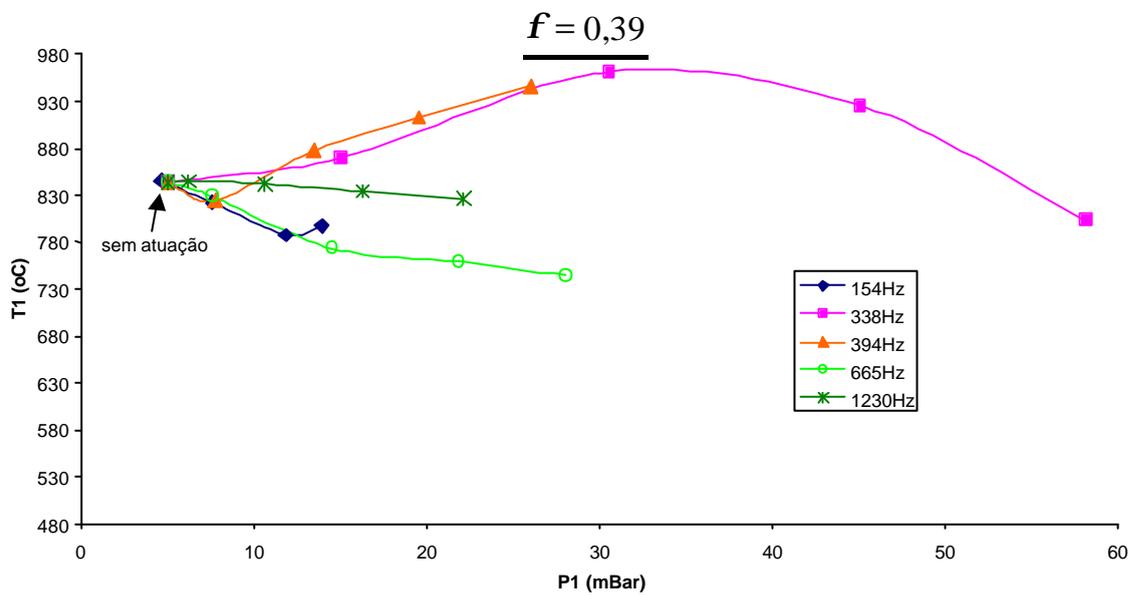


FIGURA 3.38 – Temperatura a 10 cm do queimador em função de P1 para várias frequências e $f = 0,39$.

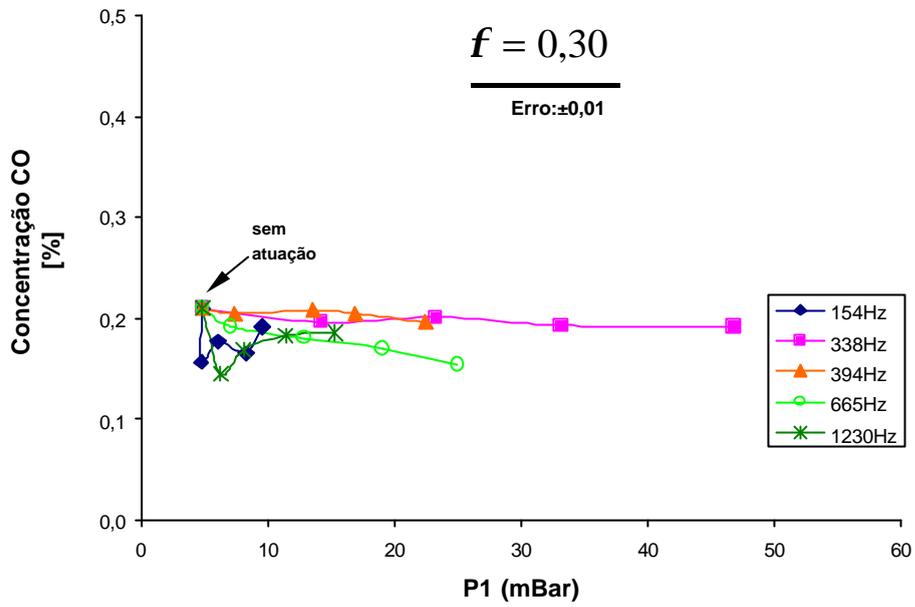


FIGURA 3.39 – Emissão de CO para $f = 0,30$.

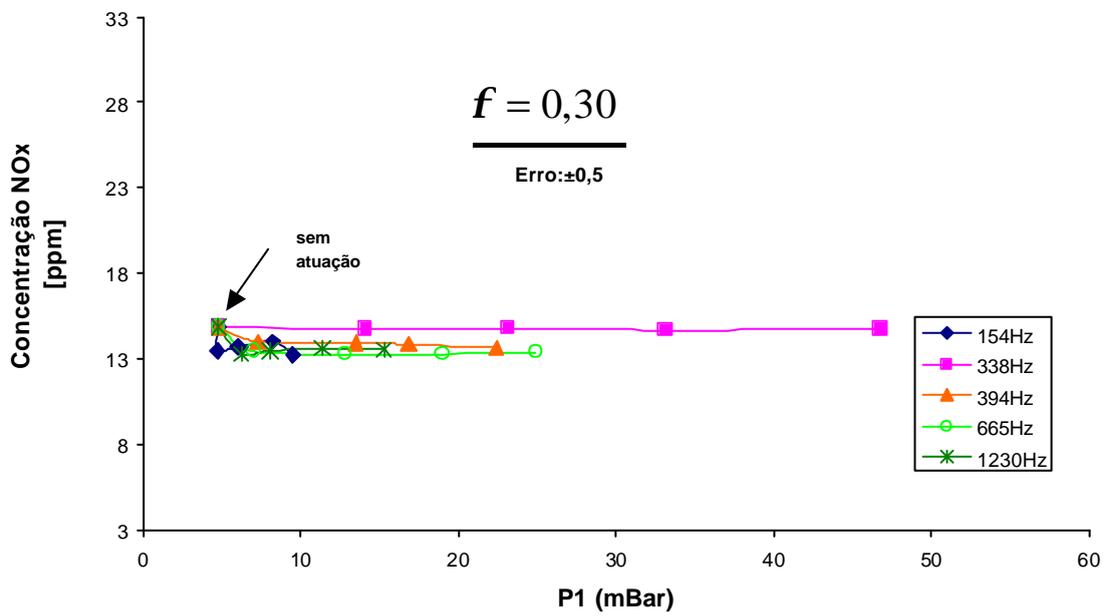


FIGURA 3.40 – Emissão de NO_x para $f = 0,30$.

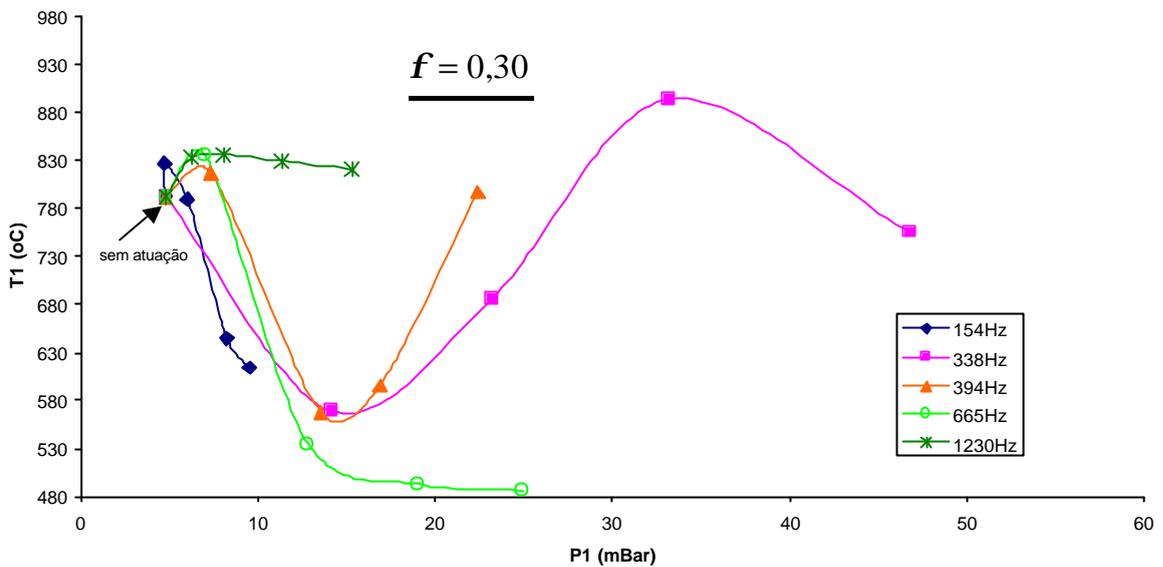


FIGURA 3.41 – Temperatura a 10 cm do queimador em função de P_1 para várias frequências e $f = 0,30$.

3.3 – Comparação entre as Emissões de NO_x e CO para Combustão Pulsada e Não Pulsada.

Faz-se nesta seção uma comparação entre os extremos alcançados para emissão de NO_x com a imposição do campo acústico. A Figura 3.42 apresenta curvas para as máximas e mínimas emissões desse poluente em situação pulsante e a emissão na situação não pulsante, em função da razão de equivalência. Nota-se que nas proximidades da queima estequiométrica ($f = 1,00$ e $0,89$) a presença do campo acústico sempre aumentou a emissão de NO_x . Com o aumento do excesso de ar, surgem situações, ou melhor, combinações de frequência e amplitude que reduzem a emissão de NO_x para um nível inferior ao da condição não pulsada. Conforme demonstrado por Lyons (1982) e já comentado anteriormente, à medida que o excesso de ar e a taxa de mistura entre os reagentes aumentam, a tendência é de redução da emissão de NO_x . Desta forma, a Figura 3.42 mostra que foi possível alcançar essa intensificação em determinadas condições de operação. No entanto, não é possível estabelecer uma conexão simples

entre as condições de oscilação e emissão de NO_x , visto as intensas variações observadas quando se altera f e se ajusta a atuação para minimizar a emissão. Isso pode ser observado nas Figuras 3.43 e 3.44 que apresentam as frequências e amplitudes em função de f , respectivamente, para os máximos e mínimos de NO_x .

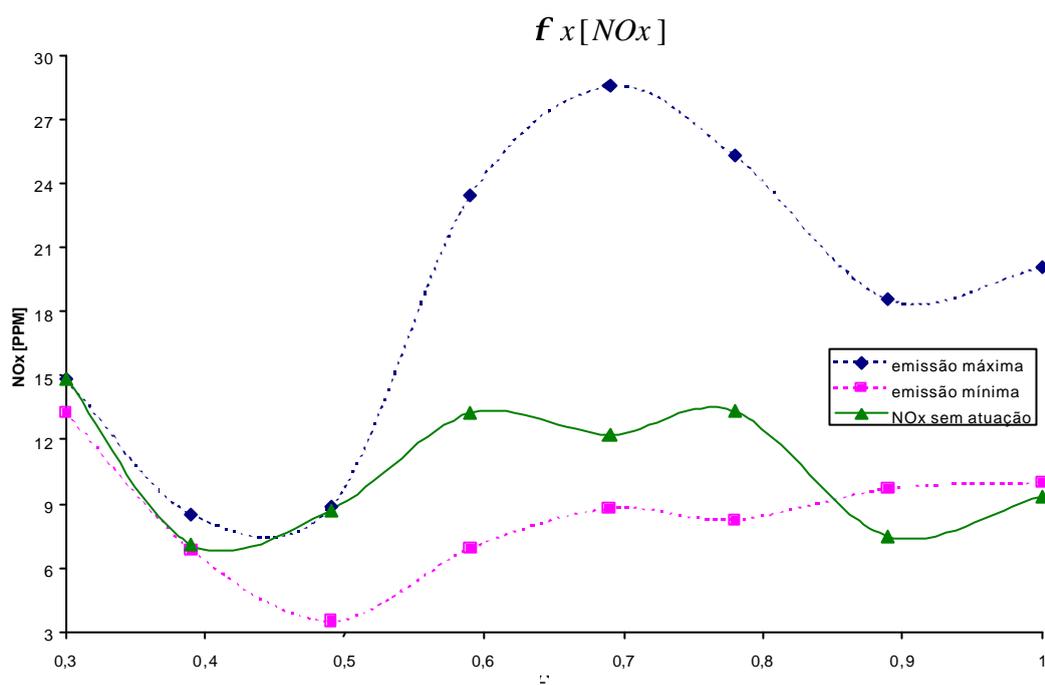


FIGURA 3.42 – Máximas e mínimas emissões de NO_x para combustão pulsada e emissão para combustão não pulsada, em função de f .

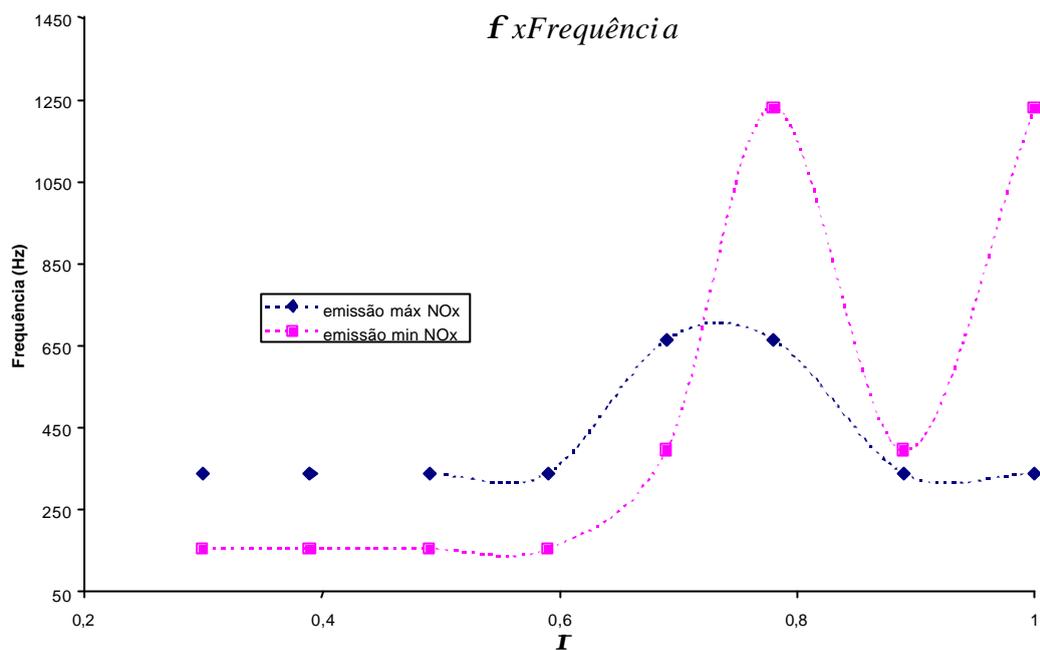


FIGURA 3.43 – Frequências que apresentam emissões máximas e mínimas de NO_x em função de f .

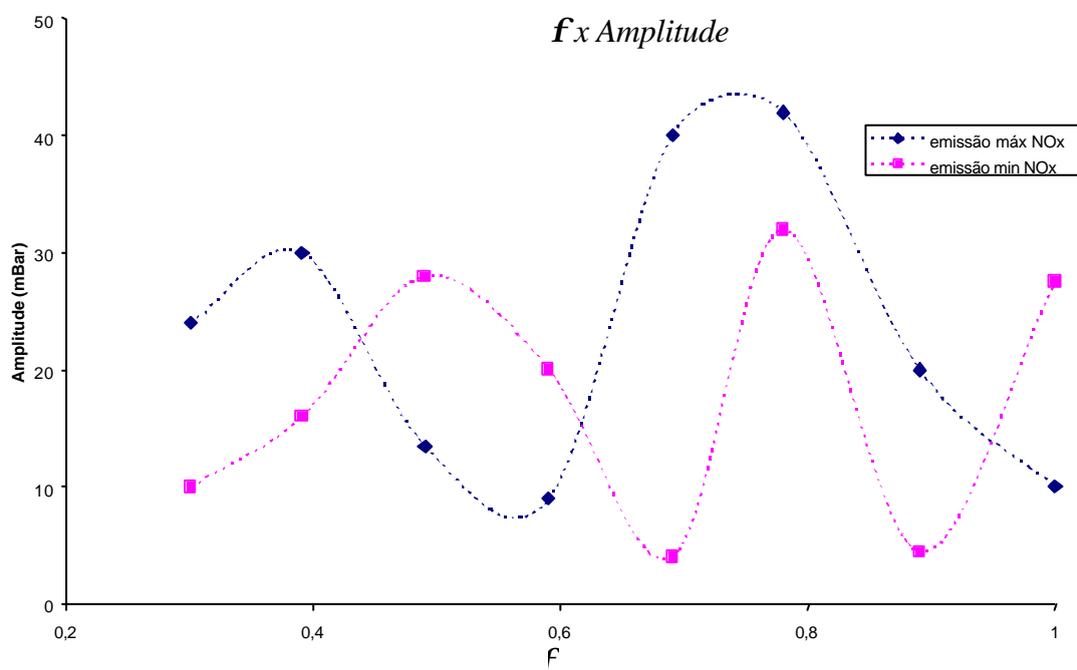


FIGURA 3.44 – Amplitudes que apresentam emissões máximas e mínimas de NO_x em função de f .

Ainda relacionado à emissão de NO_x , nota-se que para combustão extremamente pobre, 0,39 e 0,30, as emissões máximas e mínimas são praticamente iguais às da situação não pulsada. Conforme discutiu-se na subseção anterior, para este nível de empobrecimento da mistura, observou-se que a presença do campo acústico teve pouca influência no processo de combustão.

A Figura 3.45 compara as emissões de CO para as situações de máxima e mínima emissão de NO_x com atuação acústica e a situação sem atuação. É importante destacar que entre $f = 0,59$ e $0,78$ foi possível obter emissões de NO_x inferiores às da situação não pulsada, de acordo com o que foi observado na Figura 3.42; sendo que nestas mesmas condições a emissão de CO esteve no mesmo nível da situação não pulsante (Figura 3.45 curva para mínima emissão de NO_x).

Este resultado no intervalo $f = 0,59$ a $0,78$ é importante para se demonstrar a possibilidade de utilizar a combustão pulsante como tecnologia capaz de conciliar a emissão de produtos de combustão de oxidação parcial, como o CO, com a emissão de NO_x , o que é uma dificuldade em diversos dispositivos que utilizam a combustão como fonte de energia.

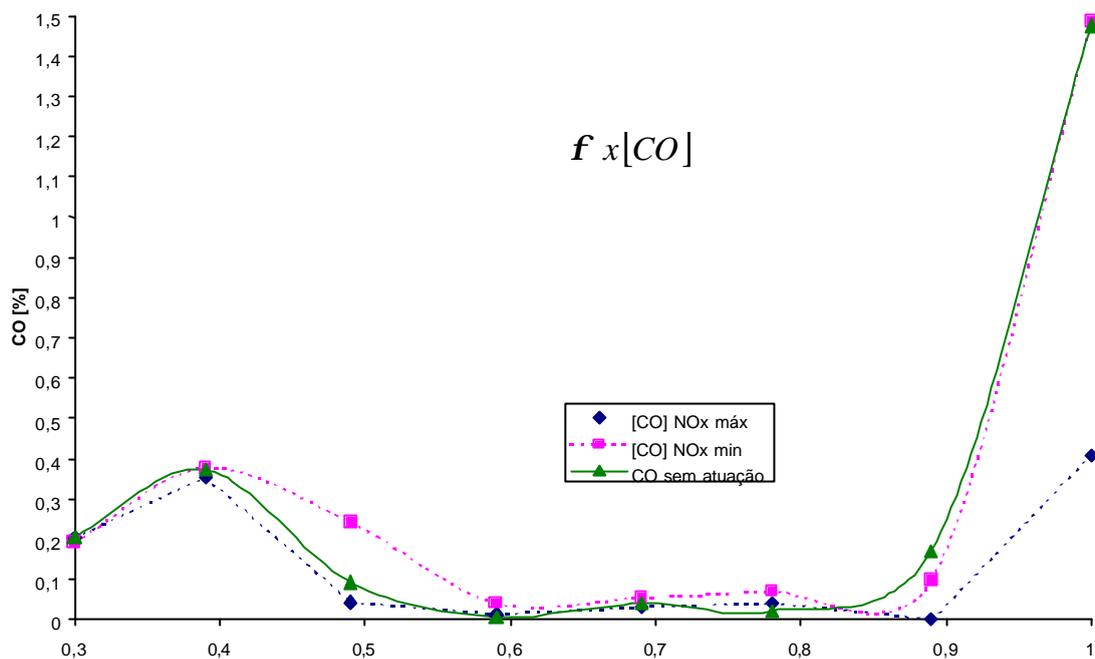


FIGURA 3.45 – Emissões de CO para situações de máximas e mínimas emissões de NO_x para combustão pulsada e emissão de CO para combustão não pulsada, em função de f .

CAPÍTULO 4

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O trabalho realizado teve como objetivo estudar os efeitos de um campo acústico sobre a combustão do gás natural com ar, sobretudo na emissão de poluentes. Fez-se aqui uma comparação entre as concentrações obtidas com e sem atuação acústica, variando-se as razões de equivalência, as frequências e as amplitudes de pressão. A meta principal foi obter condições de operação adequadas, onde se obtivessem baixas emissões de produtos de combustão parcial, como o CO, aliado à redução das emissões de NO_x.

Em algumas condições de ensaio, observou-se que a própria combustão era responsável pelo surgimento ou amplificação das oscilações. O critério de Rayleigh foi satisfeito em 338 e 1230Hz, pois nessas frequências houve não só propagação da onda acústica imposta pelo alto-falante, como o próprio processo de combustão foi capaz de amplificar essa onda.

Em condições estequiométricas sem pulsação a concentração de CO é bastante acentuada, cerca de 1,48%, e a atuação acústica influi de maneira positiva na redução desse poluente para as frequências de 154, 338 e 394 Hz. Entretanto, com o aumento na amplitude de pressão, atinge-se uma condição de instabilidade para a ancoragem da chama nas proximidades do queimador; provavelmente ocorreu interferência negativa no processo de mistura entre combustível e oxidante, fazendo com que a emissão de CO aumente, embora em um nível inferior ao processo não pulsado. As emissões de NO_x para estas frequências ocorrem como esperado, ou seja, antagônico ao do CO. Por outro lado, a temperatura medida no termopar (T1), colocado a 10 cm do queimador, segue o mesmo comportamento das emissões de NO_x para as diversas frequências, indicando a forte dependência dos mecanismos reacionais que levam à formação desse poluente com a temperatura. Outro fato a se destacar é o aumento tanto das concentrações de CO quanto de NO_x para 665Hz. Uma hipótese para explicar este fenômeno seria que parte

da reação ocorreria em misturas ricas em combustível devido a uma deficiência na mistura entre os reagentes, sendo a oxidação subsequente do combustível não queimado com o oxidante excedente em partes superiores da câmara, impedida pela queda de temperatura ao longo do combustor, em razão da parede resfriada. O aumento da emissão de NO_x pode ser explicado por parte das reações ocorrerem em zonas de intensas misturas entre os reagentes e em condições favoráveis à sua formação. Na estequiometria, em frequências acima de 900Hz, o campo acústico pouco influencia o processo de combustão (Ferreira, D.A., 2001), o que também pode ser observado no presente trabalho para 1230Hz.

Para excessos de ar, com f entre 0,89 e 0,59, o comportamento qualitativo dos produtos da combustão, assim como o da temperatura, seguem os mesmos padrões obtidos na estequiometria. Houve redução na emissão de CO, mesmo sem atuação acústica, quando comparado com $f = 1$, chegando-se a valores inferiores ao erro de leitura do analisador em alguns casos, principalmente para as misturas mais pobres em combustível. As emissões de NO_x também diminuíram e em alguns casos obteve-se concentrações menores que nos processos sem atuação acústica, devido a uma melhor distribuição de temperatura em torno de um valor médio mais baixo (Lyons, 1981).

Quando a mistura se torna bastante pobre em combustível, com f entre 0,49 e 0,3 há uma mudança radical no comportamento das emissões e da temperatura T1, se comparado às tendências observadas anteriormente. Em $f=0,49$ a emissão de CO sofre um considerável acréscimo, tomando como base $f = 0,59$, com o aumento da amplitude de pressão em 154, 338 e 394 Hz, isto se torna mais crítico. Provavelmente, tal comportamento se deva ao elevado número de Reynolds. Em tais situações o fluxo de oxidante pode estar carregando parte do combustível injetado nas imediações do queimador, e mesmo que à jusante, se misturem, é provável que não atinjam temperatura suficiente para combustão completa. Nestes casos a emissão de NO_x comporta-se como esperado, as condições de operação desfavorecem seu mecanismo de formação.

Com o aumento na vazão de ar, temos em $f = 0,39$ e $0,3$ uma desuniformidade na zona de chama, confirmando a idéia do parágrafo anterior, aqui o processo de atuação acústica já não tem influência sobre o processo de combustão

Embora para $f = 1$ e $0,89$, o campo acústico tenha aumentado as emissões de NO_x , e para razões de equivalência bem baixas ($f = 0,39$ e $f = 0,3$), o processo de atuação pouco alterou as emissões, para razões de mistura intermediárias ($f = 0,59$ e $0,79$) foi possível obter condições adequadas onde houve redução nas emissões de NO_x , quando comparado ao processo não pulsado, mantendo-se a concentração de CO no mesmo nível do processo sem atuação acústica, isto comprova a possibilidade de se conciliar baixas emissões de CO com as de NO_x , através da combustão pulsante.

Apesar dos resultados terem mostrado, que em determinadas condições é possível conciliar as emissões de compostos de oxidação parcial com as de NO_x , isto ocorre para combinações específicas entre o excesso de oxidante, frequência e amplitude, modificando-se acentuadamente quando qualquer um desses três parâmetros é alterado. De modo que, por hora, não se pode formular um raciocínio direto ou simples sobre o efeito das condições de oscilação no combate à emissão de poluentes. Para que tal técnica seja empregada é preciso determinar experimentalmente como o sistema queimador/câmara de combustão/atuidor acústico responde, e assim fazer uma programação de qual condição de atuação deve ser imposta a uma determinada situação de queima.

Como proposta para trabalhos futuros, recomenda-se estudos semelhantes ao aqui realizado, mas em chamas com geometria mais simples, como por exemplo, em uma chama difusiva originada por um jato de gás turbulento emergindo de um orifício. Além disso seria adequado a realização de medidas de concentração, velocidade e temperatura nas proximidades do queimador. Uma geometria menos complexa e a instrumentação proposta facilitariam um diagnóstico mais preciso das condições de oscilação que

alteram o processo de mistura entre os reagentes e, como conseqüência, a emissão de poluentes.

Como o presente trabalho mostrou, que para se conciliar a emissão de poluente é necessário combinações muito específicas do sistema de atuação acústica com o regime de combustão (proporção entre reagentes), torna-se bastante oportuno que se vincule a estudos futuros de queimadores e combustores pulsantes, dispositivos de controle ativo. Tal equipamento seria responsável pelo adequado sinal de alimentação do sistema de atuação para cada regime de operação da câmara, tendo como base medidas de análise de gases e condições de oscilação na câmara e no queimador.

Por fim, o presente trabalho procurou contribuir para um melhor entendimento sobre o complexo processo de combustão com a presença de um campo acústico, tendo em mente que para a ampla utilização dessa técnica ainda se faz necessário muitos desenvolvimentos científicos e tecnológicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional do Petróleo(ANP). **Distribuição das reservas mundiais de gás natural**. [online].<<http://www.anp.gov.br>>. jan. 2002.
- _____. **Evolução das reservas mundiais de petróleo e gás natural-10⁶ bep**. [online]. <<http://www.anp.gov.br>>. jan. 2002.
- _____. **Produção de gás natural no Brasil**. [online]. <<http://www.anp.gov.br>>. jan. 2002.
- _____. **Reservas totais de gás natural, por localização (terra e mar), 1991-2000**. <<http://www.anp.gov.br>>. jan. 2002.
- Bastos, V.H. **Investigação de chamas pulsantes difusivas livres**. São José dos Campos. Dissertação (Mestrado em Combustão e Propulsão) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001. No prelo.
- Blauwers, J.; Smets, B.; Peeters, J. Mechanism of “prompt” NO formation in hydrocarbon flames. In: Symposium International on Combustion, 16., Cambridge, MA, 1976. **Proceedings**. Pittsburgh, PA, The Combustion Institute, 1976. p. 1055-1071.
- Botura, C.A. **Estudo e projeto de um controlador usando lógica difusa aplicada ao controle ativo de um combustor tipo tubo de Rijke**. Guaratinguetá. 94p. Dissertação (Mestrado em Transmissão e Conversão de Energia) – UNESP, 1998.
- Carvalho Jr., J.A. **Investigation of the characteristics of a coal burning Rijke type pulsating combustor**. Atlanta, GA. Thesis (Doctoral Thesis in Science) – Georgia Institute of Technology, 1983.
- Carvalho Jr., J.A. et al. Definition of heater location to drive maximum amplitude acoustic oscillations in a Rijke tube. **Combustion and Flame**, v. 76, n. 1, p. 17-27, 1989.
- 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.
- Companhia de Gas de São Paulo(COMGAS). **Propriedades químicas e físicas do gás natural (Bacia de Campos/RJ)**. [online]. <www.comgas.com.br>. Jan. 2002.
- Couto, H.S.; Carvalho Jr., J.A.; Hackenberg, C.M. A mechanism to explain the origins of spray combustion instability. In: Workshop de Combustão e Propulsão, 3., Lorena, 1989. **Anais**. São José dos Campos: INPE, 1989.
- Delmée, G.J. **Manual de medição de vazão**. São Paulo: Edgard Blüecher, 1989.

- Fenimore, C.P., Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbourn flames. In: Symposium International on Combustion, 13., Salt Lake City, UT, 1970. **Proceedings**. Pittsburgh, PA, The Combustion Institute, p. 373-380, 1971.
- Ferreira, D.S. **Queimadores pulsantes para baixas emissões de poluentes**. Guaratinguetá. 165 p. Dissertação (Mestrado em Transmissão e Conversão de Energia) - UNESP, 2001.
- Ferreira, M.A.. **Combustão pulsante de carvão vegetal em tubo de Rijke**. São José dos Campos. Dissertação (Mestrado em Combustão e Propulsão) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1989.
- Ferreira, M.A.; Carvalho Jr., J.A. A simple derivation of the Rayleigh criterion in integral form. **Journal of Sound and Vibration**, v. 203, n. 5, p. 889-893, 1997.
- _____. Performance characteristics of an experimental Rijke type pulsating combustor. **Fuel**, v. 69, n. 6, p. 684-689, 1990.
- Ferreira, M.A.; Lacava, P.T.; Carvalho Jr., J.A.; Ferreira, M.A. Efeito das condições de oscilação em chamas confinadas pulsantes. [CD Rom]. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - COBEM, 2001, 16., Uberlândia, MG, nov. 2001. **Anais**. Rio de Janeiro: ABCM, 2001. p. 272-281.
- Fraenkel, S.L.; Nogueira, L.A.H.; Carvalho, J.A.; Costa, F.S. Heat transfer coefficients for drying in pulsating flows. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 25, n. 4, p. 471-480, 1998.
- Glassman, I. **Combustion**. Orlando, FL: Academic Press Inc., 1987.
- Halliday, D.; Resnick, R. **Física**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1984.
- Hanby, V.I. **Convective heat transfer in a gas-fired pulsating combustor**. New York: ASME, 1968. (ASME 68 WA/FU-1).
- Hayhurst, A.N.; Vince, I.M. Nitric oxide formation from N₂ in flames: the importance of prompt NO. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 6, n. 1, p. 35-51, 1980.
- Lacava, P.T. **Investigação Experimental do Enriquecimento do Ar na Incineração de Resíduos Aquosos**. São José dos Campos. Tese (Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica na Área de Aerodinâmica, Propulsão e Energia) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2000.
- Lacava, P.T; Carvalho Jr., J.A.; McQuay, M.Q. Pulsating combustion characteristics of a spray flame in a Rijke tube with two different atomizers. **Fuel**, v. 76, n. 9, p. 845-851, 1997.
- _____. Teoria e experimentação de um Atomizador Tipo Y para álcool. [CD-ROM]. In: Congresso Ibero-Americano de Engenharia Mecânica, 7., Belo Horizonte, 1995. **Anais**. Rio de Janeiro: ABCM, 1995.

- Lacava, P.T.; Ferreira, D.S.; Carvalho Jr., J.A.; Caldeiras Pires, A. Efeito da frequência e amplitude de oscilação no formato de chamas pré-misturadas pulsadas. [CD-ROM]. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - COBEM, 15., Águas de Lindóia, nov. 1999. **Anais**. Rio de Janeiro: ABCM, 1999.
- Lefebvre, A.H.. **Gas turbine combustion**, New York, NY: Taylor & Francis, 1983.
- Lyons, V.J. Fuel/air nonuniformity: effect on nitric oxide emissions. *AIAA Journal*, v. 20, n. 5, p. 660-665, 1982.
- Martins, C.A. **Taxas de NO_x em combustor pulsante tipo tubo de Rijke operando com combustível gasoso**. São José dos Campos. Dissertação (Mestrado em Combustão e Propulsão) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1998.
- Momma, L.J. **Estudo da frequência e amplitude de pressão acústica em combustores pulsantes tipo tubo de Rijke**. São José dos Campos. Dissertação (Mestrado em Combustão e Propulsão) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1993.
- Rayleigh, J.W.S. **The theory of sound**. New York: Dover, 1945. v. 2.
- Raun, R.L.; Beckstead, M.W.; Filinson, J.C.; Brooks, K.P. A review of Rijke tubes, Rijke burners and related devices. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 19, n. 4, p. 313-364, 1993.
- Streeter, V. L.; Wyle, E.B. **Mecânica dos fluidos**. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1982.
- Torres, E.A.; Carvalho Jr., J.A. Combustão da casca de dendê em um reator pulsativo. In: Encontro Nacional de Ciências Térmicas, 5., São Paulo, 1994. **Anais**. São Paulo: ABCM, 1994.
- Tyndall, J. Sound. **Physical Sciences**, v. 30, n. 2, p. 231-157, 1970.
- Westenberg, A.A. Kinetics of NO and CO in lean, premixed hydrocarbon-air flames. **Combustion Science and Technology**, v. 4, n. 2, p. 59-64, 1971.
- Williams, A. Fundamentals of oil combustion. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 2, n. 3, p. 167-179, 1976.
- Zinn, B.T. Pulsating combustion . In: Weinberg, F.J., ed. **Advanced combustion methods**. London: Academic Press, 1986. p. 113-181.

APÊNDICE A

$f=1,00$

Frequência	P1	P2	P3	P4	[O ₂]	[CO ₂]	[CO]	NO _x	T1	T2	T3	T4	H ₂ O entrada	H ₂ O saída
Hz	mBar	mBar	mBar	mBar	%	%	%	ppm	°C	°C	°C	°C	°C	°C
sem atuação	3,93	3,95	4,09	4,07	0,17	10,66	1,48	9,37	831,50	784,17	641,99	533,02	26,57	60,22
154	4,86	2,86	2,91	2,93	0,07	11,05	0,85	12,24	832,14	782,18	651,70	547,05	24,67	60,17
154	6,66	3,95	2,69	3,27	0,07	11,08	0,86	15,36	862,75	803,05	661,71	549,07	24,67	60,30
154	9,77	9,10	3,51	6,66	0,28	11,00	0,91	16,40	878,28	813,03	658,56	509,48	24,45	61,39
154	10,10	8,84	3,45	6,48	0,16	11,03	0,88	16,81	884,22	812,36	650,42	514,47	24,66	61,75
338	5,62	2,54	2,65	2,60	< 0,2	11,00	0,36	17,19	886,85	802,14	655,11	543,55	25,16	61,08
338	10,28	3,62	3,51	3,65	< 0,2	11,03	0,41	20,08	934,39	839,53	660,21	540,33	25,00	60,45
338	15,17	4,32	4,22	4,41	< 0,2	11,03	0,44	18,92	917,16	812,11	626,63	531,79	25,06	60,73
338	20,49	4,46	4,35	4,54	< 0,2	10,84	0,96	15,24	906,98	845,79	646,78	539,40	24,99	60,59
394	5,89	3,96	4,74	3,66	0,17	11,16	0,47	16,01	893,73	805,51	652,97	539,29	25,37	61,54
394	8,92	5,38	6,49	4,83	0,15	11,42	0,26	18,72	929,03	828,18	657,33	534,87	25,22	61,69
394	14,87	7,85	9,14	6,45	0,38	11,51	0,09	17,23	912,85	827,88	624,32	533,92	25,38	62,19
394	16,60	9,59	11,22	6,39	0,08	11,40	0,32	19,07	912,79	845,33	626,37	527,61	25,36	63,07
665	12,39	4,43	4,21	4,17	0,08	10,63	1,54	12,18	809,25	779,27	632,31	519,70	26,26	59,42
665	23,64	5,26	4,22	3,91	0,07	10,53	1,67	11,41	803,74	779,20	647,62	534,12	26,31	59,72
665	34,27	6,08	4,81	4,34	0,03	10,40	1,87	12,30	842,78	730,73	604,59	531,14	26,31	58,97
665	47,04	7,23	5,29	4,20	< 0,2	10,31	2,12	16,82	908,08	793,91	621,91	527,91	26,36	59,83
1230	13,67	4,57	4,30	4,24	0,10	10,62	1,51	10,05	824,03	780,42	638,83	527,59	26,41	59,75
1230	28,16	5,72	4,34	4,10	0,10	10,65	1,49	10,02	826,11	782,94	632,28	528,64	26,40	59,79
1230	42,94	8,56	5,11	4,20	0,10	10,67	1,49	10,47	829,61	791,72	635,11	527,77	26,40	59,72
1230	51,59	10,36	5,69	4,10	0,12	10,68	1,47	10,14	820,83	788,81	632,56	527,90	26,50	59,71

$$f = 0,89$$

Frequência	P1	P2	P3	P4	[O ₂]	[CO ₂]	[CO]	NO _x	T1	T2	T3	T4	H ₂ O entrada	H ₂ O saída
Hz	mBar	mBar	mBar	mBar	%	%	%	ppm	°C	°C	°C	°C	°C	°C
sem atuação	4,04	4,03	4,01	4,12	0,66	11,18	0,17	7,47	827,98	776,35	666,77	568,68	25,94	61,17
154	5,12	4,46	4,17	4,37	0,21	11,33	0,23	12,10	841,22	793,64	673,42	574,33	26,51	63,62
154	8,02	5,76	3,96	4,77	0,21	11,27	0,17	13,32	873,29	814,86	678,34	564,99	26,58	63,91
154	11,26	14,56	6,13	11,00	0,08	11,55	0,00	18,44	976,72	862,79	677,29	481,99	26,50	70,89
154	11,50	15,14	6,38	11,41	0,17	11,56	<0,01	17,97	969,89	872,39	687,11	496,33	26,46	70,84
338	5,13	4,12	4,28	4,24	0,71	11,26	0,10	10,21	866,96	789,17	664,22	562,37	26,93	64,17
338	10,83	5,12	5,10	5,23	0,55	11,39	0,02	15,50	914,38	830,60	661,02	554,65	27,00	64,16
338	15,55	5,55	5,53	5,73	0,55	11,43	<0,01	17,11	902,04	825,79	634,89	543,79	27,01	64,12
338	20,33	5,88	5,86	6,13	0,61	11,44	<0,01	18,56	887,99	859,68	662,02	552,70	27,02	64,56
394	5,03	5,12	5,68	4,97	0,95	11,13	0,10	9,71	864,88	779,13	654,74	558,48	26,94	63,98
394	8,84	6,73	7,71	5,80	0,88	11,26	0,00	15,24	917,97	826,27	653,93	541,47	26,95	64,24
394	14,60	9,41	10,73	7,72	0,86	11,28	<0,01	16,61	909,16	820,74	613,83	528,62	27,00	64,58
394	16,23	10,28	11,82	8,17	0,78	11,32	<0,01	17,19	902,82	843,33	619,59	531,97	27,03	65,23
665	10,06	4,74	4,44	5,16	0,07	11,42	0,32	12,00	829,99	782,79	661,78	559,34	26,87	63,58
665	19,35	5,93	4,73	6,82	0,10	11,36	0,39	11,67	808,85	776,63	664,15	559,58	26,94	63,38
665	26,07	6,54	5,06	8,23	0,15	11,31	0,43	11,40	830,73	787,17	677,65	574,33	27,01	63,36
665	36,46	7,63	5,38	9,13	0,09	11,37	0,41	14,70	892,05	785,12	649,10	561,57	27,05	63,91
1230	16,42	4,71	4,02	4,15	0,26	11,35	0,31	11,31	832,20	778,55	662,10	567,03	27,02	63,74
1230	32,71	7,40	5,12	5,57	0,26	11,36	0,30	11,86	832,49	781,19	669,33	566,01	26,78	63,83
1230	44,97	9,74	5,48	6,79	0,26	11,39	0,28	12,19	829,35	787,61	659,06	564,37	26,83	63,90
1230	60,09	18,26	7,97	11,21	0,27	11,33	0,32	11,44	816,90	783,15	654,08	557,00	26,69	63,62

$$f = 0,78$$

Frequência	P1	P2	P3	P4	[O ₂]	[CO ₂]	[CO]	NO _x	T1	T2	T3	T4	H ₂ O entrada	H ₂ O saída
Hz	mBar	mBar	mBar	mBar	%	%	%	ppm	°C	°C	°C	°C	°C	°C
sem atuação	2,22	2,21	2,33	2,26	3,51	9,63	0,02	13,30	689,35	716,25	596,17	530,59	27,80	64,19
154	6,19	3,92	2,67	3,31	4,04	9,56	0,06	8,57	799,99	743,42	617,47	529,25	28,93	63,87
154	8,82	9,86	3,97	7,33	4,09	9,53	0,04	18,42	896,27	778,95	609,85	495,70	28,94	65,40
154	10,59	12,81	4,95	9,47	4,18	9,49	0,04	17,51	926,46	801,40	617,75	487,61	28,93	67,12
154	12,30	15,03	5,72	11,05	4,18	9,50	0,04	14,15	900,33	829,96	642,43	495,47	28,90	68,90
338	6,23	2,32	2,45	2,43	3,81	9,67	0,06	10,83	863,56	759,76	630,33	537,21	28,72	64,46
338	11,83	6,33	6,61	5,41	3,83	9,70	0,04	19,54	875,20	781,94	626,14	528,03	28,75	64,16
338	15,34	4,58	4,49	4,71	3,87	9,65	0,04	22,66	875,58	780,25	596,93	527,80	28,78	64,05
338	21,47	5,33	5,18	5,48	3,84	9,65	0,04	20,49	864,40	831,15	632,79	536,17	28,81	64,98
394	5,94	2,87	3,28	2,80	3,96	9,58	0,06	9,90	853,65	749,66	623,60	532,09	28,92	64,20
394	10,25	5,56	6,33	4,92	3,91	9,62	0,04	19,40	873,76	777,54	614,62	526,05	28,99	64,34
394	15,70	9,21	10,42	7,34	3,99	9,60	0,04	20,56	857,88	797,62	591,92	518,96	28,95	64,47
394	18,63	13,10	14,08	10,03	4,06	9,62	0,04	19,72	882,13	817,70	597,91	520,21	28,93	65,07
665	11,99	2,54	2,49	2,74	3,78	9,68	0,06	10,32	831,22	741,64	619,58	528,09	28,94	64,34
665	23,83	3,11	2,73	3,73	3,72	9,70	0,08	9,45	810,77	740,47	626,52	543,63	28,87	64,64
665	34,68	4,60	2,88	4,70	3,69	9,73	0,04	22,32	932,82	768,72	621,13	524,84	28,87	64,39
665	41,73	5,42	3,15	5,88	3,61	9,79	0,04	25,28	945,94	795,30	641,09	534,32	28,85	65,61
1230	12,70	3,79	2,57	4,47	3,88	9,63	0,07	8,55	800,66	733,59	619,61	536,10	28,94	65,39
1230	20,20	5,40	2,87	6,20	3,82	9,67	0,07	8,34	808,73	734,52	622,85	537,36	28,82	65,52
1230	32,46	8,22	3,39	9,27	3,82	9,69	0,07	8,26	821,25	738,81	620,36	535,71	28,86	65,59
1230	41,87	11,11	3,86	11,71	3,88	9,71	0,06	8,55	827,67	742,29	618,80	534,63	28,76	65,62

$$f = 0,69$$

Frequência	P1	P2	P3	P4	[O ₂]	[CO ₂]	[CO]	NO _x	T1	T2	T3	T4	H ₂ O entrada	H ₂ O saída
Hz	mBar	mBar	mBar	mBar	%	%	%	ppm	°C	°C	°C	°C	°C	°C
sem atuação	2,70	2,47	2,58	2,55	6,47	8,51	0,04	12,25	771,87	713,62	586,68	520,47	26,73	62,03
154	5,78	4,61	3,04	3,84	6,35	8,44	0,04	12,26	769,21	734,18	600,42	521,56	28,00	64,26
154	10,98	9,34	4,06	6,88	6,46	8,39	0,04	17,86	834,14	762,09	610,84	519,12	27,92	65,10
154	13,55	13,29	5,57	9,81	6,32	8,45	0,04	18,61	884,96	784,35	614,42	490,90	27,93	67,25
154	17,18	18,53	7,31	13,62	6,48	8,40	0,04	12,62	850,18	811,06	643,55	510,33	27,80	70,65
338	6,48	2,69	2,81	2,81	6,13	8,49	0,04	14,05	839,45	732,10	596,23	519,41	28,35	64,24
338	12,21	4,59	4,44	4,67	6,29	8,41	0,04	19,37	853,64	761,37	604,85	530,81	28,34	63,34
338	19,32	5,35	5,19	5,48	6,30	8,41	0,04	18,32	834,49	792,38	609,70	529,88	28,30	63,66
338	25,22	6,18	6,01	6,36	6,31	8,42	0,04	15,53	881,81	824,50	635,09	546,48	28,26	64,33
394	4,05	2,71	2,97	2,68	6,31	8,39	0,05	8,78	797,77	712,76	578,37	513,54	28,35	64,03
394	6,76	5,79	7,18	4,96	6,21	8,48	0,04	17,56	831,31	747,43	596,62	519,34	28,22	64,19
394	11,54	10,68	12,62	8,22	6,28	8,44	0,04	18,68	846,25	773,54	592,53	521,63	28,27	64,52
394	15,80	13,70	16,25	9,82	6,38	8,42	0,04	18,15	856,67	802,54	579,33	504,24	28,09	65,44
665	10,40	3,08	3,05	3,23	6,37	8,47	0,04	12,75	802,54	714,91	592,59	518,45	27,75	63,22
665	20,14	4,73	4,18	4,83	6,61	8,36	0,03	19,68	791,28	723,53	589,44	520,70	27,72	62,64
665	31,22	6,37	5,05	6,50	6,45	8,45	0,03	24,14	797,84	777,38	614,38	535,71	27,62	62,67
665	39,67	6,56	4,14	6,46	6,62	8,39	0,03	28,54	906,44	805,42	624,58	533,72	27,50	62,38
1230	10,69	3,07	2,54	4,49	6,60	8,24	0,05	13,64	766,91	704,34	574,28	512,12	27,29	62,49
1230	21,06	4,93	2,85	8,73	6,78	8,13	0,06	12,98	768,47	702,48	571,41	511,58	27,20	62,13
1230	33,26	8,26	3,54	14,71	6,82	8,26	0,06	12,20	779,10	701,20	576,31	509,95	27,13	62,02
1230	40,02	11,21	4,27	19,59	6,84	8,35	0,06	11,76	782,34	697,65	570,81	506,05	27,03	61,86

$$f = 0,59$$

Frequência	P1	P2	P3	P4	[O ₂]	[CO ₂]	[CO]	NO _x	T1	T2	T3	T4	H ₂ O entrada	H ₂ O saída
Hz	mBar	mBar	mBar	mBar	%	%	%	ppm	°C	°C	°C	°C	°C	°C
sem atuação	3,21	3,76	3,60	3,81	8,88	7,35	0,01	13,24	763,90	731,77	603,09	530,25	27,32	62,10
154	5,08	4,58	4,16	4,45	8,89	7,36	0,01	12,79	772,04	741,68	608,57	535,84	27,50	61,98
154	10,73	7,74	5,50	6,63	8,79	7,43	0,00	17,62	859,32	768,79	621,88	539,70	27,58	62,31
154	16,63	10,12	5,55	7,77	8,99	7,31	0,00	15,13	865,62	786,05	621,61	532,16	27,57	63,29
154	23,04	13,68	6,77	10,11	8,85	7,37	0,04	6,91	832,34	779,49	635,47	536,87	27,59	65,78
338	10,42	5,08	4,88	5,12	7,49	7,13	0,01	23,43	826,62	758,41	622,47	542,38	28,52	63,49
338	19,00	6,89	6,66	6,86	7,61	7,04	0,02	22,31	812,62	770,35	610,30	538,90	28,48	63,42
338	26,71	9,78	8,71	8,66	7,45	7,18	0,03	19,34	821,31	782,85	617,88	542,24	28,46	63,78
338	33,89	3,80	4,52	4,49	7,57	7,10	0,01	22,27	892,47	807,22	627,67	552,29	28,32	64,39
394	5,50	5,76	5,66	5,82	9,56	7,31	0,01	10,89	780,03	741,47	614,33	537,29	28,45	62,37
394	11,03	6,57	6,56	6,45	9,55	7,31	0,01	13,14	825,42	759,52	623,43	544,94	28,89	62,83
394	15,39	7,19	7,35	6,99	9,32	7,42	0,01	13,95	829,46	768,12	621,35	545,48	29,14	62,94
394	21,73	8,57	9,01	8,32	9,36	7,43	0,01	14,16	830,40	780,06	615,88	542,44	28,85	63,28
665	10,74	5,41	5,14	5,55	8,76	7,40	0,00	15,49	814,55	743,67	611,67	533,10	27,67	62,45
665	21,07	5,98	5,73	6,50	8,75	7,41	0,00	17,24	803,58	743,30	601,69	538,25	27,76	62,27
665	30,74	6,33	6,13	7,60	8,81	7,38	0,00	19,13	789,74	767,94	608,31	546,08	27,83	62,52
665	40,14	6,59	6,35	8,67	8,73	7,40	0,00	20,89	878,84	782,85	621,29	544,35	27,98	63,13
1230	9,26	4,27	4,11	4,48	8,68	7,42	0,01	13,50	763,77	729,28	598,54	528,85	28,21	63,16
1230	18,37	4,50	4,04	5,09	8,66	7,42	0,01	12,99	763,96	724,47	598,55	525,20	27,99	62,69
1230	27,57	4,89	3,82	6,26	8,59	7,45	0,01	12,47	761,96	719,57	591,94	526,39	27,97	63,03
1230	33,41	6,44	4,14	8,17	8,67	7,45	0,01	9,67	772,84	726,81	601,61	532,34	27,83	62,36

$$f = 0.49$$

Frequência	P1	P2	P3	P4	[O ₂]	[CO ₂]	[CO]	NO _x	T1	T2	T3	T4	H ₂ O entrada	H ₂ O saída
Hz	mBar	mBar	mBar	mBar	%	%	%	ppm	°C	°C	°C	°C	°C	°C
sem atuação	4,71	5,59	5,49	5,68	11,49	5,94	0,09	8,70	775,14	707,67	594,51	530,50	28,13	60,52
154	6,60	6,67	6,16	6,55	11,99	5,45	0,21	3,71	778,60	685,69	580,48	515,26	27,54	57,99
154	14,42	9,00	5,54	7,09	11,93	5,49	0,20	3,70	811,44	722,75	594,12	524,80	27,39	58,25
154	21,91	12,40	4,95	8,34	12,04	5,32	0,30	3,53	826,77	699,99	586,28	510,72	27,26	60,10
154	27,02	21,88	6,66	14,73	12,05	5,36	0,24	3,52	865,79	704,03	593,45	479,58	27,20	64,82
338	14,56	5,31	5,29	5,44	11,51	5,97	0,04	8,89	830,80	736,27	604,11	538,03	28,23	60,26
338	27,35	4,39	4,68	4,67	11,46	5,94	0,11	8,75	923,01	776,56	586,66	540,01	28,06	60,21
338	40,12	4,90	5,34	5,32	11,77	5,69	0,22	8,05	918,28	752,65	583,12	532,58	27,91	59,47
338	53,15	5,97	6,44	6,32	11,88	5,58	0,28	7,10	875,09	685,13	577,52	523,78	27,87	60,21
394	8,85	7,89	8,34	7,04	11,74	5,79	0,12	6,73	780,01	714,12	594,65	531,48	27,98	60,20
394	12,54	10,61	11,53	8,30	11,66	5,86	0,08	7,03	823,98	729,84	595,00	530,35	27,92	60,61
394	18,19	12,56	13,18	9,32	11,63	5,87	0,08	7,44	890,98	756,06	585,87	529,24	27,86	61,13
394	24,69	12,69	12,44	9,31	11,69	5,80	0,13	7,71	919,62	785,52	583,59	543,21	27,92	60,92
665	7,42	6,49	6,24	6,55	11,69	5,80	0,11	6,59	783,06	708,26	596,13	531,44	27,93	60,21
665	13,55	7,32	6,72	7,16	11,65	5,81	0,10	6,38	775,34	708,17	597,15	530,89	27,96	60,27
665	17,94	7,47	6,72	7,48	11,64	5,81	0,09	6,33	765,61	708,34	597,90	531,47	28,07	60,10
665	22,59	7,96	6,73	7,83	11,65	5,79	0,09	6,23	755,47	705,98	593,78	533,04	28,02	59,70
1230	8,58	6,10	5,85	6,15	11,67	5,74	0,12	6,39	779,72	704,89	590,96	528,69	28,15	60,33
1230	19,02	6,30	5,75	6,75	12,00	5,51	0,18	6,20	771,28	694,85	582,55	520,67	27,68	58,17
1230	30,17	7,40	5,33	7,82	11,98	5,50	0,17	6,22	761,94	693,08	580,85	522,72	27,69	58,09
1230	37,99	9,43	6,09	10,20	11,98	5,48	0,18	6,18	757,44	690,97	579,19	520,20	27,76	57,55

$$f = 0,39$$

Frequência	P1	P2	P3	P4	[O ₂]	[CO ₂]	[CO]	NO _x	T1	T2	T3	T4	H ₂ O entrada	H ₂ O saída
Hz	mBar	mBar	mBar	mBar	%	%	%	ppm	°C	°C	°C	°C	°C	°C
sem atuação	4.62	4.96	4.77	4.96	14.76	4.03	0.36	7.79	845.30	649.38	511.77	464.48	27.33	51.77
154	5.04	5.59	5.52	5.71	14.79	4.09	0.37	7.11	843.57	654.52	517.83	470.11	27.91	52.72
154	7.58	7.84	5.40	6.57	14.81	3.98	0.35	7.52	822.47	642.10	511.98	461.00	27.32	51.98
154	11.85	13.53	6.12	9.78	14.95	3.87	0.35	7.05	787.47	633.53	510.75	456.29	27.23	53.59
154	13.93	17.65	5.87	12.19	15.07	3.75	0.38	6.86	797.36	590.49	483.60	439.84	27.13	54.43
338	15.09	5.02	5.26	5.25	14.91	4.05	0.39	7.73	869.74	671.20	519.93	472.55	28.50	53.01
338	30.57	5.33	6.16	5.86	14.80	4.16	0.36	8.51	961.15	712.79	519.44	487.04	28.45	53.16
338	45.11	6.51	8.04	7.40	14.71	4.23	0.33	8.21	925.16	672.11	515.56	472.16	28.42	54.01
338	58.16	8.45	10.31	9.29	14.73	4.21	0.31	8.00	803.00	604.19	504.40	460.14	28.28	54.75
394	7.76	6.03	5.88	6.01	14.98	3.98	0.39	7.17	824.37	642.09	509.23	462.90	28.16	52.18
394	13.48	6.01	6.30	5.49	14.82	4.08	0.39	7.75	877.11	661.65	517.40	473.08	28.20	52.99
394	19.56	6.90	7.51	5.66	14.81	4.07	0.39	7.75	913.03	690.04	522.36	480.88	28.17	52.91
394	26.03	7.91	8.58	6.19	14.72	4.15	0.36	7.91	946.45	712.94	519.16	489.66	28.09	52.65
665	7.58	6.22	6.08	6.34	14.82	4.04	0.38	7.12	828.59	639.93	513.41	466.93	27.98	52.28
665	14.52	6.30	6.24	6.46	14.98	3.93	0.39	7.08	773.28	629.04	506.97	458.45	27.82	51.58
665	21.87	7.49	7.13	7.60	14.97	3.92	0.38	7.25	758.94	637.05	513.42	460.89	27.92	51.39
665	28.04	7.03	6.56	7.14	14.91	3.96	0.38	7.46	744.55	648.24	521.42	470.01	27.80	51.73
1230	6.22	6.06	5.51	6.01	14.77	4.04	0.36	7.63	845.13	651.63	514.48	467.63	27.72	51.57
1230	10.64	8.33	5.59	7.59	14.78	4.03	0.36	7.64	842.20	650.93	514.41	467.42	27.68	51.69
1230	16.31	11.18	5.24	9.61	14.78	4.04	0.36	7.74	834.06	649.03	514.01	465.66	27.57	51.55
1230	22.15	15.70	5.64	13.05	14.78	4.02	0.36	7.73	826.02	644.80	511.86	463.30	27.44	51.88

$$f = 0,30$$

Frequência	P1	P2	P3	P4	[O ₂]	[CO ₂]	[CO]	NO _x	T1	T2	T3	T4	H ₂ O entrada	H ₂ O saída
Hz	mBar	mBar	mBar	mBar	%	%	%	ppm	°C	°C	°C	°C	°C	°C
sem atuação	4,71	4,87	4,64	4,92	15,63	2,62	0,16	13,50	826,98	493,51	390,46	372,17	26,72	45,57
154	4,78	5,66	5,47	5,76	14,47	2,63	0,21	14,85	792,85	505,15	400,55	377,86	28,01	48,13
154	6,03	6,70	4,09	5,52	15,85	2,52	0,18	13,69	789,73	487,61	370,00	358,40	26,66	45,50
154	8,22	8,43	3,57	6,22	16,05	2,44	0,17	14,01	644,82	460,07	361,78	359,30	26,50	45,18
154	9,51	8,71	3,80	6,49	16,15	2,45	0,19	13,25	614,30	447,52	360,98	357,61	26,34	45,05
338	14,14	6,67	9,11	6,85	14,52	2,62	0,20	14,74	568,95	401,94	366,19	351,94	28,09	49,38
338	23,18	9,66	13,50	9,55	14,48	2,67	0,20	14,80	686,17	438,73	370,63	357,97	27,98	49,41
338	33,15	10,07	13,78	9,87	14,61	2,66	0,19	14,67	894,18	543,91	386,41	383,13	28,00	48,55
338	46,79	14,02	19,26	13,41	14,44	2,82	0,19	14,75	755,88	515,31	402,77	388,80	27,99	50,04
394	7,32	4,37	4,33	4,44	14,89	2,64	0,21	14,02	817,85	475,65	383,69	367,27	27,78	47,54
394	13,52	3,44	3,63	3,41	14,86	2,70	0,21	13,94	567,87	402,96	366,23	352,07	27,71	48,54
394	16,87	3,57	3,81	3,48	14,94	2,66	0,21	13,86	595,67	402,14	364,46	349,19	27,69	48,27
394	22,40	3,43	3,75	3,16	15,09	2,64	0,20	13,64	797,82	412,85	359,00	352,67	27,52	47,39
665	7,03	4,90	4,85	5,03	15,18	2,57	0,19	13,46	835,86	470,71	379,76	365,00	27,42	46,68
665	12,82	3,08	3,14	3,16	15,19	2,60	0,18	13,29	534,66	393,09	361,29	347,68	27,43	47,90
665	19,01	3,22	3,23	3,31	15,17	2,65	0,17	13,29	492,75	398,06	367,14	349,97	27,31	48,22
665	24,95	3,30	3,18	3,42	15,13	2,70	0,15	13,39	486,14	405,02	373,57	353,80	27,23	48,32
1230	6,24	5,42	4,71	5,27	15,28	2,65	0,15	13,27	833,29	492,10	389,93	372,54	27,17	46,04
1230	8,04	6,27	4,76	5,80	15,41	2,61	0,17	13,48	836,45	489,73	387,82	370,63	27,01	45,77
1230	11,35	8,15	4,68	6,94	15,45	2,60	0,18	13,64	829,74	493,11	389,23	371,26	26,89	45,65
1230	15,28	10,47	5,35	8,87	15,57	2,57	0,19	13,55	821,33	493,49	389,81	370,17	26,83	45,48