

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

IGOR MAGALHÃES ALVES

**Estudos de Instabilidade de Combustão em Sistema de Queimador de Gás Natural Assistido a
Plasma de Arco Deslizante**

Guaratinguetá

2017

Igor Magalhães Alves

Estudos de Instabilidade de Combustão em Sistema de Queimador de Gás Natural Assistido a Plasma de Arco Deslizante

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica .

Orientador: Profº Dr. João Andrade de Carvalho Jr.

Coorientador: Profº Dr. Pedro Teixeira Lacava

Guaratinguetá

2017

Alves, Igor Magalhães

A474e

Estudos de instabilidade de combustão em sistema de queimador de gás natural assistido a plasma de arco deslizante / Igor Magalhães Alves – Guaratinguetá, 2017.

43 f : il.

Bibliografia: f. 46–47

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.

Orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Junior

Coorientador: Prof. Dr. Pedro Teixeira Lacava

1. Combustão. 2. Engenharia de combustão. 3. Gás natural. I. Título

CDU 662.611

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

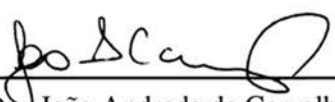
IGOR MAGALHÃES ALVES

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO
REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE "GRADUANDO EM
ENGENHARIA MECÂNICA "

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Profº Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Profº Dr. João Andrade de Carvalho Jr.
Orientador/UNESP-FEG


Profº Dr. Ivonete Ávila
UNESP-FEG


Profº Dr. Carlos Dias Maciel
USP-EESC

Novembro , 2017

dedico este trabalho de modo especial, à minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a minha família, Renan Caratti Alves, Nádia Martins Magalhães Alves e Vítor Magalhães Alves, que sempre me incentivaram, apoiaram e motivaram com muito carinho, amor e resiliência nos meus estudos e escolhas na vida pessoal e acadêmica,

ao meu orientador, Prof. Dr. João Andrade de Carvalho, que deu a oportunidade e indicação de trabalhar em um projeto no Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Como também, agradeço ao meu co-orientador, Prof. Dr. Pedro Teixeira Lacava, por me receber no laboratório e orientar em todos os aspectos da pesquisa,

a todos os membros do Laboratório de Combustão, Propulsão e Energia do ITA, em especial a Armando José Pinto, o qual trabalhei no mesmo projeto e me orientou em todas etapas da pesquisa com muita atenção e disposição em ajudar no direcionamento do meu trabalho e na elaboração dos testes experimentais,

a todos funcionários da Biblioteca, Laboratórios, Graduação e Administração da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – UNESP do Campus de Guaratinguetá pela dedicação e serviços para o desenvolvimento do ensino público.

“A ausência de evidência não significa a evidência de ausência.”
(Carl Sagan)

RESUMO

O trabalho tem o objetivo de analisar e identificar as condições de estabilidade de combustão e estudar origens de possíveis instabilidades acústicas em um projeto de um queimador convencional a gás natural assistido a plasma, operando em regime pobre de combustível. Obtidas as condições de estabilidade, o intuito final do projeto é apresentar uma alternativa para a diminuição de emissão de gases NO_x nos processos de combustão de gás natural e ar. Para que isso seja analisado, o sistema deve se encontrar em padrões estáveis de combustão, portanto é feito um avaliação de condições de existência da chama e condições de vazões de combustíveis e ar adequadas para ideal funcionamento, como também estudos do espectro de oscilações acústicas, mapeamento de zonas instáveis e correlações entre razões de equivalência da mistura.

Com base nos resultados experimentais e embasado em resultados teóricos, será proposto condições viáveis de operação do mecanismo, a fim de evitar a ocorrência de instabilidades de combustão, flutuações de pressão, acoplamentos termo-acústicos e formação de combustão pulsante.

PALAVRAS-CHAVE: Instabilidade de Combustão. Combustão a Gás Natural. Queimador Assistido a Plasma. Oscilações termo-acústicas. Combustão Pulsante.

ABSTRACT

This project analyses and indentify the stable combustion conditions of operation of a natural gas burner with plasma assistance. Previous studies have shown that plasma system could obtain the reduction of NO_x emissions. However, the entire system requires studies of combustion stability for adequate functionality.

These studies contemplate the fuel and air flow rates for flame existence/stability and evaluation of adequate conditions for combustion processes stability avoiding the formation of pressure fluctuations, thermoacoustic instabilities and pulsating combustion. Adding the analysis of acoustics oscillations, instabilities zones map and mixture equivalence ratios to correlates the theoretical results with experiments goals.

KEYWORDS: Combustion Instability. Plasma system burner. Thermoacoustic oscillations. Pulsating Combustion.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Esquema isométrico do queimador utilizado no trabalho com reator a plasma acoplado.	20
Figura 2	Corte longitudinal composto do reator e entradas de gases da chama principal e do reator.	21
Figura 3	Foto do reator montado diagonal traseira, com a visualização dos cabos e tubos dos sistemas de alimentação do queimador e reator.	22
Figura 4	Reator montado, vista diagonal frontal, com a visualização do swirler e tubo de entrada de gases.	22
Figura 5	Foto lateral da montagem do reator acoplado à câmara de combustão.	23
Figura 6	Foto diagonal traseira do reator acoplado à câmara de combustão.	24
Figura 7	Ilustração esquemática do sistema de alimentação elétrica do reator. São apresentados a fonte de alimentação elétrica, o banco de resistores e as ligações no sistema. O reator é o eletrodo negativo, enquanto que a parede do queimador é o eletrodo aterrado.	25
Figura 8	Foto da montagem sistema de alimentação elétrico com fonte de tensão e banco de resistores.	25
Figura 9	Espectro acústico sem combustão, somente com injeção de ar.	30
Figura 10	Espectro acústico sem combustão e sem injeção de ar e combustível.	30
Figura 11	Espectro acústico até 60 Hz para 100% $\dot{m}_{Fa}$ e 0% $\dot{m}_{Fr}$ com vazão total de combustível de 1,0 g/s.	32
Figura 12	Espectro acústico até 60 Hz para 75% $\dot{m}_{Fa}$ e 25% $\dot{m}_{Fr}$ com vazão total de combustível de 1,0 g/s.	33
Figura 13	Espectro acústico até 60 Hz para 50% $\dot{m}_{Fa}$ e 50% $\dot{m}_{Fr}$ com vazão total de combustível de 1,0 g/s.	33
Figura 14	Espectro acústico até 60 Hz para 25% $\dot{m}_{Fa}$ e 75% $\dot{m}_{Fr}$ com vazão total de combustível de 1,0 g/s.	34
Figura 15	Espectro acústico até 60 Hz para 0% $\dot{m}_{Fa}$ e 100% $\dot{m}_{Fr}$ com vazão total de combustível de 1,0 g/s.	34
Figura 16	Espectro acústico até 60 Hz para 100% $\dot{m}_{Fa}$ e 0% $\dot{m}_{Fr}$ com vazão total de combustível de 0,5 g/s.	37

Figura 17 Espectro acústico até 60 Hz para 75% $\dot{m}_{Fa}$ e 25% $\dot{m}_{Fr}$ com vazão total de	
combustível de 0,5 g/s	38
Figura 18 Espectro acústico até 60 Hz para 25% $\dot{m}_{Fa}$ e 75% $\dot{m}_{Fr}$ com vazão total de	
combustível de 0,5 g/s	38
Figura 19 Espectro acústico até 60 Hz para 0% $\dot{m}_{Fa}$ e 100% $\dot{m}_{Fr}$ com vazão total de	
combustível de 0,5 g/s	39
Figura 20 Gráfico de Razão de Equivalência (Φ) x Amplitude de Pressão (mbar) para $\dot{m}_{Ft}$	
= 1,0 g/s	41
Figura 21 Gráfico de zona de instabilidade do sistema mediante tipo de injeção de combus-	
tível e razão de quantidade de ar para combustível total.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise da diminuição vazão de ar no sistema.	28
Tabela 2 – Análise do aumento vazão de ar no sistema.	28
Tabela 3 – Dados experimentais das mínimas vazões de ar atingidas para estabilidade do processo de combustão no sistema de acordo com diferentes configurações de injeção de combustível.	29
Tabela 4 – Dados experimentais dos picos de Amplitudes de Pressão até 60 Hz para 1,0 g/s de vazão total de combustível para cinco configurações: (i) 100% $\dot{m}_{Fa}$ e 0% $\dot{m}_{Fr}$; (ii) 75% $\dot{m}_{Fa}$ e 25% $\dot{m}_{Fr}$; (iii) 50% $\dot{m}_{Fa}$ e 50% $\dot{m}_{Fr}$; (iv) 25% $\dot{m}_{Fa}$ e 75% $\dot{m}_{Fr}$; (v) 0% $\dot{m}_{Fa}$ e 100% $\dot{m}_{Fr}$	32
Tabela 5 – Dados experimentais das Frequências até 60 Hz dos picos para 1,0 g/s de vazão total de combustível para cinco configurações: (i) 100% $\dot{m}_{Fa}$ e 0% $\dot{m}_{Fr}$; (ii) 75% $\dot{m}_{Fa}$ e 25% $\dot{m}_{Fr}$; (iii) 50% $\dot{m}_{Fa}$ e 50% $\dot{m}_{Fr}$; (iv) 25% $\dot{m}_{Fa}$ e 75% $\dot{m}_{Fr}$; (v) 0% $\dot{m}_{Fa}$ e 100% $\dot{m}_{Fr}$	32
Tabela 6 – Dados experimentais dos picos de Amplitudes de Pressão entre 60 a 100 Hz para 1,0 g/s de vazão total de combustível para cinco configurações: (i) 100% $\dot{m}_{Fa}$ e 0% $\dot{m}_{Fr}$; (ii) 75% $\dot{m}_{Fa}$ e 25% $\dot{m}_{Fr}$; (iii) 50% $\dot{m}_{Fa}$ e 50% $\dot{m}_{Fr}$; (iv) 25% $\dot{m}_{Fa}$ e 75% $\dot{m}_{Fr}$; (v) 0% $\dot{m}_{Fa}$ e 100% $\dot{m}_{Fr}$	35
Tabela 7 – Dados experimentais das Frequências entre 60 a 100 Hz dos picos para 1,0 g/s de vazão total de combustível para cinco configurações: (i) 100% $\dot{m}_{Fa}$ e 0% $\dot{m}_{Fr}$; (ii) 75% $\dot{m}_{Fa}$ e 25% $\dot{m}_{Fr}$; (iii) 50% $\dot{m}_{Fa}$ e 50% $\dot{m}_{Fr}$; (iv) 25% $\dot{m}_{Fa}$ e 75% $\dot{m}_{Fr}$; (v) 0% $\dot{m}_{Fa}$ e 100% $\dot{m}_{Fr}$	35
Tabela 8 – Dados experimentais dos picos de Amplitudes de Pressão maiores que 100 Hz para 1,0 g/s de vazão total de combustível para cinco configurações: (i) 100% $\dot{m}_{Fa}$ e 0% $\dot{m}_{Fr}$; (ii) 75% $\dot{m}_{Fa}$ e 25% $\dot{m}_{Fr}$; (iii) 50% $\dot{m}_{Fa}$ e 50% $\dot{m}_{Fr}$; (iv) 25% $\dot{m}_{Fa}$ e 75% $\dot{m}_{Fr}$; (v) 0% $\dot{m}_{Fa}$ e 100% $\dot{m}_{Fr}$	35
Tabela 9 – Dados experimentais das Frequências maiores que 100 Hz dos picos para 1,0 g/s de vazão total de combustível para cinco configurações: (i) 100% $\dot{m}_{Fa}$ e 0% $\dot{m}_{Fr}$; (ii) 75% $\dot{m}_{Fa}$ e 25% $\dot{m}_{Fr}$; (iii) 50% $\dot{m}_{Fa}$ e 50% $\dot{m}_{Fr}$; (iv) 25% $\dot{m}_{Fa}$ e 75% $\dot{m}_{Fr}$; (v) 0% $\dot{m}_{Fa}$ e 100% $\dot{m}_{Fr}$	36

Tabela 10 – Dados experimentais dos picos de Amplitudes de Pressão até 60 Hz para 0,5 g/s de	
vazão total de combustível para quatro configurações: (i) 100% $\dot{m}_{Fa}$ e 0% $\dot{m}_{Fr}$;	
(ii) 75% $\dot{m}_{Fa}$ e 25% $\dot{m}_{Fr}$; (iii) 25% $\dot{m}_{Fa}$ e 75% $\dot{m}_{Fr}$; (iv) 0% $\dot{m}_{Fa}$ e 100% $\dot{m}_{Fr}$.	36
Tabela 11 – Dados experimentais das Frequências até 60 Hz dos picos para 0,5 g/s de vazão	
total de combustível para quatro configurações: (i) 100% $\dot{m}_{Fa}$ e 0% $\dot{m}_{Fr}$; (ii) 75%	
$\dot{m}_{Fa}$ e 25% $\dot{m}_{Fr}$; (iii) 25% $\dot{m}_{Fa}$ e 75% $\dot{m}_{Fr}$; (iv) 0% $\dot{m}_{Fa}$ e 100% $\dot{m}_{Fr}$.	37
Tabela 12 – Dados experimentais dos picos de Amplitudes de Pressão entre 60 a 100 Hz para	
0,5 g/s de vazão total de combustível para quatro configurações: (i) 100% $\dot{m}_{Fa}$ e 0%	
$\dot{m}_{Fr}$; (ii) 75% $\dot{m}_{Fa}$ e 25% $\dot{m}_{Fr}$; (iii) 25% $\dot{m}_{Fa}$ e 75% $\dot{m}_{Fr}$; (iv) 0% $\dot{m}_{Fa}$ e 100%	
$\dot{m}_{Fr}$.	39
Tabela 13 – Dados experimentais das Frequências maiores que 100 Hz dos picos para 0,5 g/s	
de vazão total de combustível para quatro configurações: (i) 100% $\dot{m}_{Fa}$ e 0% $\dot{m}_{Fr}$;	
(ii) 75% $\dot{m}_{Fa}$ e 25% $\dot{m}_{Fr}$; (iii) 25% $\dot{m}_{Fa}$ e 75% $\dot{m}_{Fr}$; (iv) 0% $\dot{m}_{Fa}$ e 100% $\dot{m}_{Fr}$.	39
Tabela 14 – Dados experimentais dos picos de Amplitudes de Pressão maiores que 100 Hz para	
0,5 g/s de vazão total de combustível para quatro configurações: (i) 100% $\dot{m}_{Fa}$	
e 0% $\dot{m}_{Fr}$; (ii) 75% $\dot{m}_{Fa}$ e 25% $\dot{m}_{Fr}$; (iii) 25% $\dot{m}_{Fa}$ e 75% $\dot{m}_{Fr}$; (iv) 0% $\dot{m}_{Fa}$ e	
100% $\dot{m}_{Fr}$.	40
Tabela 15 – Dados experimentais das Frequências maiores que 100 Hz dos picos para 0,5 g/s	
de vazão total de combustível para quatro configurações: (i) 100% $\dot{m}_{Fa}$ e 0% $\dot{m}_{Fr}$;	
(ii) 75% $\dot{m}_{Fa}$ e 25% $\dot{m}_{Fr}$; (iii) 25% $\dot{m}_{Fa}$ e 75% $\dot{m}_{Fr}$; (iv) 0% $\dot{m}_{Fa}$ e 100% $\dot{m}_{Fr}$.	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LCPE	Laboratório de Combustão, Propulsão e Energia
DC	Direct Current (Corrente Contínua)
GNV	Gás Natural Veicular
M	Mossa Molar

LISTA DE SÍMBOLOS

P'	Pressão Acústica do Sistema [Pa]
Q'	Liberação de Energia do Sistema [W/m^3]
Li	Dissipação ou Amortecimento de Energia do Sistema [W/kg]
V	Volume da Câmara [m^3]
T	Período de Oscilação [s]
$\dot{m}_{ar}$	Vazão Mássica de Ar [g/s]
$\dot{m}_{Ft}$	Vazão Mássica de Combustível Total [g/s]
$\dot{m}_{Fa}$	Vazão Mássica de Combustível de Injeção Axial [g/s]
$\dot{m}_{Fr}$	Vazão Mássica de Combustível de Injeção Radial [g/s]
m_c	Massa Total de Combustível [g/s]
m_{ar}	Massa Total de Ar [g]
M_{ar}	Massa Molar de Ar [g/mol]
M_c	Massa Molar de Combustível [g/mol]
Φ	Razão de Equivalência da Mistura Ar-Combustível
A	Soma das Massas Molares do Ar (Oxidante) na Reação Química de Combustão [g/mol]
C	Soma das Massas Molares do Combustível na Reação Química de Combustão [g/mol]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	17
1.2	Revisão Bibliográfica	18
2	MATERIAIS E MÉTODOS	20
2.1	Queimador com Reator Acoplado	20
2.2	Queimador Acoplado a uma Câmara de Combustão	23
2.3	Sistemas de Alimentação	24
2.3.1	Sistema Elétrico	24
2.3.2	Sistema de Injeção de Gases e Combustível	24
2.4	Sistema de Análise de Instabilidades de Combustão	25
3	ANÁLISE DE INSTABILIDADES ACÚSTICAS	27
3.1	Resultados dos Procedimentos Experimentais	27
3.2	Efeitos da Variação da Vazão de Entrada sob a Vazão de Saída do Sistema	27
3.3	Testes dos Espectros Acústicos	28
3.3.1	Comparação de Espectros Acústicos	29
3.3.1.1	Investigação de possível Sinal de Interferência	29
3.3.1.2	Análise detalhada dos Gráficos Comparativos de Espectros Acústicos para 1,0 g/s de Vazão Total de Combustível	31
3.3.1.2.1	Análise de espectros de bandas de frequência até 60Hz para $\dot{m}_{Ft} = 1,0$ g/s	31
3.3.1.2.2	Análise de espectros de bandas de frequência entre 60 a 100 Hz para $\dot{m}_{Ft} = 1,0$ g/s	33
3.3.1.2.3	Análise de espectros de bandas de frequência maiores que 100 Hz para $\dot{m}_{Ft} = 1,0$ g/s	34
3.3.1.3	Análise detalhada dos Gráficos Comparativos de Espectros Acústicos para 0,5 g/s de Vazão Total de Combustível	36
3.3.1.3.1	Análise de espectros de bandas de frequência até 60Hz para $\dot{m}_{Ft} = 0,5$ g/s	36
3.3.1.3.2	Análise de espectros de bandas de frequência entre 60 a 100 Hz para $\dot{m}_{Ft} = 0,5$ g/s	37
3.3.1.3.3	Análise de espectros de bandas de frequência maiores que 100 Hz para $\dot{m}_{Ft} = 0,5$ g/s	39
3.4	Análise das Razões de Equivalência das Misturas	40
3.4.1	Excesso de Ar e Considerações Finais	42
3.5	Mapeamento de Zonas de Condições Instáveis do Sistema	42

4 CONCLUSÃO 44

REFERÊNCIAS 46

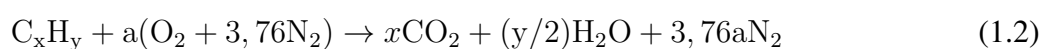
1 INTRODUÇÃO

A combustão se alia aos principais artifícios de desenvolvimento humano desde a Pré-História com o domínio do fogo (JAMES, 2017) para a sobrevivência, defesa, cozimento de alimentos e caça (WEINER et al., 1998). A partir de avanços tecnológicos, as utilizações dos processos de combustão se tornaram mais amplos e complexos com a utilização de queimadores para processos industriais, como exemplo, fonte de energia fabril de usinas termoelétricas.

O processo de combustão se define, como uma oxidação rápida acompanhada por aquecimento e, usualmente, luz (TURNES, 2013). A combustão ou queima é uma reação química exotérmica entre um combustível e um comburente, que se tratam geralmente de hidrocarbonetos e oxigênio respectivamente para a liberação de calor e luz formando produtos de resultantes da combinação de átomos da reação. A reação converte a energia armazenada em ligações químicas em energia térmica que pode ser utilizada em diversas formas, ou seja, entende-se como uma perda de elétrons do combustível para, tipicamente, o oxigênio de forma que uma parcela de combustível oxida fornecendo energia para a outra parcela de combustível queimar, dando origem a um processo exotérmico em cadeia (TURNES, 2013). Uma simplificação do processo de combustão é feita, assumindo que ela possa ser escrita como uma reação química única do tipo:



Acerca da reação de combustão geral, implica-se conceitos de estequiometria e balanço de massa para a analisar o tipo de mistura na combustão, em relação à quantidade combústivel existente sobre a quantidade de oxidante, podendo ser uma mistura pobre ou uma mistura rica. A estequeometria quantifica a massa do oxidante necessária para a combustão completa do combustível. O oxidante estequiométrico é determinado pela apresentação de um simples balanço atômico, assumindo que o combustível reaja de forma ideal para a formação completa dos produtos. Para um combustível hidrocarboneto padrão C_xH_y , a relação estequiométrica pode ser expressada como (assumindo a composição do ar de 21 por cento de gás oxigênio e 79 por cento de gás nitrogênio): (TURNES, 2013)



sendo

$$a = x + y/4 \quad (1.3)$$

Em relação aos produtos do processo de combustão, muitos deles são os principais fatores de poluição ambiental e considerados gases contribuintes para o efeito estufa (RODHE, 1990) e aquecimento global (FORUM, 2012). Os principais produtos poluentes são os óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de enxofre (SO_x) e particulados (CALTECH, 1988), os quais são compostos com alto grau de toxicidade, podendo provocar danos à saúde humana relacionada a doenças respiratórias, enfisemas, bronquites e agravar casos de doenças cardíacas (FORUM, 2012). Como também, tais substâncias são causadoras de prejudiciais efeitos ambientais como a chuva ácida (PARUNGO; NAGAMOTO; MADDL, 1987) e danos nos ciclos biogeoquímicos do planeta.

No aspecto do processo químico da combustão, o tempo de reação e os produtos dela são derivados das condições termoquímicas presentes no processo. Todos os resultados são dependentes da estabilidade ou instabilidade da reação global. Para isso, afim de viabilizar a possível redução de gases NO_x do projeto final, este trabalho analisará com enfoque nas condições adequadas de manutenção da estabilidade dos processos de combustão em um específico queimador com a utilização de plasma gerado por arco deslizante.

Portanto, a ênfase geral deste trabalho se atribui à otimização e avaliação de problemas de instabilidade nos processos de combustão com flutuações de pressão que causam um acoplamento termo-acústico e uma combustão pulsante. Esta análise será feita no projeto de queimador assistido a plasma para proposta alternativa de redução de emissão de NO_x da tese de doutorado de Armando José Pinto, coordenado por Dr. Pedro Teixeira Lacava no Laboratório de Combustão, Propulsão e Energia (LCPE) no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) em São José dos Campos, São Paulo, Brasil.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho de graduação é estudar as instabilidades de combustão e identificar condições estáveis de combustão em um sistema de queimador de gás natural assistido a plasma de arco deslizante.

Para o cumprimento dos objetivos gerais, são desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

1. Avaliar os efeitos da diminuição e aumento da vazão de entrada sob a vazão de saída do sistema;
2. Executar testes dos espectros acústicos;
3. Avaliar relação das instabilidades acústicas com razões de equivalência das misturas;
4. Mapear condições de instabilidades do sistema.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As instabilidades de combustão são oscilações de pressão causadas pelo acoplamento entre termoacústica e a dinâmica do escoamento durante o processo de combustão (LACAVA, 2014), as quais ocorrem devido a interações de vórtices, ondas de pressão e liberação de calor da reação exotérmica de combustão (ALMEIDA, 2011). O que pode gerar oscilações autoexcitadas, as quais originam problemas de aumento de ruídos, danos estruturais ao sistema e diminuição da eficiência de combustão (KANG; CULICK; RATNER, 2007). Ou seja, essas instabilidades são consequências de interações entre o processo de combustão e campos acústicos no interior do combustor, causadas por possíveis perturbações aerodinâmicas e flutuações de fornecimento de ar ou combustível com variações devido aos injetores e a má distribuição do combustível na zona de combustão, ocasionando um ciclo de extinção e re-ignição em regiões localizadas da chama (LEFEBVRE, 1998).

Uma definição formal de instabilidades de combustão, seria um processo de queima que apresenta como característica principal o fato das variáveis de estado que descrevem as condições na zona de queima ocorrerem sob condições oscilatórias (FERREIRA et al., 2002), tendo como consequência, uma maior troca de calor por convecção causando o aquecimento das paredes da câmara e a alteração do processo de combustão (combustão pulsante).

A origem das instabilidades em câmaras de combustão pode ser estabelecida pelo Critério de Rayleigh (RAYLEIGH, 1878), o qual identifica três principais afirmações: se o calor é adicionado a um escoamento durante a fase de compressão acústica, ou retirado durante a fase de rarefação, as instabilidades de pressão serão amplificadas; se o calor é adicionado na fase de rarefação ou retirado na fase de compressão, a amplitude de oscilação diminuirá; esse critério estabeleceu que há um inegável relação dinâmica entre a energia liberada pelas reações de combustão e as oscilações de pressão na câmara, além de estabelecer as condições necessárias para o surgimento das instabilidades. O Critério de Rayleigh pode ser estabelecido pela expressão mostrada na Equação 1.4.

$$\int_V \int_T P'(x, t) Q'(x, t) dt dv \geq \int_V \int_T Li(x, t) dt dv \quad (1.4)$$

Sendo P' é a pressão acústica, Q' a flutuação de liberação de energia, Li é o i -ésimo mecanismo de dissipação ou amortecimento de energia, V o volume da câmara e T o período de oscilação.

Pela interpretação matemática do critério apresentado, conclui-se que as instabilidades na combustão ocorrem quando pequenas perturbações crescem ao ponto de ultrapassar as forças de dissipação, sendo estas, condições necessárias, mas não suficiente para que ocorra qualquer instabilidade em câmaras de combustão (ZINN, 1986).

A sequência de eventos para a ocorrência de instabilidades seria, então, a flutuação de liberação de energia, a flutuação de pressão com a excitação dos modos acústicos do combustor, e o acoplamento acústico com a combustão se propagando de forma pulsada (LACAVA; CARVALHO; MCQUAY, 1997). Em que a flutuação de liberação de energia pode ser oriunda de flutuações na alimentação do combustível ou do oxidante, problemas com a formação do reagente devido a distribuição não homogênea da razão de equivalência, operações com misturas próximas à extinção e interação entre o processo de liberação de energia e a dinâmica do escoamento reativo.

Há três principais categorias de instabilidades acústicas: as instabilidades intrínsecas; instabilidades de sistema; instabilidades da câmara. As intrínsecas abordam a cinética química e difusão térmica do processo, já as de sistemas são relacionadas à interação de sistemas de alimentação e exaustão e por fim, as instabilidades da câmara tratam de instabilidades acústicas dentro da câmara de combustão, devido aos campos acústico e dinâmica dos fluidos. Com isso, a análise deste trabalho tem enfoque na terceira categoria, sendo que foram observados danos estruturais no sistema, grande amplitude de ruídos e ocorrência de instabilidades acústicas de combustão devido à geometria da câmara de combustão, as quais restringem as condições de existência da chama e estabilidade do processo de combustão (WILLIAMS, 1994).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

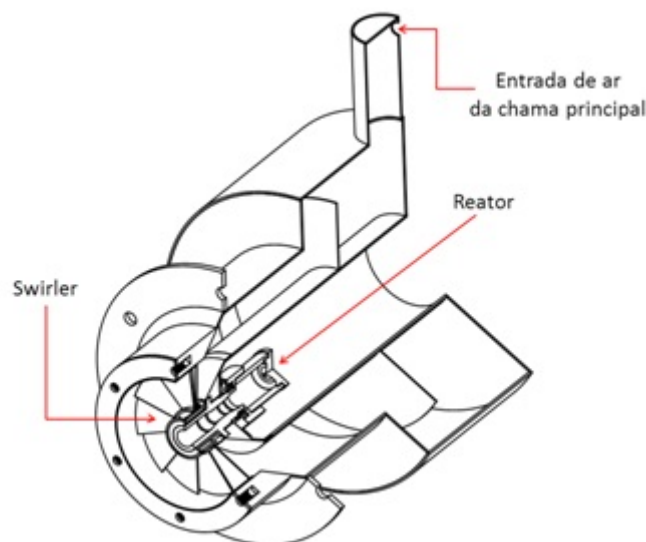
O projeto deste trabalho é composto por um sistema de um queimador convencional de gás natural (GNV) acoplado a uma câmara de combustão e a um reator, com sistemas de alimentação e análises de instabilidades para os estudos dos resultados. O sistema foi construído pela Polaris Engenharia e montado por Armando José Pinto e está presente no Laboratório de Combustão, Propulsão e Energia – LCPE no Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA em São José dos Campos, São Paulo, Brasil.

Toda montagem do projeto será descrita em etapas nos subitens seguintes.

2.1 QUEIMADOR COM REATOR ACOPLADO

O queimador utilizado no sistema foi projetado pela empresa Polaris Engenharia, construído por sua totalidade de aço inoxidável com dimensões aproximadas de 28,5 cm de diâmetro de fundo, 15,0 cm de diâmetro externo de saída de gases e 41,0 cm de comprimento. Para ancorar a chama consequente do processo de combustão que ocorre no queimador, utiliza-se o componente *swirler*, que se constitui em um sistema de pás axiais com inclinação máxima e fixa de 80° , que promovem a estabilização de chamas turbulentas. O projeto e desenho esquemático são apresentados nas Fig. 1 e 2 e o sistema real montado é apresentado nas Fig. 3 e 4.

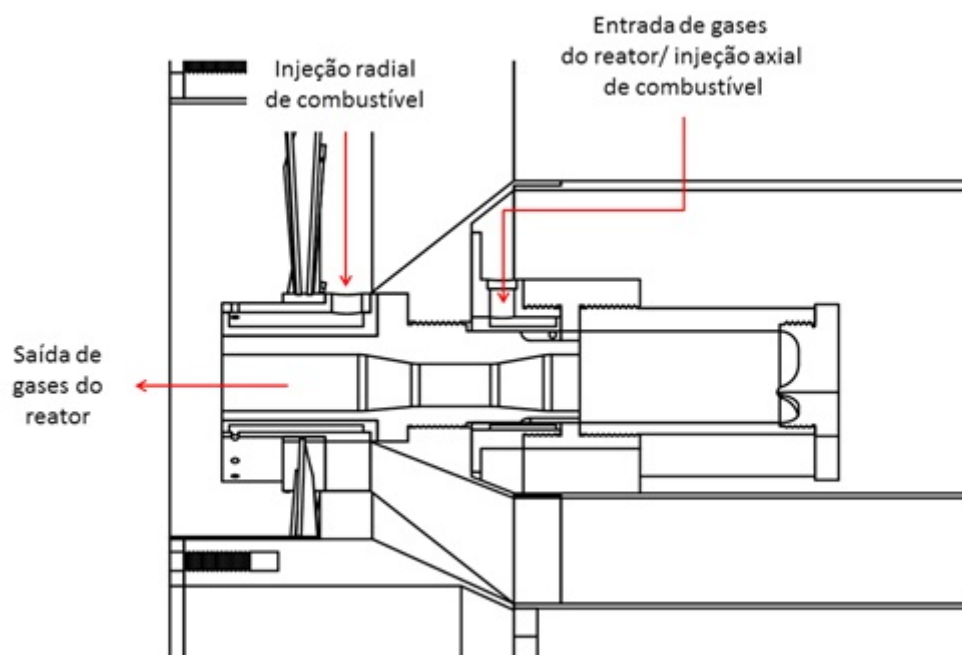
Figura 1 – Esquema isométrico do queimador utilizado no trabalho com reator a plasma acoplado.



Fonte: POLARIS ENGENHARIA (2007)

Os desenhos esquemáticos (Fig.1 e 2) apresentam dois canais individuais de injeção de combustível no queimador, os quais permitem três configurações de injeção de combustível distintas no sistema:

Figura 2 – Corte longitudinal composto do reator e entradas de gases da chama principal e do reator.



Fonte: POLARIS ENGENHARIA (2007)

injeção radial, injeção axial ou injeção estagiada (a injeção de combustível ocorre simultaneamente de forma radial e axial em proporções e vazões variadas).

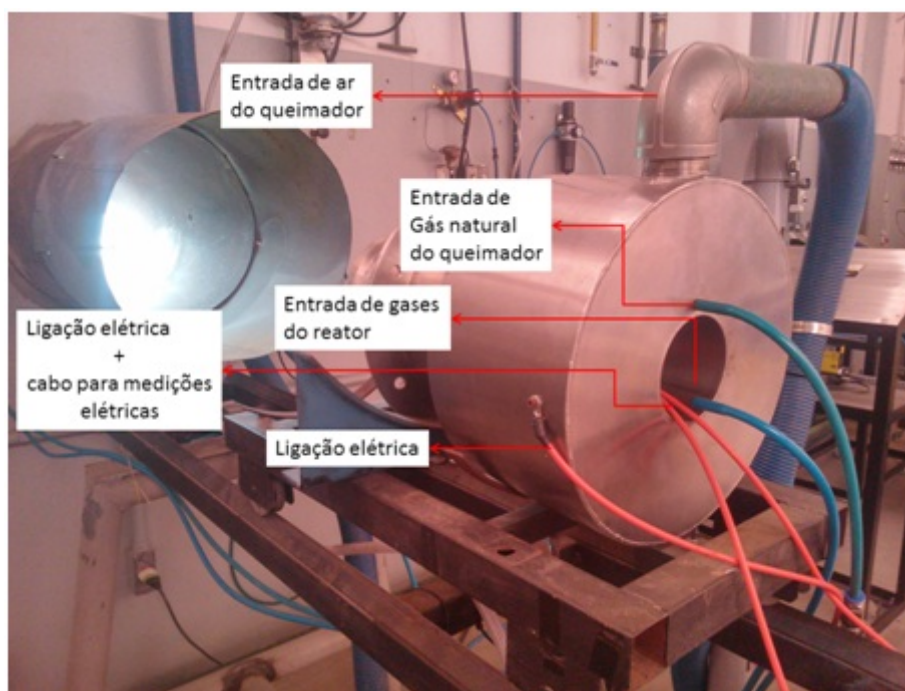
A segunda configuração mencionada, a injeção axial, tem a exigência de que o combustível passe necessariamente pelo reator a plasma de arco deslizante, pois utiliza o mesmo canal de entrada de gases. A injeção ocorre de forma tangencial à parede externa de um bocal convergente-divergente, o qual tem o objetivo de acelerar o fluxo de partículas para a região da chama e se apresentar como um eletrodo para a geração de plasma no reator. Sendo assim, possível que o fluxo de gás girante siga a parede do bocal para o interior do reator e acelerado na saída para a região da chama.

O reator consiste em um cilindro de inteiramente de aço inoxidável de dimensões de 35,8 mm de diâmetro externo, 50,0 mm de comprimento e de 10,1 mm de espessura da parede. Com um componente com rosca de aço inoxidável com função de tampa para estabilização do arco em carga estacionária. Sendo que o reator é operado em regime de vórtice reverso.

A injeção de ar na chama é feita constantemente na mesma configuração, pois foi projetada para adquirir a refrigeração das paredes do queimador, diferentemente da injeção de combustível que pode ser feita em três distintas formas. Portanto, o trajeto do ar até o swirler permite que reduza a transferência de calor para a parede externa do queimador, assegurando maior vida útil do sistema e adequadas condições de operação.

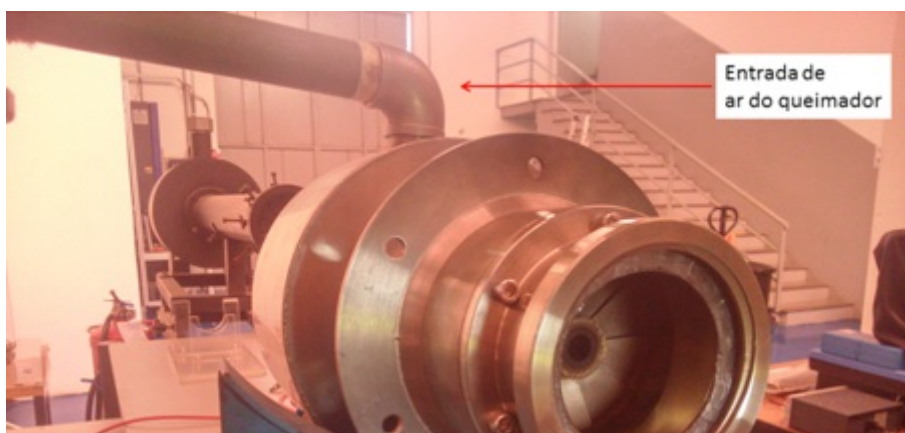
Como mencionado anteriormente, a injeção axial tem um funcionamento de eletrodo para o plasma,

Figura 3 – Foto do reator montado diagonal traseira, com a visualização dos cabos e tubos dos sistemas de alimentação do queimador e reator.



Fonte: PINTO (2016)

Figura 4 – Reator montado, vista diagonal frontal, com a visualização do swirler e tubo de entrada de gases.



Fonte: PINTO (2016)

sendo que o outro eletrodo seria a parede do reator, existindo uma distância de aproximadamente 3,6 mm entre eles. O plasma é gerado entre o cilindro e o bocal e empurrado para o interior do reator, pela injeção de gás tangencial à parede externa do bocal e direcionado para o interior do cilindro, promovendo o essencial fluxo girante da operação.

Como o reator disponibiliza de apenas uma entrada de gás, o plasma gerado é necessariamente oriundo de uma pré-mistura de metano e ar. Assim, o reator é acoplado ao queimador por uma peça de rosqueamento interno o que permite obter acesso por uma entrada tubular, evitando a necessidade de desmonte do queimador.

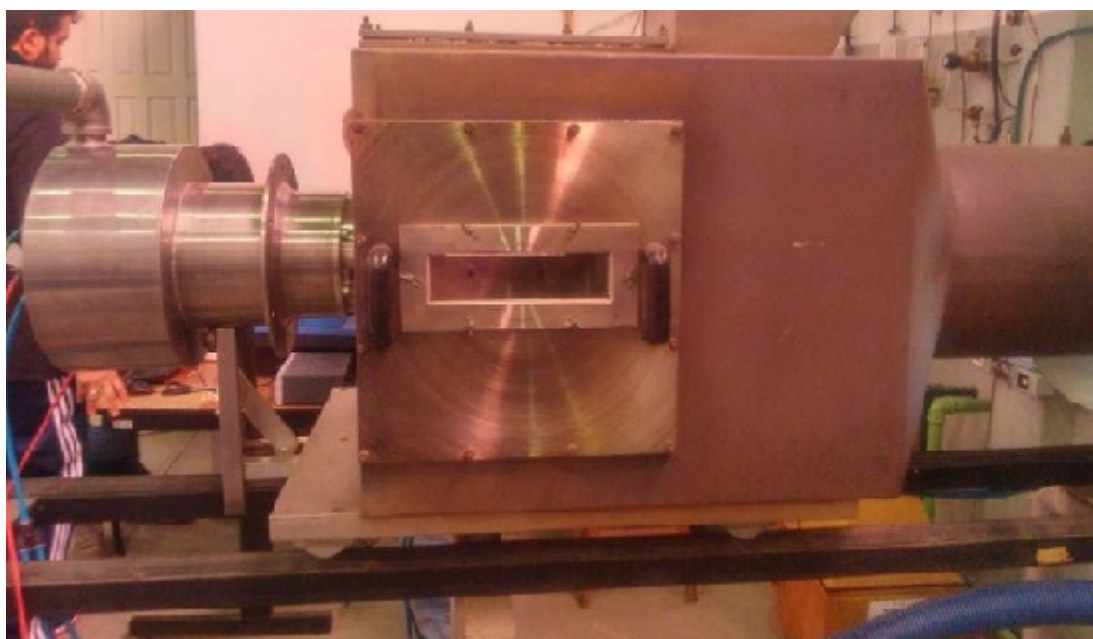
2.2 QUEIMADOR ACOPLADO A UMA CÂMARA DE COMBUSTÃO

Pelo fato de corrente de ar externo possibilitassem a interferência e influência na estabilidade da chama e a razão de equivalência real da reação, é utilizado uma câmara de combustão acoplada ao reator (ALVES, 2013). A câmara de combustão já era existente no LCPE e foi fabricada e utilizada anteriormente em no trabalho de doutorado de ALVES (2013).

A câmara é constituída inteiramente de aço inoxidável, composta de um cubo de 60,0 cm de aresta com um tubo de 50 cm de comprimento e 31,0 cm de diâmetro para a exaustão de gases. O cubo apresenta duas janelas laterais de quartzo de 11,0 cm de altura e 26 cm de comprimento, com possibilidade de uma terceira janela adicional no topo. Também, possui entradas para posicionamento de termopar para análises de temperatura, sensor piezoelétrico para análises de pressões de oscilações acústicas e sonda para análise de espécies de gases.

A fim de obter o acoplamento da câmara com o reator, também foi preciso de um suporte de sustentação para o reator, sendo construído de aço inoxidável, como é mostrado na Fig. 5 e 6.

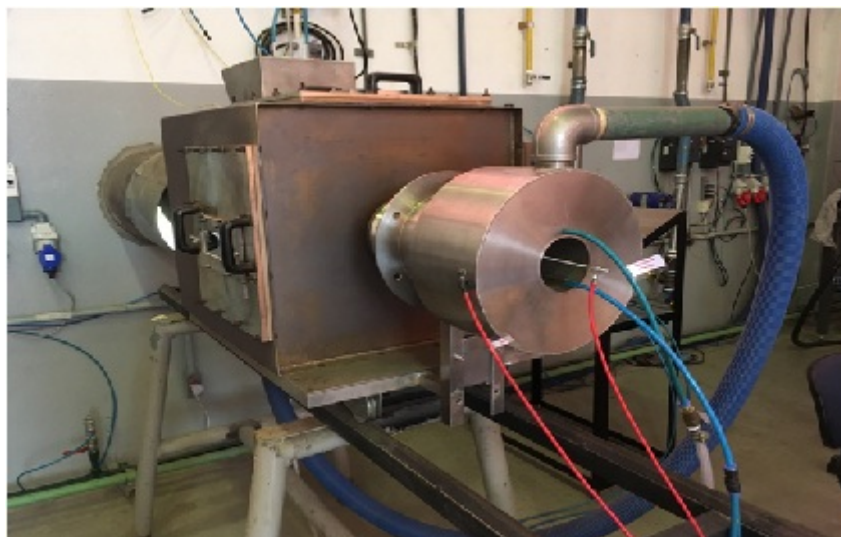
Figura 5 – Foto lateral da montagem do reator acoplado à câmara de combustão.



Fonte: PINTO (2016)

O uso de uma câmara de combustão acoplada em um reator, como mencionado anteriormente, possibilita menor influência externa à reação, proporcionando maior qualidade de medições de temperatura e de produtos resultantes da combustão. No entanto, o confinamento da chama resultante do processo de combustão pode desenvolver instabilidades acústicas (HERNANDO, 2016). Tais instabilidades de combustão no sistema são definidas como oscilações de pressões causadas pelo acoplamento entre termoacústica e o escoamento reativo no processo de combustão, como também a interação de

Figura 6 – Foto diagonal traseira do reator acoplado à câmara de combustão.



Fonte: Autoria própria (2016)

vórtices, ondas de pressão e liberação de calor que induzem a aparição de oscilações autoexcitadas que comprometem o funcionamento adequado do sistema (KANG; CULICK; RATNER, 2007). Oscilações de fluxo, vibrações estruturais de grande amplitude, aumento na taxa de transferência de calor para as paredes, retração *flashback* ou descolamento *blowoff* da chama, são os principais problemas que poderá ser encontrado no sistema (SÉ et al., 2003).

2.3 SISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO

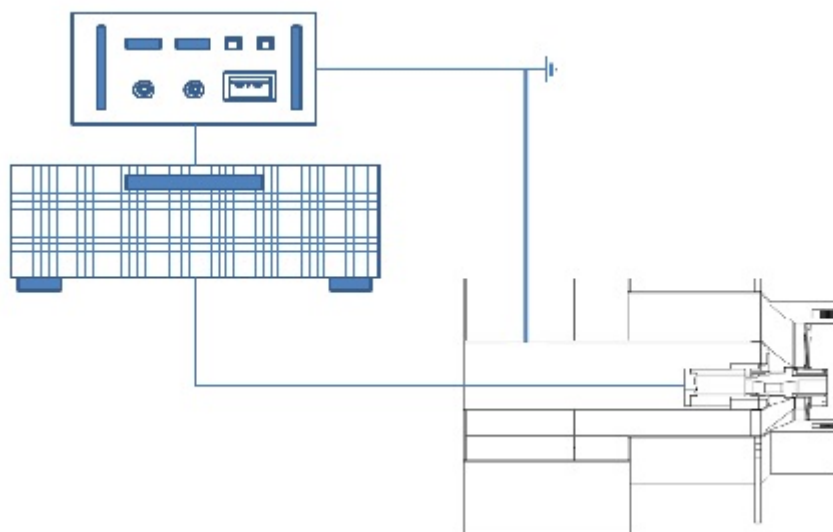
2.3.1 Sistema Elétrico

O reator disponibiliza de um sistema de alimentação elétrico constituído de uma fonte de alta tensão Unipower BRC de 10 kV e 1 A de corrente contínua (DC), com ajustes independentes de variações de corrente, tensão e polarização negativa. Entre a fonte de tensão e o plasma é acoplado um banco de resistores de resistência variável de valores fixos de 50 k Ω e 100 k Ω com 4 kW de potência de fabricação pela Denkhtherm Indústria e Comércio de Resistores e Reostatos. A esquematização do sistema de alimentação elétrico é apresentados nas Fig.7 e 8.

2.3.2 Sistema de Injeção de Gases e Combustível

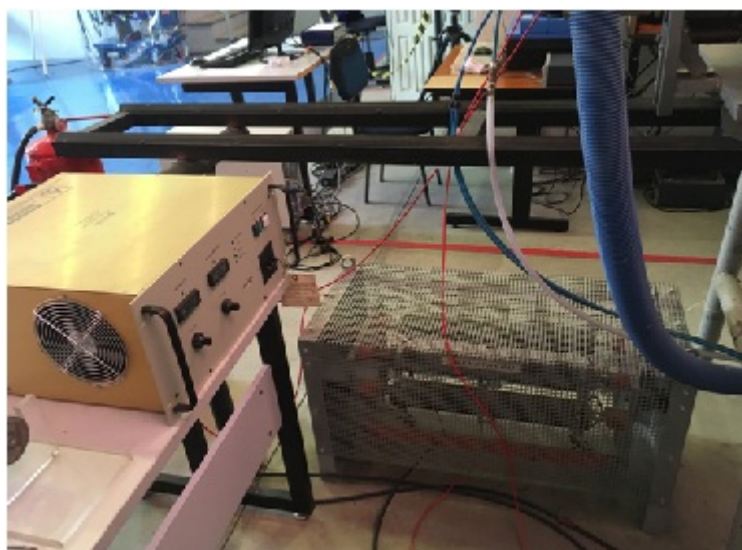
Os equipamentos utilizados para o controle de injeção de gases são os medidores de vazão Kurz – fluxo de ar para o queimador; AALBORG GFM 77 – fluxo de ar e gás natural axial para o reator e Contech FT2 – fluxo de gás natural radial para o queimador.

Figura 7 – Ilustração esquemática do sistema de alimentação elétrica do reator. São apresentados a fonte de alimentação elétrica, o banco de resistores e as ligações no sistema. O reator é o eletrodo negativo, enquanto que a parede do queimador é o eletrodo aterrado.



Fonte: PINTO (2016)

Figura 8 – Foto da montagem sistema de alimentação elétrico com fonte de tensão e banco de resistores.



Fonte: Autoria própria (2016)

2.4 SISTEMA DE ANÁLISE DE INSTABILIDADES DE COMBUSTÃO

Para obter uma análise das instabilidades acústicas de combustão presentes do sistema e enfatizado pelo acoplamento da câmara de combustão ao queimador, é utilizado um sensor piezoelétrico transdutor de pressão Klistar Model 7261 de polaridade negativa e sensibilidade de 2362 pico Coulomb/ bar com faixa de operação de 0 a 10 bar para a aquisição da espectroscopia de acústica de frequência e amplitude de pressão.

O processamento dos dados foi obtido pelo software Siemens LMS Test-Lab, o qual forneceu

ferramentas para o tratamento do sinal e os dados em tempo real. Obteve-se dados essenciais para a análise do trabalho, realizando-se testes com condições fixas de 1,0 e 0,5 g/s de vazão de combustível e vazões de ar variadas de 40,2; 42,3 e 50,0 g/s.

3 ANÁLISE DE INSTABILIDADES ACÚSTICAS

No sistema apresentado e estudado nesse trabalho apresenta a ocorrência de instabilidades acústicas de combustão, o que dificulta o funcionamento adequado do queimador e das análises finais do projeto. Neste capítulo é abordado as análises experimentais das possíveis origens das instabilidades acústicas e os comportamentos do processo de combustão em diferentes condições de injeção de ar e combustível.

3.1 RESULTADOS DOS PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A primeira análise do trabalho foi focada no objetivo de mapeamento geral das zonas de estabilidade do processo de combustão, ou seja, por observação experimental de existência da chama, do surgimento de ruídos e de possíveis danos estruturais no sistema através do monitoramento de variações manuais de vazões mássicas de ar ($\dot{m}_{ar}$) e de vazões mássicas de combustível ($\dot{m}_F$).

Como apresentado no item 2.1, o queimador possui dois tipos de injeção de combustível: axial e radial. O que permite realizar três tipos de configurações, somente injeção axial; axial e radial simultaneamente e somente radial.

Os testes foram feitos com valores fixos de vazão total de combustível ($\dot{m}_{Ft}$) e divididos em duas grandes partes: testes com 1,0 g/s e 0,5 g/s de vazões totais de combustível. Os experimentos para cada divisão se realizavam com a diminuição da vazão mássica de ar ($\dot{m}_{ar}$) e com variações nas condições de injeção de vazões de combustível axial ($\dot{m}_{Fa}$) e vazões de combustível radial ($\dot{m}_{Fr}$).

3.2 EFEITOS DA VARIAÇÃO DA VAZÃO DE ENTRADA SOB A VAZÃO DE SAÍDA DO SISTEMA

Como primeiro passo, são analisados os efeitos da diminuição da injeção de ar para injeções radiais e axiais de 1,0 g/s e 0,5 g/s de combustível e, posteriormente, experimentos com o aumento da injeção de ar com os mesmos parâmetros. A diminuição e aumento da vazão mássica de ar são feitas gradualmente até que o sistema perca estabilidade e ocasione a extinção da chama. Os resultados experimentais para cada parâmetro são apresentados nas Tab. 1 e Tab. 2.

Mediante a análise de diminuição de vazão de ar no sistema (Tab. 1), observa-se que em parâmetros de vazões de 0,5 g/s de combustível há maior variação de condições de vazões de ar para um sistema estável, isto é, vazões de 0,5 g/s têm maior *range* de condições estáveis que aplicações de 1,0 g/s de vazão de combustível. Pelo aspecto de tipo de injeção, a injeção 100% radial apresenta maior *range* de condições de existência da chama, porém não se pode concluir que é uma configuração mais estável.

Tabela 1 – Análise da diminuição vazão de ar no sistema.

$\dot{m}_{Fa}$ [g/s]	$\dot{m}_{Fr}$ [g/s]	$\dot{m}_{ar}$ (inicial) [g/s]	$\dot{m}_{ar}$ (final) [g/s]
1,0	0,0	50,0	39,5
0,0	1,0	50,0	39,9
0,5	0,0	50,0	13,4
0,0	0,5	50,0	20,0

fonte: Produção do Próprio Autor.

Tabela 2 – Análise do aumento vazão de ar no sistema.

$\dot{m}_{Fa}$ [g/s]	$\dot{m}_{Fr}$ [g/s]	$\dot{m}_{ar}$ (inicial) [g/s]	$\dot{m}_{ar}$ (final) [g/s]
1,0	0,0	50,0	80,2
0,0	1,0	50,0	81,1
0,5	0,0	50,0	80,3
0,0	0,5	50,0	81,2

fonte: Produção do Próprio Autor.

Pela análise de aumento da vazão de ar (Tab. 2), é observado os mesmos aspectos anteriores em relação ao tipo de injeção, ou seja, a injeção de combustível 100% radial apresenta maior *range* de condições com existência da chama do que a injeção 100% axial. Os parâmetros de vazões totais de combustível de 1,0 g/s e 0,5 g/s apresentam grande proximidade nos resultados de vazões finais de ar.

3.3 TESTES DOS ESPECTROS ACÚSTICOS

Foram realizados diversos testes com variadas condições de vazões de ar e de combustível a fim de analisar detalhadamente o espectro acústico que o sistema do queimador com reator acoplado na câmara de combustão obtinha. A finalidade do espectro é observar as amplitudes de pressão geradas pelas oscilações acústicas relacionadas à frequência das mesmas. Com isso, poder correlacionar e obter possíveis padrões e conclusões experimentais das ideais condições para otimização da estabilidade do processo de combustão no sistema por completo.

Os testes experimentais foram realizados em duas principais etapas: testes com 1,0 g/s de vazão de combustível e testes com 0,5 g/s de vazão de combustível. Utilizou-se a redução gradual de vazão mássica do ar para a aquisição dos dados, pois o compressor disponível opera adequadamente na faixa de segurança na vazão máxima de aproximadamente 50 g/s. Para cada etapa dos testes, utilizou-se cinco diferentes configurações de injeção de combustível: (i) 100% $\dot{m}_{Fa}$ e 0% $\dot{m}_{Fr}$; (ii) 75% $\dot{m}_{Fa}$ e 25% $\dot{m}_{Fr}$; (iii) 50% $\dot{m}_{Fa}$ e 50% $\dot{m}_{Fr}$; (iv) 25% $\dot{m}_{Fa}$ e 75% $\dot{m}_{Fr}$; (v) 0% $\dot{m}_{Fa}$ e 100% $\dot{m}_{Fr}$.

Como mencionado nos subcapítulos anteriores, por testes experimentais no sistema estudado, verificou-se (Tab. 3) que para a vazão de combustível de 0,5 g/s é obtido maior range de condições possíveis de estabilidade do que para a vazão de 1,0 g/s de combustível.

No entanto, as configurações com maior vazões de combustível radial não necessariamente apre-

Tabela 3 – Dados experimentais das mínimas vazões de ar atingidas para estabilidade do processo de combustão no sistema de acordo com diferentes configurações de injeção de combustível.

$\dot{m}_{Ft}$ [g/s]	$\dot{m}_{Fa}$ [%]	$\dot{m}_{Fr}$ (inicial) [%]	$\dot{m}_{ar}$ (mínima) [g/s]
1,0	100	0	40,17
1,0	0	100	20,33
0,5	100	0	20,17
0,5	0	100	20,0

fonte: Produção do Próprio Autor.

sentam maior estabilidade, há apenas mais pontos de existência da chama de combustão. Portanto, verifica-se que há mais possibilidade de se encontrar condições estáveis em $\dot{m}_{Ft}=0,5$ g/s. Isso foi observado nos testes de espectrometria acústica na variação da vazão mássica do ar, já que foi possível obter chama de combustão, na condição de 0,5 g/s de vazão de combustível, entre 50,0 g/s até aproximadamente 20,00 g/s de vazão de ar no sistema. Enquanto que na vazão de 1,0 g/s de combustível, especificamente na condição (i) de 100% de vazão axial de combustível, a extinção da chama, devido a perturbações acústicas, ocorre em aproximadamente 40, 17 g/s de vazão de ar.

Pelo fato de obterem-se consideráveis diferentes ranges de estabilidades para diferentes condições de injeção de combustível, todos os resultados da espectrometria analisados detalhadamente serão baseados em condições de configuração do sistema existente para todos os casos. Logo, as vazões mássicas de ar existente em todas as configurações, as quais serão os principais parâmetros de análise deste subcapítulo, são: 40,17 g/s; 42,33 g/s e 50,00 g/s.

3.3.1 Comparação de Espectros Acústicos

A fim de quantificar as amplitudes das perturbações acústicas existentes no sistema, são analisadas, por gráficos comparativos tridimensionais, as amplitudes de pressão relacionadas à frequência da oscilação e com o valor da vazão mássica de ar injetada. O sensor piezoelétrico utiliza uma faixa de 0 a 2048 Hz de análise de sinais com uma resolução de 0,25 Hz.

Os dados computados são números complexos e apresentam as partes reais e imaginárias dos sinais compilados, os quais são manipulados para apresentar o valor absoluto da amplitude de pressão através do cálculo:

$$amplitude = \sqrt{(real)^2 + (imaginario)^2} \quad (3.1)$$

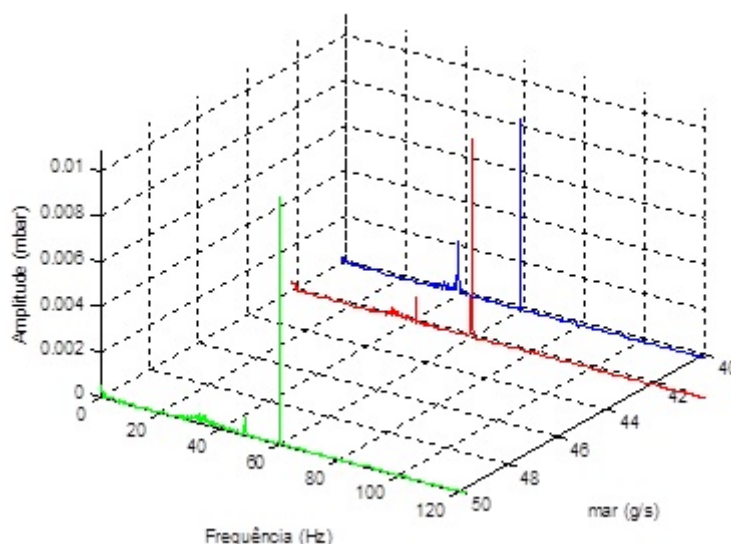
3.3.1.1 Investigação de possível Sinal de Interferência

Pelos dados obtidos em todas as baterias de testes, os sinais apresentavam o maior pico de amplitude de pressão em aproximadamente 60 Hz em uma faixa de 0 a 2048 Hz, com oscilações significantes na

faixa entre 0 a 120 Hz.

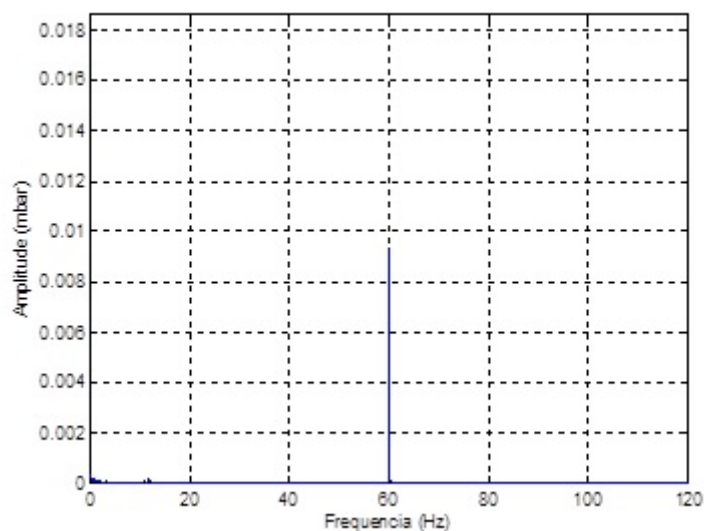
Portanto, tal constância de picos na frequência de 60 Hz se tornou uma possibilidade de alguma interferência da rede elétrica local na aquisição de dados do sensor piezoelétrico. Assim, foram feitos testes do sistema sem o processo de combustão, apenas com a injeção de ar e também se a injeção de nenhum fluido, a fim de verificar a existência do sinal na faixa de 60 Hz.

Figura 9 – Espectro acústico sem combustão, somente com injeção de ar.



Fonte: Autoria própria, 2017

Figura 10 – Espectro acústico sem combustão e sem injeção de ar e combustível.



Fonte: Autoria própria, 2017

Verifica-se (Fig. 9 e 10) que há um sinal de interferência referente à rede elétrica local exatamente em 60 Hz. Portanto, descarta-se a amplitude de pressão referente a 60 Hz dos espectros na continui-

dade do trabalho, sendo analisadas todas as demais amplitudes nas bandas da faixa de frequência, onde ocorrem as variações significativas, descartando pequenas bandas de ruídos iniciais ruídos de amplitudes não significativas na estabilidade do sistema.

3.3.1.2 Análise detalhada dos Gráficos Comparativos de Espectros Acústicos para 1,0 g/s de Vazão Total de Combustível

Como proposto anteriormente, será analisado as amplitudes de pressão referente às perturbações acústicas do sistema na faixa de 0 a 120 Hz, pois é a faixa que ocorrem as oscilações significativas em todo espectro, desconsiderando o pico em 60 Hz (referente à rede elétrica).

Os gráficos apresentados nas figuras a seguir verificarão diversos espectros a partir das cinco diferentes configurações de injeção de combustível no sistema para a vazão fixa de 1,0 g/s total de combustível.

3.3.1.2.1 Análise de espectros de bandas de frequência até 60Hz para $\dot{m}_{Ft} = 1,0$ g/s

De acordo com a Tab. 4, são avaliados os picos de amplitude de pressão existentes em todos os tipos de injeção de combustível aplicados. Nas Figuras 11-15 são apresentados graficamente os resultados obtidos do espectro acústico para cada configuração de injeção de combustível. Devido aos picos de amplitude pressão até 60 Hz serem os mais expressivos de todo o espectro, é justificado a representação gráfica exclusiva para maior detalhamento da análise.

Observa-se que os picos de amplitude se encontram nas bandas de 40,00 a 59,25 Hz (Tab. 5) e que os maiores picos de amplitude de pressão ocorrem nas configurações de 50% $\dot{m}_{Fa}$ e 50% $\dot{m}_{Fr}$ (Fig. 14), 25% $\dot{m}_{Fa}$ e 75% $\dot{m}_{Fr}$ (Fig. 15) e 0% $\dot{m}_{Fa}$ e 100% $\dot{m}_{Fr}$ (Fig. 16) com cerca de 0,5 a quase 2,0 mbar.

Esses picos de amplitude são muito significativos (especialmente o pico crítico de 1,7 mbar em $\dot{m}_{Fa}$ e 100% $\dot{m}_{Fr}$ para 40,2 g/s de vazão de ar) comparados aos demais do espectro (com cerca de 0,02 mbar) e que provavelmente, foram essenciais para uma alta flutuação de pressão que deu origem de um acoplamento termo-acústico.

Pode-se verificar que os maiores picos de amplitude de pressão ocorrem para a menor vazão de ar de 40,2 g/s. Ou seja, observa-se que há maiores flutuações de pressão em misturas mais ricas em combustível, quanto razão de equivalência da mistura, maior a probabilidade de maiores oscilações de pressão e instabilidade no sistema (Tópico discutido mais detalhadamente no seção 3.4).

Apesar das configurações com maiores quantidades de injeção radial obterem mais pontos de existência de chama neste sistema (Tab. 3), nos experimentos com 1,0 g/s de vazão de combustível, as

instabilidades de combustão foram maiores com maiores quantidades de injeção de combustível radial do que axial (Tab. 4).

Tabela 4 – Dados experimentais dos picos de Amplitudes de Pressão até 60 Hz para 1,0 g/s de vazão total de combustível para cinco configurações: (i) 100% $\dot{m}_{Fa}$ e 0% $\dot{m}_{Fr}$; (ii) 75% $\dot{m}_{Fa}$ e 25% $\dot{m}_{Fr}$; (iii) 50% $\dot{m}_{Fa}$ e 50% $\dot{m}_{Fr}$; (iv) 25% $\dot{m}_{Fa}$ e 75% $\dot{m}_{Fr}$; (v) 0% $\dot{m}_{Fa}$ e 100% $\dot{m}_{Fr}$.

$\dot{m}_{ar}$ [g/s]	i [mbar]	ii [mbar]	iii [mbar]	iv [mbar]	v [mbar]
40,2	0,0562	0,0212	0,5283	0,4090	1,7240
42,3	0,0245	0,0134	0,0091	0,0071	0,7555
50,0	0,0260	0,0200	0,0183	0,0176	0,0103

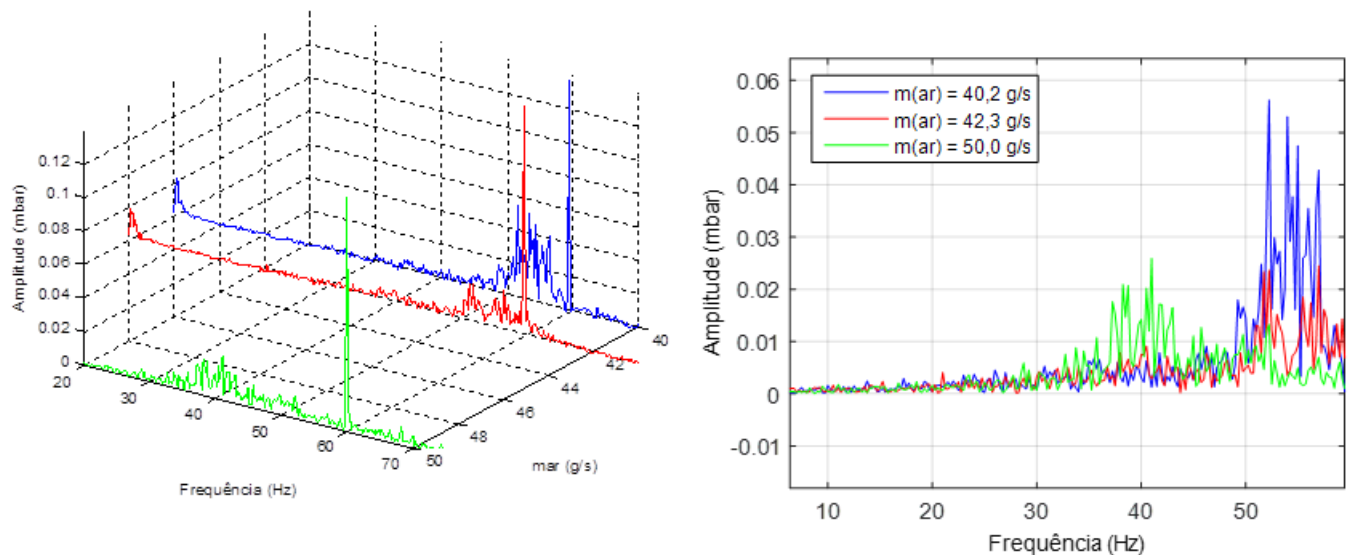
fonte: Produção do Próprio Autor.

Tabela 5 – Dados experimentais das Frequências até 60 Hz dos picos para 1,0 g/s de vazão total de combustível para cinco configurações: (i) 100% $\dot{m}_{Fa}$ e 0% $\dot{m}_{Fr}$; (ii) 75% $\dot{m}_{Fa}$ e 25% $\dot{m}_{Fr}$; (iii) 50% $\dot{m}_{Fa}$ e 50% $\dot{m}_{Fr}$; (iv) 25% $\dot{m}_{Fa}$ e 75% $\dot{m}_{Fr}$; (v) 0% $\dot{m}_{Fa}$ e 100% $\dot{m}_{Fr}$.

$\dot{m}_{ar}$ [g/s]	i [Hz]	ii [Hz]	iii [Hz]	iv [Hz]	v [Hz]
40,2	52,25	53,50	56,5	56,5	56,5
42,3	57,00	52,00	40,00	52,00	59,25
50,0	41,00	42,50	41,25	41,75	42,25

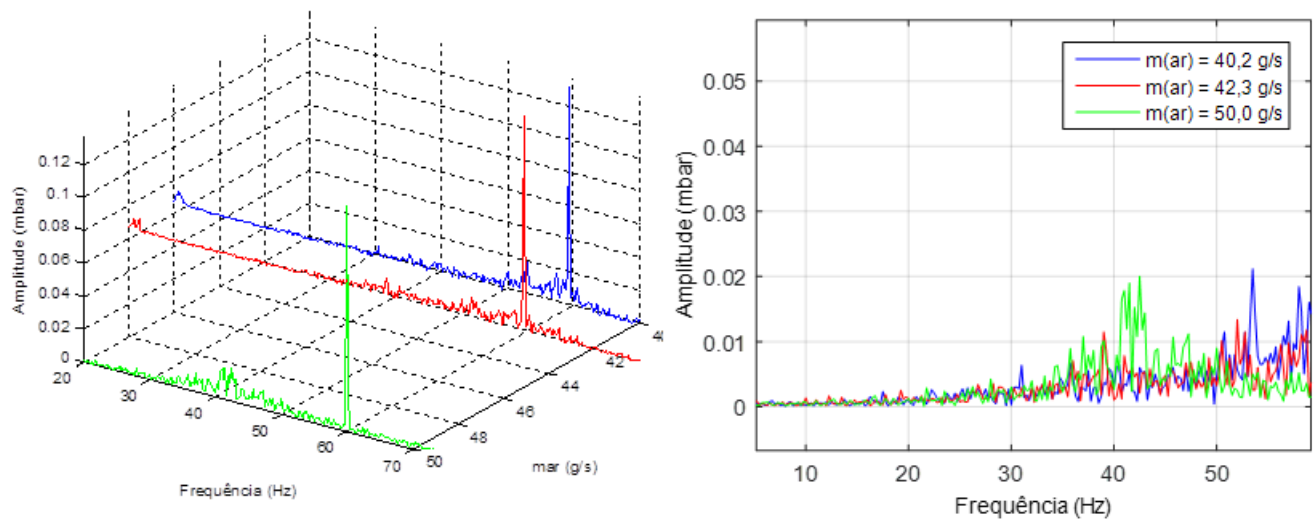
fonte: Produção do Próprio Autor.

Figura 11 – Espectro acústico até 60 Hz para 100% $\dot{m}_{Fa}$ e 0% $\dot{m}_{Fr}$ com vazão total de combustível de 1,0 g/s



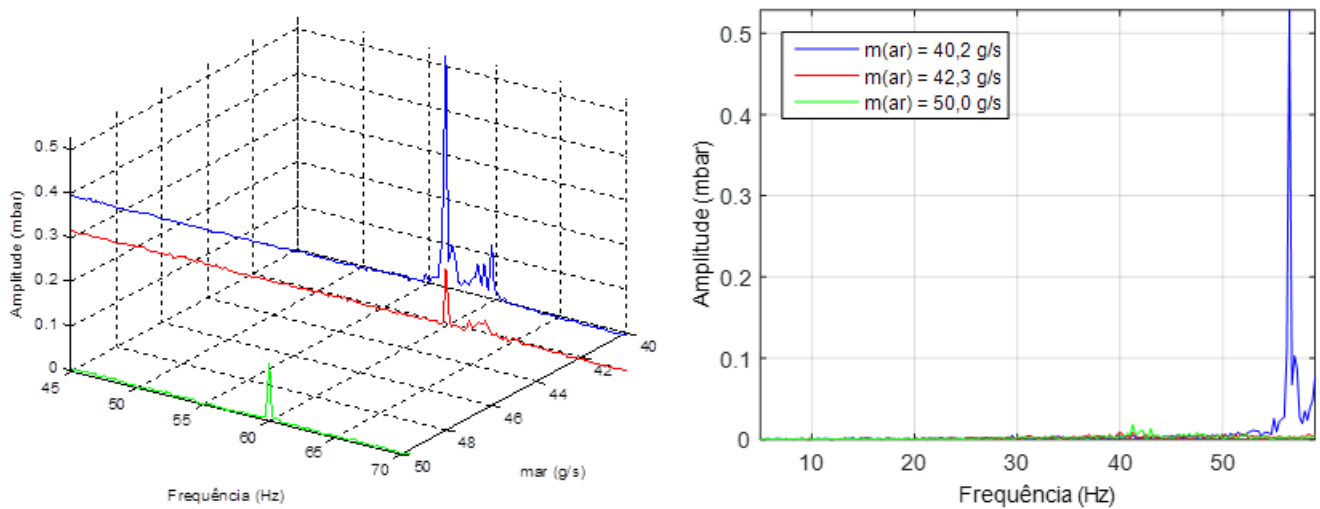
Fonte: Autoria própria, 2017

Figura 12 – Espectro acústico até 60 Hz para 75% $\dot{m}_{Fa}$ e 25% $\dot{m}_{Fr}$ com vazão total de combustível de 1,0 g/s



Fonte: Autoria própria, 2017

Figura 13 – Espectro acústico até 60 Hz para 50% $\dot{m}_{Fa}$ e 50% $\dot{m}_{Fr}$ com vazão total de combustível de 1,0 g/s



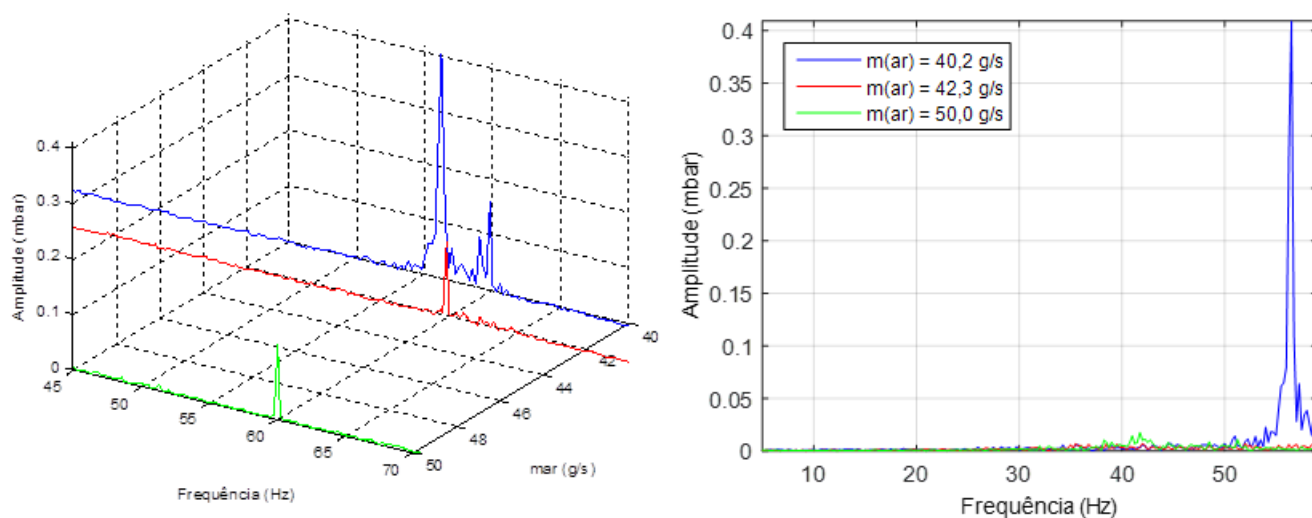
Fonte: Autoria própria, 2017

3.3.1.2.2 Análise de espectros de bandas de frequência entre 60 a 100 Hz para $\dot{m}_{Ft} = 1,0$ g/s

De acordo com a Tab. 6, são avaliados os picos de amplitude de pressão existentes em todos os tipos de injeção de combustível aplicados.

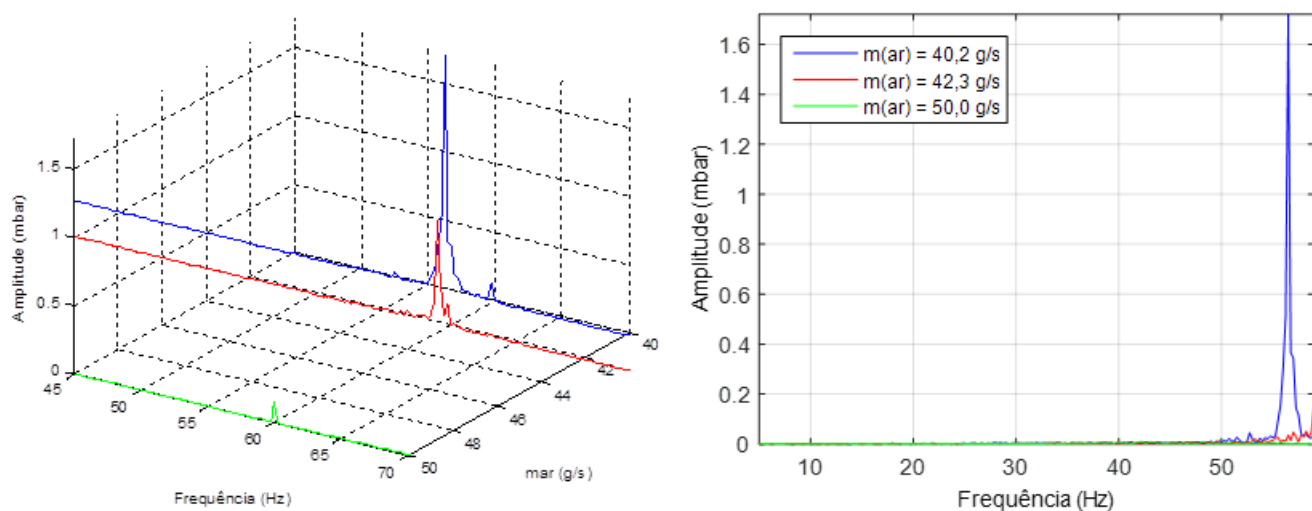
Verifica-se que para bandas de frequência entre 60 a 100 Hz (Tab. 6), as amplitudes de pressão atingem valores baixos em relação às bandas menores que 60 Hz e que as diferentes configurações de injeção de combustível e vazões de ar não causam significantes diferenças no valor das amplitudes. As amplitudes variam em torno de 0,01 a 0,03 mbar e as maiores ocorrem na configuração de 50% de injeção axial e 50% radial.

Figura 14 – Espectro acústico até 60 Hz para 25% $\dot{m}_{Fa}$ e 75% $\dot{m}_{Fr}$ com vazão total de combustível de 1,0 g/s



Fonte: Autoria própria, 2017

Figura 15 – Espectro acústico até 60 Hz para 0% $\dot{m}_{Fa}$ e 100% $\dot{m}_{Fr}$ com vazão total de combustível de 1,0 g/s



Fonte: Autoria própria, 2017

Segundo a Tab. 7, dados experimentais mostram que as frequências referentes aos picos na faixa de 60 a 100 Hz se encontram em torno de 60,25 a 68,25 Hz, demonstrando nenhuma diferenciação relevante com o uso de configurações de injeção diferentes. Vale ressaltar, que picos de amplitude em 60,25 Hz podem ser derivados de uma estabilização do pico de 60 Hz referente à rede elétrica.

3.3.1.2.3 Análise de espectros de bandas de frequência maiores que 100 Hz para $\dot{m}_{Ft} = 1,0$ g/s

De acordo com a Tab. 8, são avaliados os picos de amplitude de pressão existentes em todos os tipos de injeção de combustível aplicados.

Tabela 6 – Dados experimentais dos picos de Amplitudes de Pressão entre 60 a 100 Hz para 1,0 g/s de vazão total de combustível para cinco configurações: (i) 100% $\dot{m}_{Fa}$ e 0% $\dot{m}_{Fr}$; (ii) 75% $\dot{m}_{Fa}$ e 25% $\dot{m}_{Fr}$; (iii) 50% $\dot{m}_{Fa}$ e 50% $\dot{m}_{Fr}$; (iv) 25% $\dot{m}_{Fa}$ e 75% $\dot{m}_{Fr}$; (v) 0% $\dot{m}_{Fa}$ e 100% $\dot{m}_{Fr}$.

$\dot{m}_{ar}$ [g/s]	i [mbar]	ii [mbar]	iii [mbar]	iv [mbar]	v [mbar]
40,2	0,0069	0,0132	0,0300	0,0198	0,0141
42,3	0,0153	0,0121	0,0322	0,0171	0,0342
50,0	0,0111	0,0081	0,0107	0,0054	0,0083

fonte: Produção do Próprio Autor.

Tabela 7 – Dados experimentais das Frequências entre 60 a 100 Hz dos picos para 1,0 g/s de vazão total de combustível para cinco configurações: (i) 100% $\dot{m}_{Fa}$ e 0% $\dot{m}_{Fr}$; (ii) 75% $\dot{m}_{Fa}$ e 25% $\dot{m}_{Fr}$; (iii) 50% $\dot{m}_{Fa}$ e 50% $\dot{m}_{Fr}$; (iv) 25% $\dot{m}_{Fa}$ e 75% $\dot{m}_{Fr}$; (v) 0% $\dot{m}_{Fa}$ e 100% $\dot{m}_{Fr}$.

$\dot{m}_{ar}$ [g/s]	i [Hz]	ii [Hz]	iii [Hz]	iv [Hz]	v [Hz]
40,2	64,25	61,25	60,25	60,75	60,25
42,3	60,50	60,75	63,00	61,25	60,50
50,0	68,25	60,25	60,25	61,25	60,25

fonte: Produção do Próprio Autor.

Tabela 8 – Dados experimentais dos picos de Amplitudes de Pressão maiores que 100 Hz para 1,0 g/s de vazão total de combustível para cinco configurações: (i) 100% $\dot{m}_{Fa}$ e 0% $\dot{m}_{Fr}$; (ii) 75% $\dot{m}_{Fa}$ e 25% $\dot{m}_{Fr}$; (iii) 50% $\dot{m}_{Fa}$ e 50% $\dot{m}_{Fr}$; (iv) 25% $\dot{m}_{Fa}$ e 75% $\dot{m}_{Fr}$; (v) 0% $\dot{m}_{Fa}$ e 100% $\dot{m}_{Fr}$.

$\dot{m}_{ar}$ [g/s]	i [mbar]	ii [mbar]	iii [mbar]	iv [mbar]	v [mbar]
40,2	0,0034	0,0046	0,0114	0,0134	0,0301
42,3	0,0044	0,0037	0,0040	0,0041	0,0522
50,0	0,0040	0,0036	0,0034	0,0045	0,0047

fonte: Produção do Próprio Autor.

Verifica-se pelos dados experimentais da Tab. 8, que claramente as amplitudes de pressão aumentaram inversamente proporcionais à vazão de ar, de modo geral, pode-se afirmar que para de bandas acima de 100 Hz, quanto mais ricas forem as misturas para o processo de combustão nesse sistema, maiores serão as amplitudes de pressão e oscilações acústicas e ocorrem em uma faixa de frequência ligeiramente menor que outras amplitudes (Tab. 9).

No espectro de acima de 100 Hz, as oscilações de pressão ocorrem com constância em torno de 120 Hz para $\dot{m}_{Ft}=1,0$ g/s e é cerca de 6% menor para maiores picos de amplitudes encontradas (Tab. 9).

Como também, é possível observar que com o aumento da quantidade de injeção radial de combustível, aumentou-se as amplitudes. Porém, estes aumentos não necessariamente refletem em um aumento de instabilidade do sistema, já que em bandas de frequência menores de 60 Hz (seção 3.3.1.2.1) há mais significantes flutuações de amplitudes de pressão.

Tabela 9 – Dados experimentais das Frequências maiores que 100 Hz dos picos para 1,0 g/s de vazão total de combustível para cinco configurações: (i) 100% $\dot{m}_{Fa}$ e 0% $\dot{m}_{Fr}$; (ii) 75% $\dot{m}_{Fa}$ e 25% $\dot{m}_{Fr}$; (iii) 50% $\dot{m}_{Fa}$ e 50% $\dot{m}_{Fr}$; (iv) 25% $\dot{m}_{Fa}$ e 75% $\dot{m}_{Fr}$; (v) 0% $\dot{m}_{Fa}$ e 100% $\dot{m}_{Fr}$.

$\dot{m}_{ar}$ [g/s]	i [Hz]	ii [Hz]	iii [Hz]	iv [Hz]	v [Hz]
40,2	120,00	120,00	113,00	112,75	113,25
42,3	120,00	120,00	120,00	120,00	118,75
50,0	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00

fonte: Produção do Próprio Autor.

3.3.1.3 Análise detalhada dos Gráficos Comparativos de Espectros Acústicos para 0,5 g/s de Vazão Total de Combustível

Como visto na seção 3.3.1.2, será analisado as amplitudes de pressão referente às perturbações acústicas do sistema na faixa de 0 a 120 Hz, porém para 0,5 g/s de vazão total de combustível. Será verificado as oscilações significativas em todo espectro, desconsiderando o pico em 60 Hz (referente à rede elétrica).

3.3.1.3.1 Análise de espectros de bandas de frequência até 60Hz para $\dot{m}_{Ft} = 0,5$ g/s

De acordo com a Tab. 10, são avaliados os picos de amplitude de pressão existentes em todos os tipos de injeção de combustível aplicados e na Tab. 11, as frequências referentes a esses picos. Nas Figuras 16-19 são apresentados graficamente os resultados obtidos do espectro acústico para cada configuração de injeção de combustível.

Devido aos picos de amplitude pressão até 60 Hz serem os mais expressivos de todo o espectro, é justificado a representação gráfica exclusiva para maior detalhamento da análise.

Tabela 10 – Dados experimentais dos picos de Amplitudes de Pressão até 60 Hz para 0,5 g/s de vazão total de combustível para quatro configurações: (i) 100% $\dot{m}_{Fa}$ e 0% $\dot{m}_{Fr}$; (ii) 75% $\dot{m}_{Fa}$ e 25% $\dot{m}_{Fr}$; (iii) 25% $\dot{m}_{Fa}$ e 75% $\dot{m}_{Fr}$; (iv) 0% $\dot{m}_{Fa}$ e 100% $\dot{m}_{Fr}$.

$\dot{m}_{ar}$ [g/s]	i [mbar]	ii [mbar]	iii [mbar]	iv [mbar]
40,2	0,0259	0,0231	0,0154	0,0122
42,3	0,0418	0,0165	0,0178	0,0132
50,0	0,0199	0,0156	0,0461	0,0227

fonte: Produção do Próprio Autor.

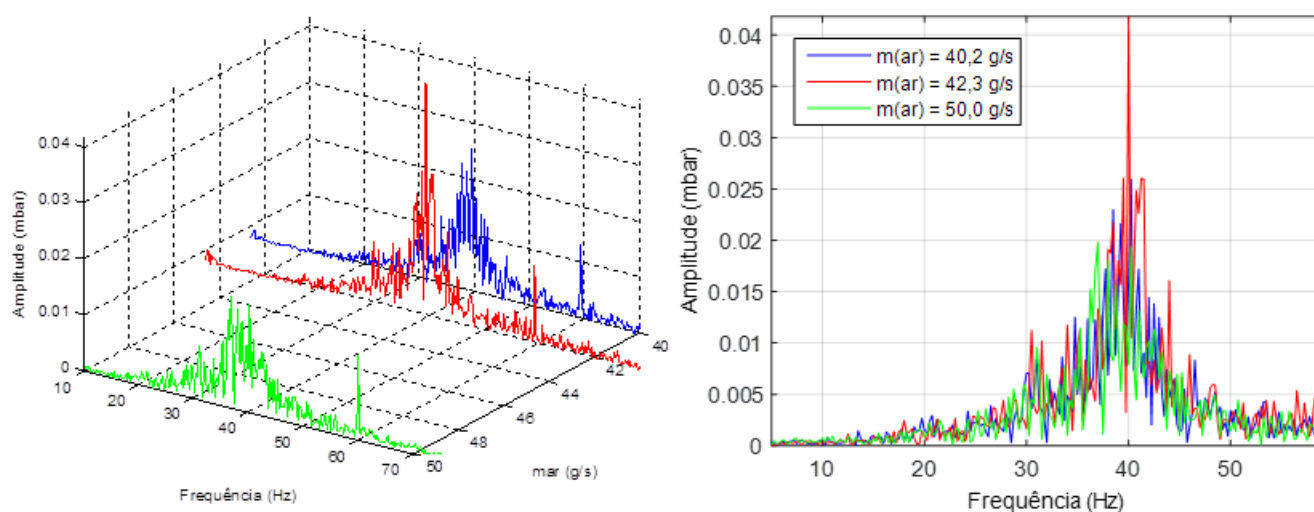
Pode-se observar pela Tab. 10, que para todas as configurações de injeção de combustível e todas as vazões de ar, o sistema apresenta oscilações e amplitude de pressão bem menores que para a vazão total de 1,0 g/s de combustível. Essas amplitudes de pressão em 0,5 g/s de combustivel variam entre 0,1 a 0,4 mbar. Sendo que para vazões de 41,2 e 42,3 de ar, as amplitudes reduzem ligeiramente com aumento de vazão radial de combustível, como também as amplitudes aumentam com o a diminuição

Tabela 11 – Dados experimentais das Frequências até 60 Hz dos picos para 0,5 g/s de vazão total de combustível para quatro configurações: (i) 100% $\dot{m}_{Fa}$ e 0% $\dot{m}_{Fr}$; (ii) 75% $\dot{m}_{Fa}$ e 25% $\dot{m}_{Fr}$; (iii) 25% $\dot{m}_{Fa}$ e 75% $\dot{m}_{Fr}$; (iv) 0% $\dot{m}_{Fa}$ e 100% $\dot{m}_{Fr}$.

$\dot{m}_{ar}$ [g/s]	i [Hz]	ii [Hz]	iii [Hz]	iv [Hz]
40,2	40,25	40,75	39,75	39,50
42,3	40,00	41,75	39,50	41,50
50,0	37,00	41,25	41,75	41,00

fonte: Produção do Próprio Autor.

Figura 16 – Espectro acústico até 60 Hz para 100% $\dot{m}_{Fa}$ e 0% $\dot{m}_{Fr}$ com vazão total de combustível de 0,5 g/s



Fonte: Autoria própria, 2017

da vazão de ar nas configurações com maior injeção axial e o inverso para configurações com maior injeção radial.

Segundo os dados coletados (Tab. 11), os picos de amplitude ocorrem nas bandas de frequência entre 39 a 41 Hz, sendo uma banda com menor faixa que na vazão de 1,0 g/s de combustível.

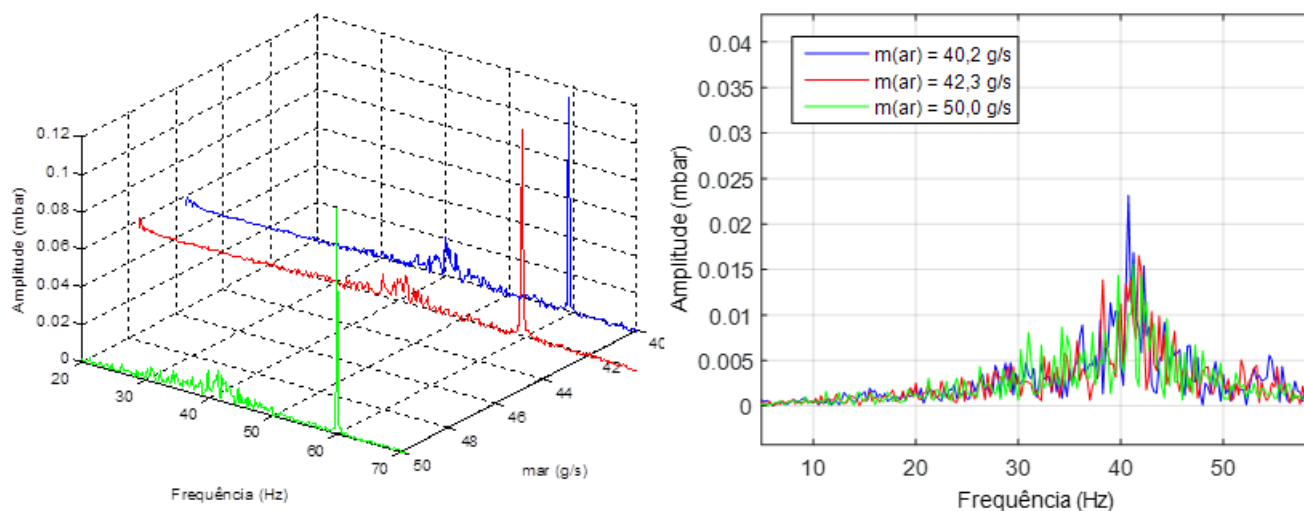
É verificado graficamente as flutuações e oscilações de pressão nas Figuras 16-19. E conclui-se que de modo geral, as operações com vazão de 0,5 g/s de combustível apresentam são mais estáveis, com menores flutuações de pressão e menores picos de amplitude de pressão que para 1,0 g/s. Os maiores picos de amplitude alcançados em 0,5 g/s são em torno de 0,04 mbar, mostrados nas Figuras 16 e 18.

3.3.1.3.2 Análise de espectros de bandas de frequência entre 60 a 100 Hz para $\dot{m}_{Ft} = 0,5$ g/s

De acordo com a Tab. 12, são avaliados os picos de amplitude de pressão existentes em todos os tipos de injeção de combustível aplicados.

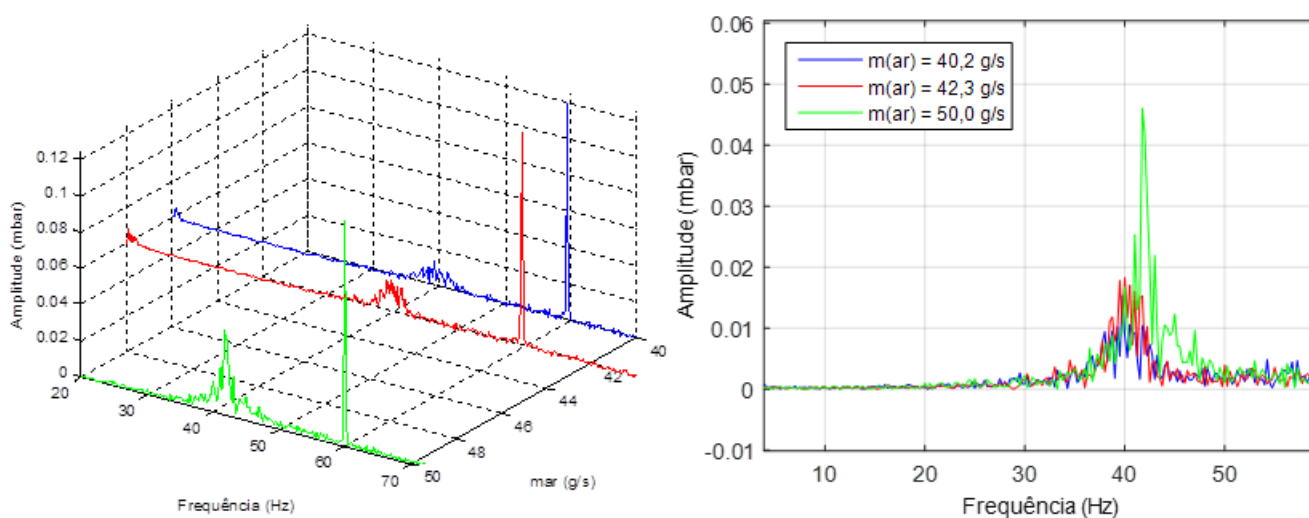
Verifica-se que para bandas de frequência entre 60 a 100 Hz (Tab. 12), as amplitudes de pressão atingem valores significantemente baixos em relação às bandas menores que 60 Hz e que as diferentes

Figura 17 – Espectro acústico até 60 Hz para 75% $\dot{m}_{Fa}$ e 25% $\dot{m}_{Fr}$ com vazão total de combustível de 0,5 g/s



Fonte: Autoria própria, 2017

Figura 18 – Espectro acústico até 60 Hz para 25% $\dot{m}_{Fa}$ e 75% $\dot{m}_{Fr}$ com vazão total de combustível de 0,5 g/s



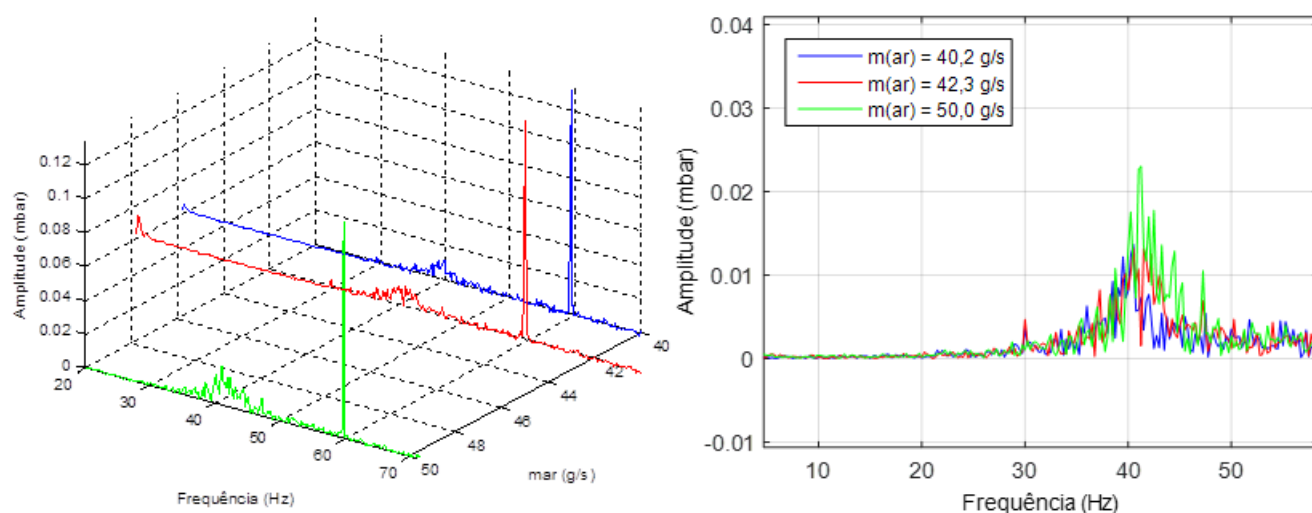
Fonte: Autoria própria, 2017

configurações de injeção de combustível e vazões de ar não causam significantes diferenças no valor das amplitudes.

As amplitudes variam em torno de 0,003 a 0,013 mbar e as maiores ocorrem na configuração de 50% de injeção axial e 50% radial.

Segundo a Tab. 13, dados experimentais mostram que as frequências referentes aos picos na faixa de 60 a 100 Hz se encontram em torno de 60,25 a 66,25 Hz, demonstrando amplitudes ligeiramente maiores para maiores injeções radiais. Picos de amplitude em 60,25 Hz podem ser derivados de uma estabilização do pico de 60 Hz referente à rede elétrica.

Figura 19 – Espectro acústico até 60 Hz para 0% $\dot{m}_{Fa}$ e 100% $\dot{m}_{Fr}$ com vazão total de combustível de 0,5 g/s



Fonte: Autoria própria, 2017

Tabela 12 – Dados experimentais dos picos de Amplitudes de Pressão entre 60 a 100 Hz para 0,5 g/s de vazão total de combustível para quatro configurações: (i) 100% $\dot{m}_{Fa}$ e 0% $\dot{m}_{Fr}$; (ii) 75% $\dot{m}_{Fa}$ e 25% $\dot{m}_{Fr}$; (iii) 25% $\dot{m}_{Fa}$ e 75% $\dot{m}_{Fr}$; (iv) 0% $\dot{m}_{Fa}$ e 100% $\dot{m}_{Fr}$.

$\dot{m}_{ar}$ [g/s]	i [mbar]	ii [mbar]	iii [mbar]	iv [mbar]
40,2	0,0038	0,0047	0,0104	0,0071
42,3	0,0040	0,0162	0,0129	0,0087
50,0	0,0024	0,0052	0,0037	0,0032

fonte: Produção do Próprio Autor.

Tabela 13 – Dados experimentais das Frequências maiores que 100 Hz dos picos para 0,5 g/s de vazão total de combustível para quatro configurações: (i) 100% $\dot{m}_{Fa}$ e 0% $\dot{m}_{Fr}$; (ii) 75% $\dot{m}_{Fa}$ e 25% $\dot{m}_{Fr}$; (iii) 25% $\dot{m}_{Fa}$ e 75% $\dot{m}_{Fr}$; (iv) 0% $\dot{m}_{Fa}$ e 100% $\dot{m}_{Fr}$.

$\dot{m}_{ar}$ [g/s]	i [Hz]	ii [Hz]	iii [Hz]	iv [Hz]
40,2	62,50	60,25	60,25	60,25
42,3	61,25	60,25	60,25	60,25
50,0	61,25	60,25	64,50	66,25

fonte: Produção do Próprio Autor.

3.3.1.3.3 Análise de espectros de bandas de frequência maiores que 100 Hz para $\dot{m}_{Ft} = 0,5$ g/s

De acordo com a Tab. 8, são avaliados os picos de amplitude de pressão existentes em todos os tipos de injeção de combustível aplicados.

Verifica-se pelos dados experimentais da Tab. 14, que as amplitudes de pressão são menores para menores vazões de ar, de modo geral, pode-se afirmar que para de bandas acima de 100 Hz, quanto mais pobres forem as misturas para o processo de combustão nesse sistema, maiores serão as amplitudes de pressão e oscilações acústicas. No espectro acima de 100 Hz, as oscilações de pressão ocorrem em torno de 460 a 516 Hz para $\dot{m}_{Ft}=0,5$ g/s.

Tabela 14 – Dados experimentais dos picos de Amplitudes de Pressão maiores que 100 Hz para 0,5 g/s de vazão total de combustível para quatro configurações: (i) 100% $\dot{m}_{Fa}$ e 0% $\dot{m}_{Fr}$; (ii) 75% $\dot{m}_{Fa}$ e 25% $\dot{m}_{Fr}$; (iii) 25% $\dot{m}_{Fa}$ e 75% $\dot{m}_{Fr}$; (iv) 0% $\dot{m}_{Fa}$ e 100% $\dot{m}_{Fr}$.

$\dot{m}_{ar}$ [g/s]	i [mbar]	ii [mbar]	iii [mbar]	iv [mbar]
40,2	0,0042	0,0037	0,0067	0,0052
42,3	0,0077	0,0031	0,0068	0,0090
50,0	0,0101	0,0053	0,0095	0,0111

fonte: Produção do Próprio Autor.

Tabela 15 – Dados experimentais das Frequências maiores que 100 Hz dos picos para 0,5 g/s de vazão total de combustível para quatro configurações: (i) 100% $\dot{m}_{Fa}$ e 0% $\dot{m}_{Fr}$; (ii) 75% $\dot{m}_{Fa}$ e 25% $\dot{m}_{Fr}$; (iii) 25% $\dot{m}_{Fa}$ e 75% $\dot{m}_{Fr}$; (iv) 0% $\dot{m}_{Fa}$ e 100% $\dot{m}_{Fr}$.

$\dot{m}_{ar}$ [g/s]	i [Hz]	ii [Hz]	iii [Hz]	iv [Hz]
40,2	466,75	482,00	515,75	503,00
42,3	461,50	477,75	512,75	493,75
50,0	441,50	469,25	499,50	477,75

fonte: Produção do Próprio Autor.

É observado que as diferentes configurações de injeção de combustível não foram tão relevantes para os picos de amplitude de pressão quanto a vazão de ar no sistema.

3.4 ANÁLISE DAS RAZÕES DE EQUIVALÊNCIA DAS MISTURAS

A razão estequiométrica de ar-combustível, considerando as Eq. 1.2 e 1.3, sendo o ar com 21% de O_2 e 79% de N_2 , pode ser formulada como (TURNES, 2013)

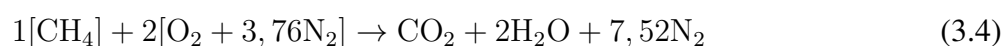
$$(A/C)_{ideal} = \frac{m_{ar}}{m_c} = \frac{4,76a}{1} \frac{M_{ar}}{M_c} \quad (3.2)$$

Onde M_{ar} e M_c são as massas molares de ar e de combustível, respectivamente.

Segundo Turns (2013), a razão de equivalência (Φ) é comumente usada para indicar quantitativamente se a mistura combustível-oxidante é rica, pobre ou estequiométrica. A razão de equivalência é definida como

$$\Phi = \frac{(A/C)_{ideal}}{(A/C)_{real}} = \frac{(C/A)_{real}}{(C/A)_{ideal}} \quad (3.3)$$

Na queima de gás natural, a simplificação da reação estequiométrica obtida seria



logo,

$$\left(\frac{A}{C}\right)_{ideal} = \frac{2[32 + 3,76(28)]}{1(12 + 4)} = 17,16 \quad (3.5)$$

E que por definição, $\Phi > 1$ são misturas ricas e $\Phi < 1$ são misturas pobres com excesso de ar. Esse excesso pode ser calculado percentualmente por

$$\Phi = \frac{1}{1 + excesso} \quad (3.6)$$

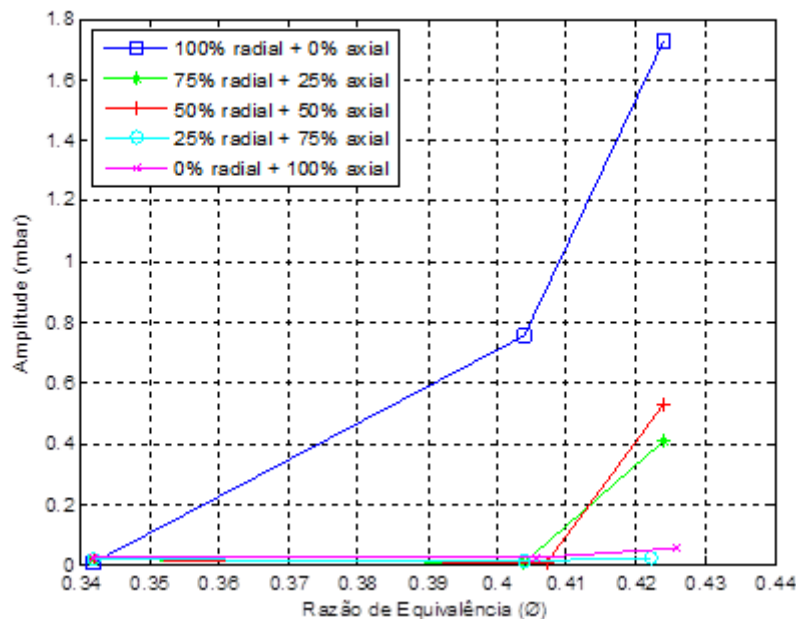
logo,

$$excesso(\%) = \left(\frac{1}{\Phi} - 1\right) \cdot 100\% \quad (3.7)$$

Portanto, é de relevante importância a análise comparativa da razão de equivalência das misturas com as amplitudes de pressão no sistema estudado. Como foi demonstrado e analisado anteriormente (seção 3.3.1.2), principalmente nas condições de 1,0 g/s de vazão total de combustível, os picos de amplitudes de pressão tendem a aumentar com a diminuição de vazão de ar.

Pelo fato da condição de vazão de combustível de 0,5 g/s demonstrar-se muito mais estável que a de 1,0 g/s. O estudo de razões de equivalência vão obter enfoque em situações mais críticas de estabilidade do processo de combustão no queimador. Ou seja, será feita uma análise para as configurações e condições de 1,0 g/s de vazão de combustível.

Figura 20 – Gráfico de Razão de Equivalência (Φ) x Amplitude de Pressão (mbar) para $\dot{m}_{Ft} = 1,0$ g/s



Fonte: Autoria Própria, 2017

Como mostrado pela Fig. 20, é claramente observado que os picos de amplitude de pressão tendem

a se elevar com o aumento da razão de equivalência, ou seja, quanto menor a vazão de ar no sistema e mais rica a mistura, maiores as amplitudes.

Como também, as configurações com maiores injeções radiais tendem a ter amplitudes maiores e consequentemente, maiores flutuações de pressão, oscilações acústicas e liberação de energia, responsáveis pela instabilidade de combustão no sistema. Na configuração de 100% radial e 0% axial para $\dot{m}_{Ft} = 1,0$ g/s, existe um ponto crítico de amplitude em $1,7$ mbar, o que tende ao aumento das incógnitas P' e Q' no critério de Rayleigh (Eq. 1.4), possivelmente obtendo maior valor que as dissipações de energia (Li) e originando instabilidades acústicas, o que torna o sistema instável.

3.4.1 Excesso de Ar e Considerações Finais

Pela seção 3.4 e a Eq. 3.7 é demonstrado o cálculo de excesso de ar para misturas pobres de ar-combustível. Com esse cálculo é possível comparar valores do queimador em estudo com equipamentos com semelhantes resultados de excesso e vazão de equivalência.

Pela Eq. 3.8 e utilizando uma faixa de razão de equivalência em condições críticas de instabilidades acústicas (ϕ 0,42), temos

$$excesso(\%) = \left(\frac{1}{0,42} - 1 \right) \cdot 100\% = 138,1\% \quad (3.8)$$

Como o sistema do queimador em estudo apresenta processos de combustão *lean-burn*, sendo uma combustão de mistura pobre em combustível com razões de equivalências menores que 0,5 e excessos de ar acima de 110%, o regime do queimador se aproxima de regime encontrados tipicamente em turbinas à gás (SERBIN; MATVEEV; MOSTIPANENKO, 2011).

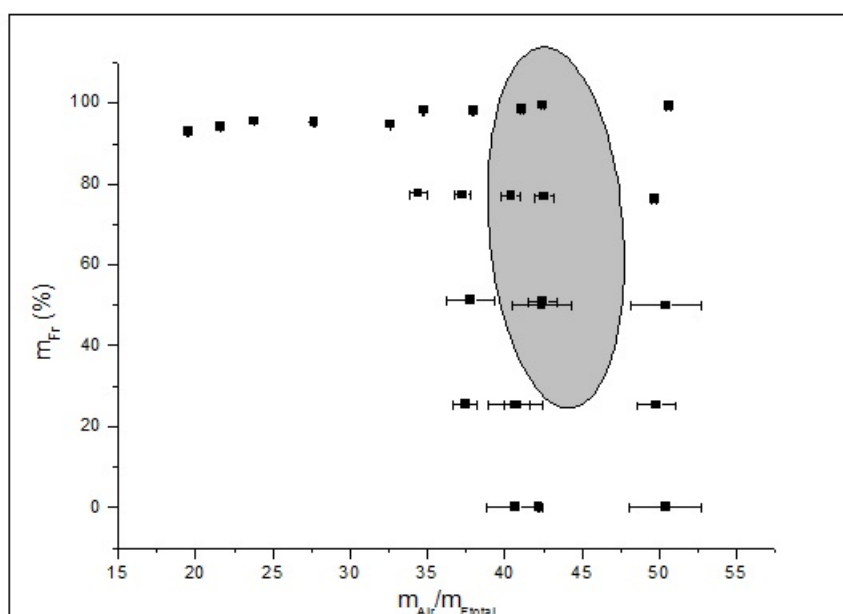
3.5 MAPEAMENTO DE ZONAS DE CONDIÇÕES INSTÁVEIS DO SISTEMA

A partir dos testes realizados anteriormente da comparação de espectros acústicos (seção 3.3.1), da análise dos efeitos de diminuição e aumento da vazão de ar no sistema (seção 3.2) e de testes complementares de vazões intermediárias dos dois tipos de injeção simultâneas, é possível verificar as zonas de instabilidade do processo de combustão no sistema, onde há instabilidades termoacústicas.

Para isso, as relações entre a vazão de ar e vazão de combustível são representadas em um gráfico $\dot{m}_{Fr} (\%) \times \dot{m}_{ar}/\dot{m}_{Ft}$ (Fig. 21) para a análise das zonas instáveis e pontos ideais para o funcionamento adequado do queimador a partir da porcentagem de uso de um tipo de injeção de combustível e da razão da quantidade da vazão de ar com a de combustível total.

Pode-se observar (Fig. 21) que as condições com maiores vazões do tipo de injeção radial de combustível apresentam maior quantidade de pontos com condições de existência da chama. Porém, a

Figura 21 – Gráfico de zona de instabilidade do sistema mediante tipo de injeção de combustível e razão de quantidade de ar para combustível total.



Fonte: Autoria própria, 2017

zona com a presença de instabilidades termoacústicas ocorre em vazões entre aproximadamente 40 a 42 da razão $\dot{m}_{ar}/\dot{m}_{Ft}$ para necessariamente injeções radiais de combustível maiores que 50%.

A zona de instabilidades é destacada pelos pontos da área sombreada no gráfico da Fig. 21, ela representa apenas pontos mais críticos e que são condições a ser evitadas. De modo geral, é sugerido operar o sistema em uma vazão de 0,5 g/s de combustível ou em vazões de ar maiores (aproximadamente 50,0 g/s) para 1,0 g/s.

4 CONCLUSÃO

O trabalho desenvolvido visou buscar condições adequadas na operação do projeto de um queimador à gás natural assistido a plasma de arco deslizante, o qual apresentava problemas em relação as instabilidades termoacústicas de combustão.

Seguindo uma metodologia empírica de elaborar baterias de teste com diversas configurações de vazões mássicas de ar e combustível no sistema, foi possível obter uma avaliação de condições estáveis e mapeamento de zonas instáveis para o funcionamento adequado do equipamento e estudar as possíveis origens das instabilidades de combustão.

Para isso, foi analisado os efeitos de acréscimo e redução de vazão de ar no sistema, em cinco configurações de injeção de combustível: 100% axial e 0% radial; 75% axial e 25% radial; 50% axial e 50% radial; 25% axial e 75% radial; 0% axial e 100% radial. Essas configurações foram utilizadas para todos os testes posteriores e utilizou-se vazões totais de combustível de 1,0 g/s e 0,5 g/s.

Como primeira etapa, verificou-se que maiores quantidades de vazões de injeção radial no sistema obtinha maior *range* de vazões de ar que permitiam a existência da chama, porém em quase todas as configurações de injeção de ar para 1,0 g/s de vazão total de combustível, observou-se muito ruído, flutuações de pressão na câmara de combustão, aumento de temperatura, instabilidades termoacústicas e formação de combustão pulsante. Algo não observado nos testes de 0,5 g/s de vazão total de combustível.

Pelos testes de obtenção dos espectros acústicos de amplitudes de pressão, observou-se baixas amplitudes e oscilações de pressão em 0,5 g/s de vazão de combustível do que 1,0 g/s. Estas apresentavam maiores valores de pico em torno de 0,04 mbar para bandas de frequência menores que 60 Hz e algumas oscilações ainda menores ($\approx 0,01$ mbar) nas bandas de 400 Hz. Sendo que todas as configurações de injeção de combustível apresentavam valores semelhantes de amplitude de pressão e obtinham processos de combustão devidamente estáveis.

Entretanto, a bateria de testes para 1,0 g/s de vazão total de combustível apresentou os pontos críticos de instabilidade de combustão. Observou-se claramente que as amplitudes de pressão tendiam ao crescimento com a diminuição da vazão de ar no sistema, ou seja, quanto menos pobre a mistura ar-combustível era, maiores os aparecimentos de instabilidades termoacústicas. O estudo das razões de equivalência foram apresentadas para tal conclusão e o regime estudado se assemelhou aos regimes encontrados em turbinas à gás, obtendo razões de equivalência menores que 0,5 e excesso de ar de 138% nas condições mais críticas.

Ainda referente os espectros acústicos de 1,0 g/s de vazão de combustível, verificou-se amplitudes

significativamente altas em relação aos outros testes em configurações com acima de 50% de injeção radial de combustível, tendo valores de amplitudes de pressão com valores de 0,4 a 1,7 mbar. Portanto, é possível afirmar que para as condições dos testes apresentados, o sistema com $\dot{m}_{F_t}=1,0$ g/s opera com melhor viabilidade com maiores quantidades de injeção axial. Já configurações com 50, 75 e especialmente 100% de injeção de combustível radial apresentaram um crescimento abrupto e relevante para o aumento das flutuações de pressão e liberação no energia no sistema, o que seria maior que a energia total de dissipações e amortecimentos e verificaria corretamente o critério de Rayleigh para surgimento de instabilidades de combustão pelo acoplamento termoacústico e formação de uma combustão pulsada.

Outro tópico de relevante importância seria o dimensionamento da câmara de combustão, pois ela afeta diretamente no surgimento de instabilidades e inclusive é considerado no critério de Rayleigh através do volume da câmara. A geometria desta tem efeito crucial para a determinação das propriedades acústicas e influência no escoamento e estrutura da chama (ALMEIDA, 2011). Como também, o *swirler* influencia na adequação volumétrica da câmara, visto que a ancoragem da chama pelos movimentos rotacionais são essenciais para propiciar tempo suficiente, temperatura e turbulência para o alcance de uma queima adequada de um processo de combustão estável.

Como aspecto final do estudo, é sugerido que o sistema do queimador opere com vazão total de combustível em 0,5 g/s ou com maiores injeções axiais de combustível e vazões de ar próximas de 50,0 g/s no caso de 1,0 g/s de vazão total de combustível. Também é de importante necessidade, reparos nos sistemas de alimentação devido a danos causados pelo aumento excessivo de temperatura no equipamento oriundo do plasma e instabilidades termoacústicas.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, D. S. **Análise de Instabilidades Termoacústicas e Emissões de Poluentes em Combustores do Tipo Duplo-Estágio para Aplicação em Turbinas a Gás**. Tese (Doutorado em 2011) Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo - Brasil, 2011. 193f.
- ALVES, A. **Estudo Experimental da Estabilização de Chamas em Escoamentos com Baixa Rotação para Aplicações em Turbinas a Gás**. Tese (Doutorado em 2013) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo - Brasil, 2013.
- CALTECH. **Pollutants Formation and Control in Combustion**. 1988. Disponível em: <http://authors.library.caltech.edu/25069/5/AirPollution88-Ch3.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2017
- FERREIRA, D. S. et al. Estudo experimental sobre a atuação acústica em chamas parcialmente pré misturadas. **IX Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas**, 2002.
- FORUM, G. A. P. **Policy Briefs**. 2012. Disponível em: <https://www.sei-international.org/gapforum/policy/effectshumanhealth.php>.
- HERNANDO, C. **Thermoacoustic Stability Analysis of a Combustion Chamber**. São José dos Campos, São Paulo - Brasil: [s.n.], 2016. 111f.
- JAMES, S. R. Hominid use of fire in lower and middle pleistocene: A review of the evidence. **Current Anthropology. University of Chicago Press**, v. 30, n. 1, 2017.
- KANG, D.; CULICK, F.; RATNER, A. Combustion dynamics of a low-swirl combustor. **Combustion and Flame**, v. 151, p. 412 – 425, 2007.
- LACAVA, P. T. **Teoria da Combustão**. [S.l.]: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2014.
- LACAVA, P. T.; CARVALHO, J. A. de; MCQUAY, M. Q. Pulsating combustion characteristics of a spray flame in a rijke tube with two different atomizers. **Fuel (Guildford)**, v. 76, n. 9, p. 845 – 851, 1997.
- LEFEBVRE, A. **Gas Turbine Combustion**. New York, New York - USA: NY: Taylor Francis, 1998.
- PARUNGO, F.; NAGAMOTO, C.; MADDL, R. **A Study of the Mechanisms of Acid Rain Formation**. 1987. Disponível em: [http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0469\(1987\)044<3C3162:ASOTMO>3E2.0.CO;2](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0469(1987)044<3C3162:ASOTMO>3E2.0.CO;2).
- RAYLEIGH, L. The explanation of certain acoustical phenomena. **Nature**, v. 18, n. 455, p. 319 – 321, 1878.
- RODHE, H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect. **Science**, v. 1217, n. 248, 1990.
- SERBIN, S. I.; MATVEEV, I. B.; MOSTIPANENKO, G. B. Investigations of the working process in a “lean-burn” gas turbine combustor with plasma assistance. **IEEE Transactions on Plasma Science**, v. 39, n. 12, 2011.
- SÉ, D. et al. Combustion dynamics and instabilities. **Journal of propulsion and power**, v. 19, n. 5, p. 722 – 734, 2003.

TURNER, S. R. **Introdução à Combustão. Conceitos e Aplicações**. Porto Alegre, Rio Grande do Sul - Brasil: AMGH, 2013.

WEINER, S. et al. Evidence for the use of fire at zhoukoudian, china. **Science**, v. 5374, n. 281, p. 251 – 253, 1998.

WILLIAMS, F. **Combustion theory**. [S.l.]: 2nd edition, Westview Press, 1994.

ZINN, B. Pulsating combustion. advanced combustion methods. **London:Academic Press Inc.**, 1986.