

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO EXPERIMENTAL DO EFEITO DAS OSCILAÇÕES SOBRE A FRAÇÃO RADIANTE
EM CHAMAS DIFUSIVAS LAMINARES

por

RICARDO SCHLATTER HASENACK

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto alegre, julho de 2019



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO EXPERIMENTAL DO EFEITO DAS OSCILAÇÕES SOBRE A FRAÇÃO RADIANTE
EM CHAMAS DIFUSIVAS LAMINARES

por

RICARDO SCHLATTER HASENACK

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mario Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Fernando Marcelo Pereira

Comissão de Avaliação:

Prof. Francis H. R. França

Prof. Andres A. M. Zevallos

Prof. Guilherme C. Fraga

Porto Alegre, 10 de julho de 2019

HASENACK, R. S. **Estudo Experimental do Efeito das Oscilações Sobre a Fração Radiante em Chamas Difusivas Laminares**. 2019. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo analisar o efeito das oscilações (*flickering*) sobre a fração radiante em chamas difusivas laminares. Utilizou-se um queimador Santoro, com um tubo central para escoamento de CH₄ e um anel externo para escoamento de ar atmosférico (*coflow*). Analizaram-se 3 potências de chamas, variando a vazão de *coflow* para cada experimento. Inicialmente, foi feita uma caracterização das chamas utilizando uma câmera de alta velocidade, com uma taxa de aquisição de 800 frames por segundo. Obtiveram-se, a partir das imagens, o comprimento médio de chama, a amplitude de oscilação e a frequência de oscilação para cada chama. Em um segundo momento, realizou-se a medição do fluxo radiante de cada chama através do método da fonte pontual. Realizou-se uma análise buscando relacionar as variações na fração radiante medida com as propriedades geométricas e de oscilação das chamas.

PALAVRAS-CHAVE: Chama difusiva laminar, *flickering*, fração radiante.

HASENACK, R. S. **Estudo Experimental do Efeito das Oscilações Sobre a Fração Radiante em Chamas Difusivas Laminares**. 2019. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

ABSTRACT

The objective of this work is to analyze the effect of flame flickering on the radiant fraction of laminar diffusion flames. A Santoro type burner was used, with a central tube for the flow of fuel (CH₄) and an outer ring for the *coflow* (atmospheric air). Three flame potencies were analyzed, with 9 different *coflow* rates each. Initially, a characterization of the flame was made using a high-speed camera with an acquisition rate of 800 frames per second. From the images, the flame mean length, oscillation amplitude and oscillation frequency were obtained. Next, the measurement of the radiant flux of each flame was conducted using the single point method. An analysis was conducted looking for a relation between the radiant fraction and the flame geometric and oscillation characteristics.

KEYWORDS: Laminar diffusion flames, *flickering*, radiant fraction.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	OBJETIVO	1
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
3.1.	Chamas difusivas laminares	2
3.2.	Fração radiante em chamas difusivas	2
3.3.	Oscilações em chamas difusivas laminares (<i>flame flickering</i>)	3
4.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
5.	METODOLOGIA	5
5.1.	Bancada experimental	5
5.2.	Medição do comprimento de chama e frequência de oscilação das chamas ..	5
5.3.	Medição da fração radiante da chama.....	6
5.4.	Chamas estudadas	7
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	8
6.1.	Caracterização das chamas.....	8
6.2	Fração radiante.....	13
7	CONCLUSÕES	14
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	14

1. INTRODUÇÃO

A matriz energética mundial é composta de cerca de 80% de sua energia provinda de processo de combustão, sendo a principal fonte os produtos derivados de petróleo (EPE 2018). A escassez deste recurso, assim como o impacto ambiental gerado para a sua obtenção e pelo seu consumo, torna imprescindível que se busque uma maior eficiência em sua utilização, a fim de tornar seu consumo mais econômico e reduzir a emissão de poluentes e outros efeitos ambientais. Buscando a maior eficiência, o estudo dos mecanismos de combustão tem se tornado de suma importância para o desenvolvimento sustentável da sociedade.

A transferência de energia para o meio em uma reação de combustão é dada em sua maioria por convecção e radiação. A radiação se transfere por meio de ondas eletromagnéticas ou fótons emitidos pelas oscilações do estado energético dos elétrons presentes na matéria (MODEST,2003). A radiação é um processo extremamente importante e relevante em muitos processos industriais de aquecimento, resfriamento e secagem, e, principalmente, em métodos de conversão de energia em processos de combustão de combustíveis fósseis (INCROPERA, 2007). Em processos de combustão, a modelagem da transferência de calor por radiação tem sido alvo de muitos estudos.

A combustão envolve interações complexas entre reações químicas a altas temperaturas e processos de mistura de fluidos. Segundo Machado, 2015, a modelagem dos mecanismos de combustão e seus efeitos na emissão de radiação envolvem modelos de cinética química, formação de fuligem, modelos de turbulência e das interações cinética-turbulência e radiação-turbulência, o que agrega incertezas aos resultados e exige um custo computacional muito elevado. Segundo Charwath et al, 2009, nos últimos anos, o conhecimento sobre chamas laminares em regime permanente tem se desenvolvido rapidamente. Entretanto, os dispositivos de combustão utilizados na prática usualmente operam sobre condições não estáveis. O estudo de chamas laminares permite investigar o fenômeno de combustão instável tomando vantagem da alta reprodutibilidade de ciclo a ciclo.

Segundo Smyth et ali., 1993, na queima de gases, líquidos e até sólidos, frequentemente ocorre uma oscilação nas chamas e eventualmente uma separação da chama em mais de um volume, devido à uma instabilidade no fluxo em virtude do empuxo causado pelas áreas de diferentes temperaturas na região da chama. Existem diversos trabalhos que buscam caracterizar estas oscilações e avaliar seus efeitos principalmente na geração de fuligem. Poucos, entretanto, buscam uma relação entre este efeito e a emissão de radiação das chamas.

2. OBJETIVO

O presente trabalho busca verificar a presença de uma relação entre a frequência e amplitude de oscilação em chamas difusivas laminares em sua fração radiante. Para tal, é feita uma caracterização dos parâmetros de oscilação das chamas estudadas através de imagens obtidas por uma câmera de alta velocidade. Posteriormente, é medida a radiação emitida pelas chamas através do método da fonte pontual.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Chamas difusivas laminares

As chamas podem ser subdivididas em dois grupos: pré-misturadas e não pré-misturadas, também denominadas chamas difusivas. Nas chamas pré-misturadas, combustível e oxidante estão misturados molecularmente antes de alcançar a zona de reação. Já nas chamas difusivas, combustível e oxidante são fornecidos separadamente e a mistura vai ocorrer somente na zona de reação. Assim, nessas chamas, a taxa de reação é controlada pela difusão dos reagentes em direção à frente de chama. As chamas difusivas são as de maior interesse para aplicações industriais pois possuem uma maior taxa de transferência de calor por radiação, segurança de operação, facilidade de projeto e controle do processo (Lacava, 2002)

3.2. Fração radiante em chamas difusivas

Segundo Incropera, 2007, a radiação está associada à taxa na qual a energia é emitida pela matéria na forma de ondas eletromagnéticas, como um resultado de sua temperatura não nula. Esta energia é transmitida independentemente de um meio material entre o emissor e o receptor.

Para o estudo de chamas, um conceito amplamente utilizado é a fração radiante (X_r), definida por

$$X_r = \frac{Q_{rad}}{Q_f} \quad (1)$$

onde Q_{rad} é a taxa de energia transferida por radiação à vizinhança e Q_f representa a taxa de energia total liberada pela combustão por unidade de massa.

Na literatura existem diversos modelos algébricos (modelos de engenharia) para quantificar o calor total emitido por radiação (Q_{rad}). Um método amplamente empregado é considerar a chama como uma fonte pontual de emissão de radiação térmica com uma distribuição isotrópica das intensidades radiativas. Desta forma, a área de integração aproxima-se a de uma esfera. Esta hipótese será válida quando a distância de medição entre a chama e o sensor seja maior que 2 comprimentos de chama. (Quezada 2017 verificou para chama de potências acima de 2kW). A medição do fluxo de calor radiante é realizada por um transdutor localizado à meio comprimento visível de chama, conforme ilustrado pela Figura 3.1

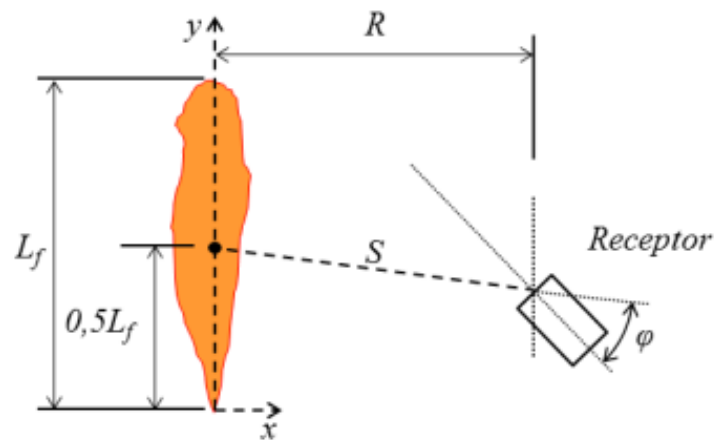


Figura 3.1 – Modelo da fonte pontual. Fonte: Machado, 2015

O fluxo radiante calculado através deste modelo é obtido por

$$q^{SPS} = \frac{X_r Q_f \tau_s}{4\pi S^2} \cos\varphi \quad (2)$$

onde X_r é a fração radiante, Q_f é energia total liberada pela chama, S a distância linear entre o receptor e a fonte pontual, τ_s a transmitância da atmosfera avaliada pela distância S e φ o ângulo formado entre a reta S que liga a fonte pontual ao receptor e o eixo normal ao receptor, conforme a Figura 3.1.

Segundo Machado, 2015, em chamas não pré-misturadas do tipo jato, a faixa da fração radiante de uma chama é característica de seu combustível. Quanto maior for a razão carbono/hidrogênio na molécula, maior é a fração radiante. A Tabela 2.1 apresenta algumas as faixas de fração radiante características para alguns combustíveis.

Tabela 3.1 – Fração radiante por combustível. Fonte: Morteiro, 2015 (adaptado)

Combustível	Razão C/H	Fração Radiante	Referência
Hidrogênio	0	0,03 – 0,15	Molina et al., 2007
Metano	0,25	0,07 – 0,20	Turns e Myhr, 1991
Etano	0,33	0,09 – 0,34	Turns e Myhr, 1991
Propano	0,375	0,08 – 0,26	Turns e Myhr, 1991

3.3. Oscilações em chamas difusivas laminares (*flame flickering*)

O efeito das oscilações (ou *flickering* na literatura inglesa) em chamas difusivas consiste em uma variação do comprimento de chama no tempo, observada a frequências na faixa de 10 a 20 Hz. Este fenômeno ocorre devido à interação de vórtices gerados na região da chama em função do aquecimento do ar nas suas redondezas. Os vórtices são

gerados por instabilidades do tipo Kelvin-Helmholtz. que ocorrem devido à diferença de velocidades na interface de dois fluidos.

Em chamas com baixa velocidade relativa entre combustível e oxidante (efeito do *coflow*, como será visto mais adiante) pode-se observar a cada ciclo uma separação da chama em dois ou mais volumes. Isto acontece quando a presença dos vórtices causa um escoamento no sentido contrário ao da chama, causando uma extinção da chama em um certo ponto (Charwath, 2007).

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Darbkahni et al., 2011, analisou a oscilação do comprimento visível de chamas laminares difusivas com respeito à diferença entre a velocidade do jato de combustível e do jato de ar circundante (*coflow*). Foram testadas chamas de metano com potências entre 0,12 kW e 0,24 kW, onde a frequência de oscilação se comportou de forma linear com a vazão volumétrica de *coflow* de ar, e pode ser calculada por

$$f = 0.33a + 11Hz \quad (3)$$

onde a é a vazão volumétrica de *coflow* (Lpm) e f a frequência de oscilação da chama. Com uma razão de 0.72 entre a velocidade de *coflow* e a velocidade de metano, pôde-se obter uma chama estável, que é definida pelo autor com uma frequência RMS de menos de 1% na altura da chama.

Smyth et al, 1993, estudou o aumento na geração de fuligem em função da frequência de oscilação de uma chama laminar forçada utilizando metano como combustível. Em uma chama laminar forçada, é imposta uma frequência de oscilação através de um dispositivo externo, como um autofalante no caso do experimento em questão, a fim de garantir uma maior repetibilidade dos experimentos. Foi verificado um aumento na geração de fuligem de 7 a 8 vezes nas chamas oscilantes com respeito às chamas estacionárias. Os autores sugerem que este aumento deve causar uma maior perda por radiação.

Qin et ali, 2004, utilizando modelos empíricos, obteve valores de fração radiante em chamas parcialmente pré-misturadas sob diferentes condições de gravidade. Foi concluído que a fração radiante é maior sob condições de menor gravidade em função da redução do empuxo e conseqüentemente o aumento do volume de chama.

Fang et ali., 2016, estudou o comportamento de chamas laminares a pressões inferiores à da atmosfera. Concluiu-se que há um aumento na fração radiante com o aumento da pressão atmosférica, assim como um aumento na frequência de oscilação. Entretanto, os autores não apontam uma relação direta entre a frequência de oscilação e a fração radiante.

Zhang et ali., 2014, verificou experimentalmente que, em condições gravitacionais normais, a variação nas vazões de *coflow* não tem influência no fluxo radiante das chamas.

5. METODOLOGIA

5.1. Bancada experimental

Para o presente trabalho, foi utilizado um queimador do tipo Santoro, composto de um tubo central para alimentação do combustível, com diâmetro interno de 11.1mm e diâmetro externo de 12.7 mm, e um tubo externo com diâmetro interno de 101.6mm. O anel formado entre os dois tubos é utilizado para o escoamento paralelo de ar atmosférico seco (coflow). A Figura 5.1 ilustra a construção do queimador.

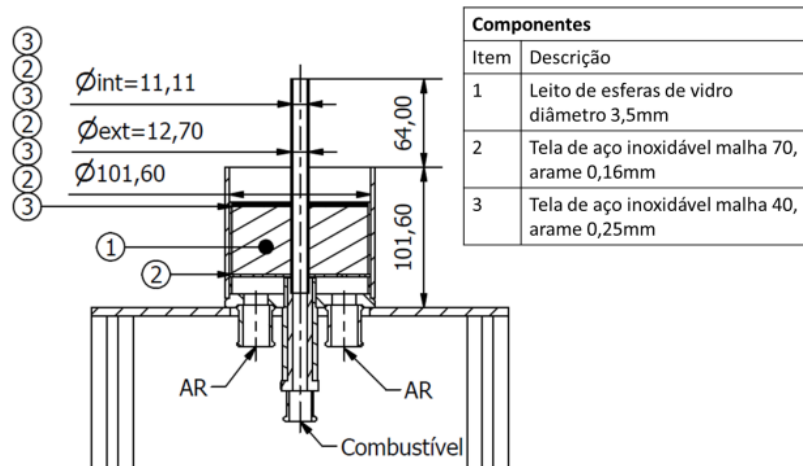


Figura 5.1 – Queimador do tipo Santoro utilizado nos ensaios. Fonte: Machado, 2015.

As vazões de combustível foram controladas por controladores de vazão mássica Bronkhorst série EL200. O controlador utilizado possui calibração para Nitrogênio. Para a medição correta do gás natural, foi calculada uma taxa de conversão conforme

$$Cp_1 Vv_1 \rho_1 = Cp_2 Vv_2 \rho_2 \quad (3)$$

onde ρ é a massa específica do gás, Cp é o calor específico e Vv é a vazão volumétrica de escoamento do combustível. Assim, foi calculada uma razão de conversão de 1.332.

5.2. Medição do comprimento de chama e frequência de oscilação das chamas

Conforme mostra a Figura 5.2, o comprimento de chama instantânea, Hf , é definido como a altura da base do queimador até seu ponto extremo superior. No caso da formação de dois volumes de chama, a regra se mantém, ignorando-se a presença de um espaço vazio entre os diferentes volumes. O comprimento de chama médio, Hm , é definido pela média aritmética entre os valores instantâneos.

As chamas do experimento foram gravadas utilizando uma câmera de alta velocidade do modelo Phantom V411. A câmera foi montada em um tripé a uma distância de aproximadamente 2,5 metros da chama. As imagens para cada chama foram obtidas com uma taxa de aquisição de 800 FPS para um tempo total de 5 segundos. Cada imagem possui uma resolução de 1280x800 pixels.

Uma captura inicial de calibração foi feita posicionando um paquímetro na posição da chama. Através desta imagem, foi calculada a distância real correspondente a um pixel. Também, foi identificada na imagem a posição da boca do queimador, definida como a base da chama.

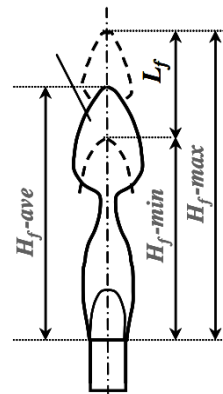


Figura 5.2 – Medidas de comprimento de chama

Um algoritmo desenvolvido no software MatLab por Quezada, 2016 foi adaptado para a análise de cada figura e obtenção da medida de comprimento de chama para cada instante. O algoritmo consiste em transformar a imagem da chama em uma matriz binária, para a qual se atribui o valor 1 para os pixels com uma luminosidade superior a um valor de referência e 0 para os pixels com luminosidade inferior a este valor. O valor de referência utilizado foi mantido para todas as chamas de todas as potências. A partir desta matriz, se obteve, em pixels, o comprimento instantâneo de cada chama. Utilizando o valor de comprimento/pixel obtido com a imagem de calibração, foram calculados os comprimentos de chama correspondentes.

Utilizando os dados de comprimento de chama em função do tempo, foi utilizado o método da transformada rápida de Fourier (FFT), através do MATLAB, para converter o sinal do domínio tempo para uma representação no domínio da frequência. Através da análise dos gráficos, foi possível obter as frequências dominantes de oscilação de cada chama.

5.3. Medição da fração radiante da chama

Um sistema composto de um sensor de fluxo de calor radiante e um sistema de aquisição de dados foi elaborado para a obtenção da fração radiante de cada chama. Foram utilizados sensores do tipo Schmidt-Boelter, modelo MEDTHERM 64-0.2-20/ZnSeW-1C-150.

Para a aquisição de dados, foi utilizado o data logger Agilent 34972A, com uma incerteza à aquisição de dados de 0,0030% da leitura mais 0,0035% da faixa de medição

utilizada [KEYSIGHT TECHNOLOGIES, 2014]. Foram obtidas 150 medições de radiação para cada chama, com intervalo de 400ms entre cada.

O sensor de radiação foi posicionado a uma distância fixa R para cada potência de chama. Esta distância foi calculada como sendo o dobro do maior comprimento médio de chama dentre as vazões de *coflow* utilizadas. Este valor não é claramente definido na literatura, porém é utilizado por Becker e Liang, 1982 e Markstein, 1984. O intuito é que o transdutor de fluxo radiante fique suficientemente longe para reduzir a interferência do formato de chama na medição. A Figura 5.3 mostra esquematicamente a bancada de ensaio.

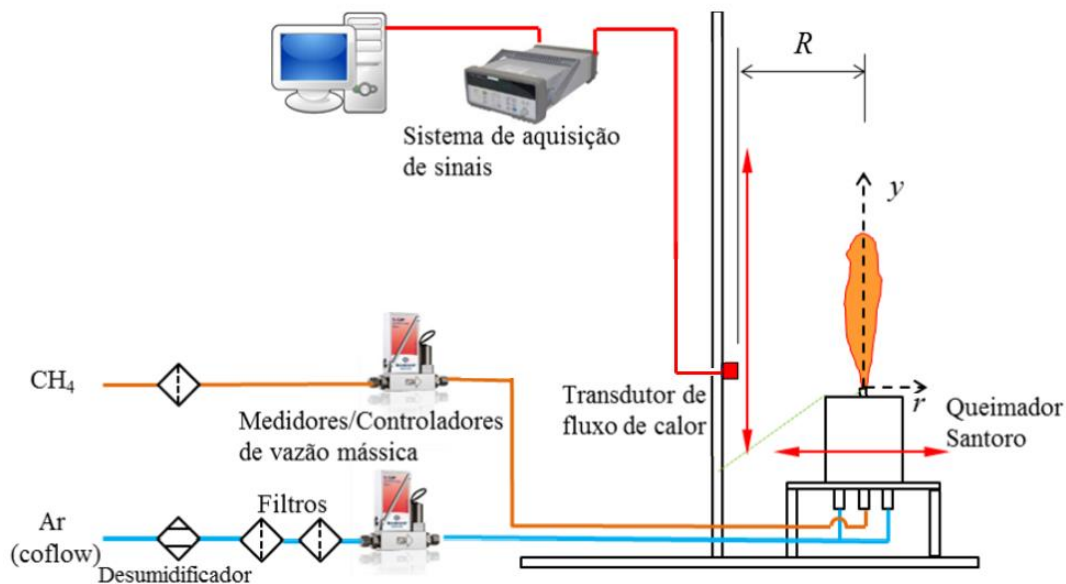


Figura 5.3 – Esquema construtivo da bancada experimental de medição de radiação. Adaptado de Morteiro, 2015

O transdutor foi montado em uma base com altura variável, permitindo posicionar o sensor de modo que apontasse para o ponto correspondente à meia altura média de cada chama.

5.4. Chamas estudadas

Neste trabalho, foram definidas três velocidades de alimentação de combustível, resultando em 3 chamas com potência constante. Para cada potência, utilizou-se 9 vazões de *coflow*, buscando estabelecer os mesmos valores de R . A Tabela 5.1 apresenta os valores dos parâmetros de escoamento de ar e combustível para cada chama.

Tabela 5.1 – Vazões de combustível e de *coflow* utilizadas nos experimentos

V [L/min]	Vazões volumétricas de <i>coflow</i> [L/min]								
0,47	0,0	4,5	9,1	13,6	27,1	40,7	54,2	67,8	81,4
0,70	0,0	6,7	13,4	20,1	40,0	60,0	80,0	100,0	120,0
0,93	0,0	9,1	18,2	27,3	54,2	81,4	108,5	135,6	162,7
R	0	0,12	0,23	0,35	0,7	1,04	1,39	1,74	2,09

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Caracterização das chamas

Em um primeiro momento, são apresentadas as imagens obtidas através da câmera de alta-velocidade para caracterização das chamas. As imagens foram obtidas a 800 frames por segundo, durante 5 segundos, para todas chamas estudadas.

Para chamas difusivas laminares, espera-se um efeito de oscilação constante e com alta repetibilidade, com frequências entre 10 e 20Hz. A Figura 6.1 mostra imagens para a chama com vazão de combustível de 0.698 L/min, para quatro diferentes vazões de *coflow*. A figura 6.2, apresenta as imagens para a vazão de 0.465 L/min. O intervalo entre cada imagem é de 10ms.

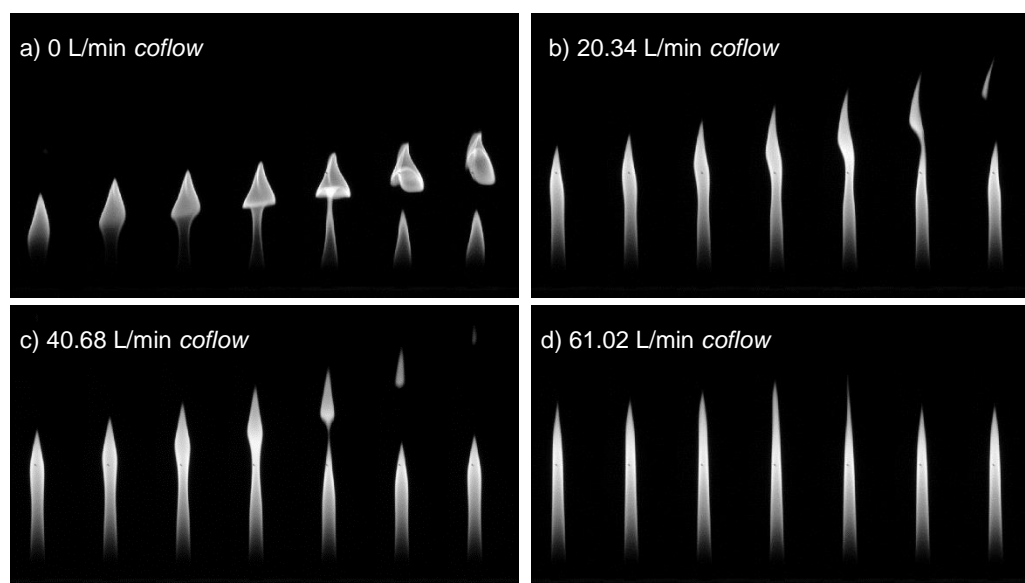


Figura 6.1 – Oscilação em chamas para vazão de combustível de 0.70 Lpm. Intervalo entre imagens de 10 ms.

Analisando as imagens das chamas sem *coflow*, verifica-se, inicialmente, um volume de chama único, com um formato regular. O aquecimento do ar nas regiões próximas à chama gera uma força de empuxo e causa a formação de vórtices que

interferem na geometria da chama. Pode-se verificar um processo de estrangulamento e a formação de um grande volume de chama em sua parte superior. Em seguida, há a separação da chama em dois diferentes volumes. O fenômeno para esta condição de chama é muito similar para as duas potências apresentadas.

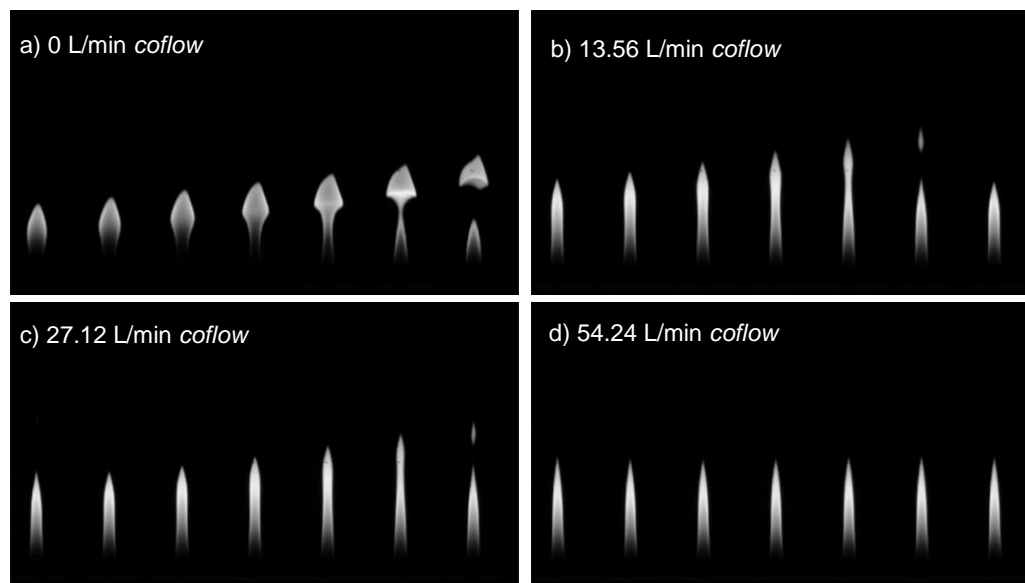


Figura 6.2 – Oscilação em chamas para vazão de combustível de 0.47 L/min. Intervalo entre imagens de 10 ms.

Com a presença de uma vazão de *coflow*, conforme as Figuras 6.1b e 6.2b, observa-se um alongamento da silhueta da chama. O volume formado com o estrangulamento se torna menor e com um formato mais alongado. Conforme apresentado por Darabkhani et al, 2011, a velocidade do ar imposta pelo *coflow* faz com que os vórtices sejam formados em uma região mais próxima ao topo da chama. Pode-se verificar que o ciclo de estrangulamento e separação de chama ocorre mais rapidamente, o que indica uma maior frequência de oscilação com a presença do *coflow*.

Com o aumento da razão entre as velocidades do *coflow* e do combustível, observa-se a ausência do efeito de separação de chama, como pode ser observado nas Figuras 6.1d e 6.2d. Para a chama de maior potência, ainda se observa uma considerável amplitude de oscilação, enquanto na de menor potência percebemos um comprimento de chama praticamente constante.

A Figura 6.3 apresenta os comprimentos de chama médios e seus desvios padrões para cada potência de chama em função de razão R entre as velocidades de *coflow* e oxidante. Percebe-se que, com o aumento de R , ocorre inicialmente um aumento no comprimento de chama para todas as potências. Após uma certa vazão de ar, há um leve decréscimo no comprimento de chama até sua estabilização. Para a vazão de 0.465 L/min de combustível, se verifica que a estabilização ocorre com valores menores de R quando comparado às maiores potências, como foi apontado anteriormente na análise das Figuras 6.1 e 6.2.

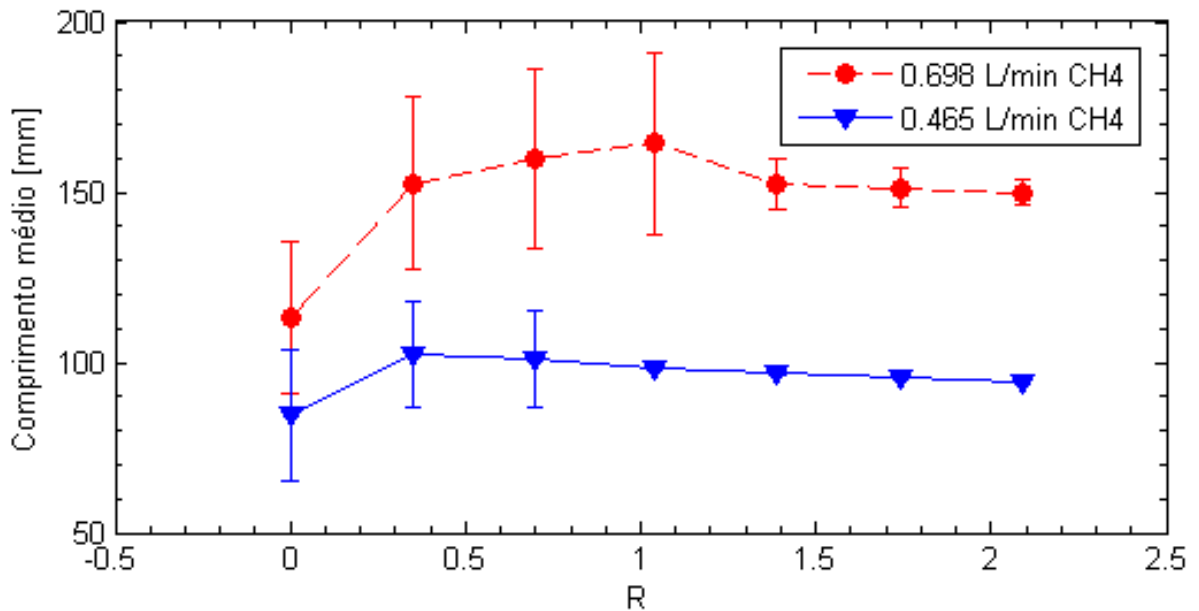


Figura 6.3 – Comprimento médio de chama visível em função da razão R entre as velocidades de escoamento do *coflow* e do combustível. As barras de erros correspondem ao desvio padrão das medições.

A Figura 6.4 mostra a amplitude máxima das oscilações para cada chama em função de R . Verifica-se que, de forma geral, a amplitude de oscilação decresce com um aumento da vazão de oxidantes para todas as potências de chama. Para a vazão de 0.698 L/min, observa-se que há um aumento na amplitude de oscilação da chama sem *coflow* para um *coflow* com $R = 0.35$, que não foi observado na chama de menor potência.

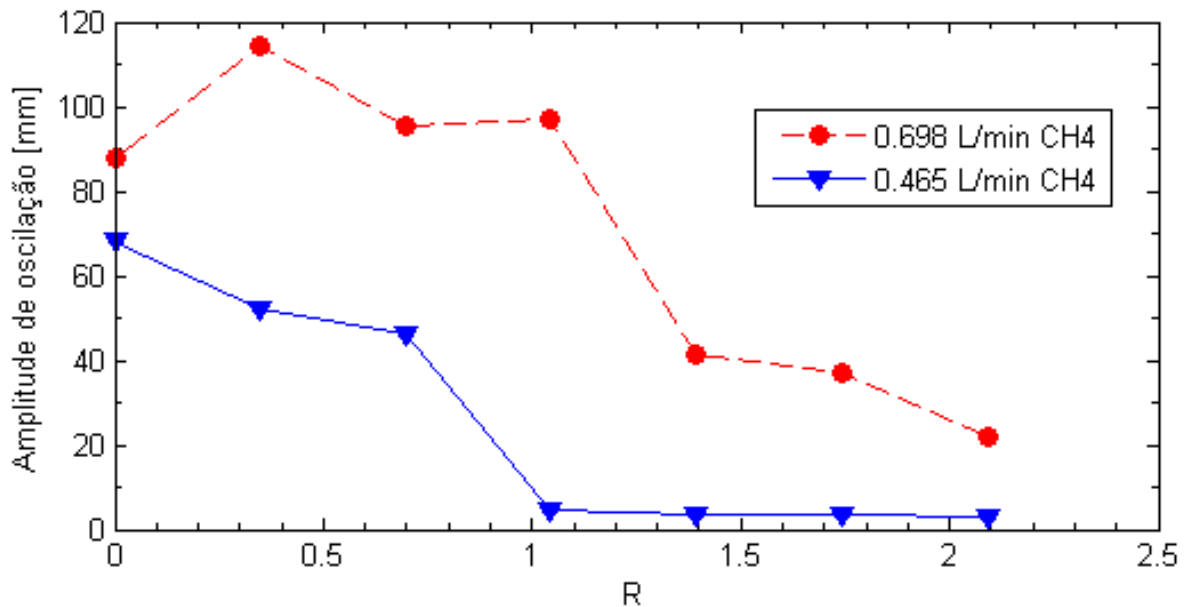


Figura 6.4 – Amplitude máxima de oscilação de chama em função razão entre as velocidades de escoamento do *coflow* e do combustível.

A Figura 6.5 ilustra a análise de frequências utilizando a Transformada de Fourier., para a vazão de combustível de 0.698 L/min e R de 0.35 (esquerda) e 1.74 (direita). Observaram-se, para valores de R baixos, frequências harmônicas bem definidas. Desconsiderando o pico na frequência 0, define-se a frequência de oscilação característica da chama como o primeiro harmônico – 14,65Hz no caso da Figura 6.5. Para valores de R mais elevados, não foi possível caracterizar as frequências de oscilação, conforme apresentado na Figura 6.5b, apesar de ainda haver uma certa variação no comprimento de chama, conforme observado na Figura 6.4. Uma dificuldade encontrada nesta análise foi a limitada resolução da câmera de alta velocidade utilizada. A variação de comprimento de chama para altos valores de R representa poucos pixels na imagem, impedindo uma caracterização adequada de sua oscilação. Sendo assim, estas chamas foram consideradas como estáveis.

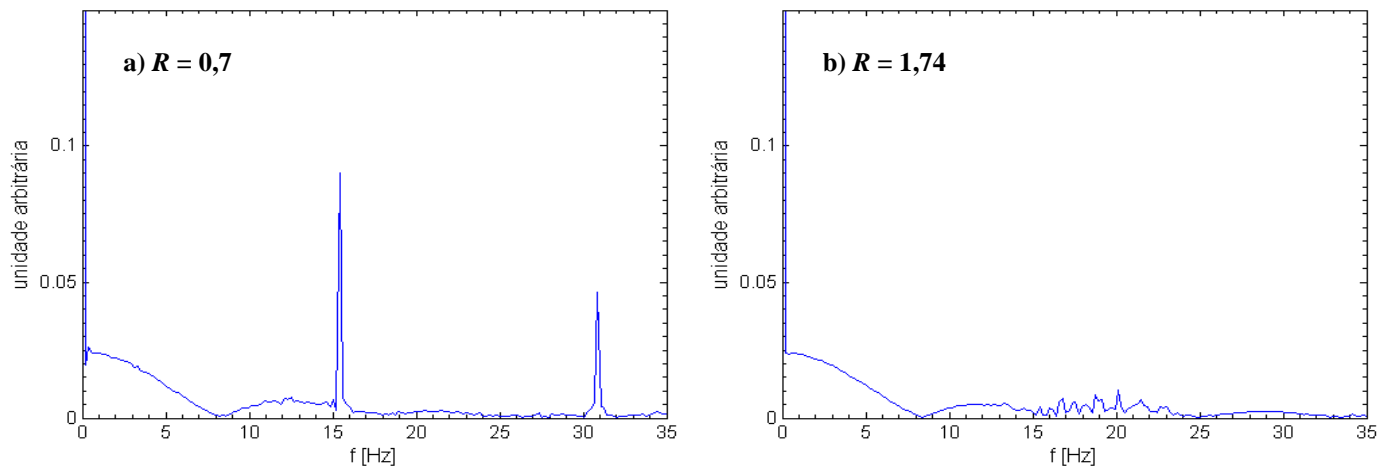


Figura 6.5 – Representação das oscilações das chamas no domínio frequência obtida através da Transformada de Fourier

Na Figura 6.6, estão plotadas as frequências de oscilação em função dos valores de R para as chamas estudadas. Para as duas potências, a frequência de oscilação sem *coflow* é de exatamente o mesmo valor, 10.25Hz. Percebe-se que, em ambos os casos, há um brusco aumento na frequência quando é adicionado um *coflow*. Com o aumento da razão R , a frequência segue crescendo, porém a uma taxa menor.

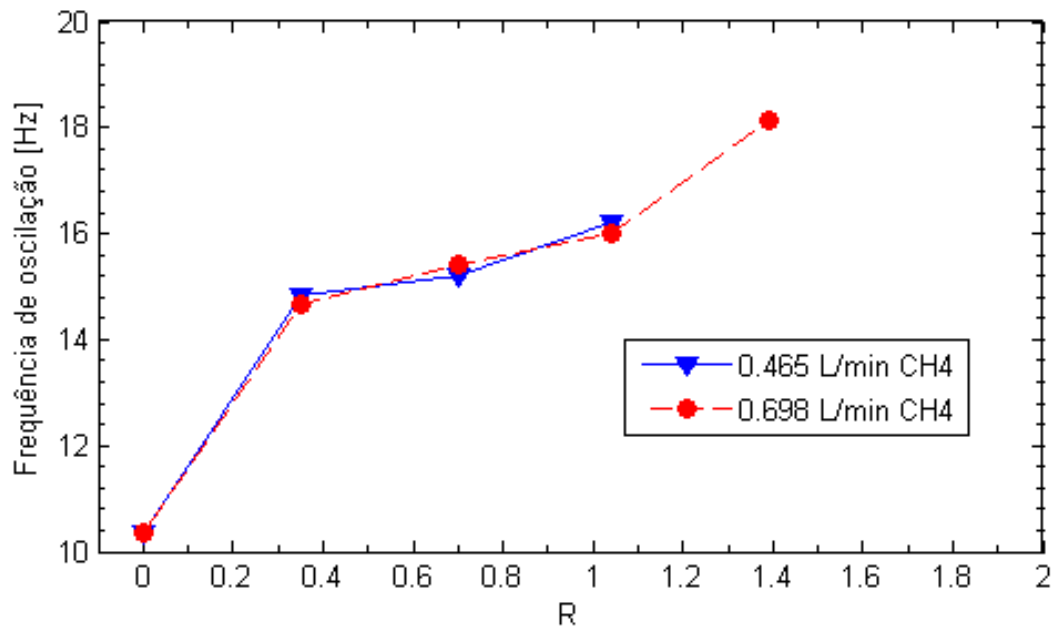


Figura 6.6 – Frequências de oscilação em função de R

A Figura 6.7 apresenta resultados da frequência em função da vazão volumétrica de oxidante por *coflow*. Também foi plotada reta proposta por Darabkhani et al, 2011, que mostra que a frequência de oscilação teria um comportamento linear com a velocidade de *coflow* (equação 3).

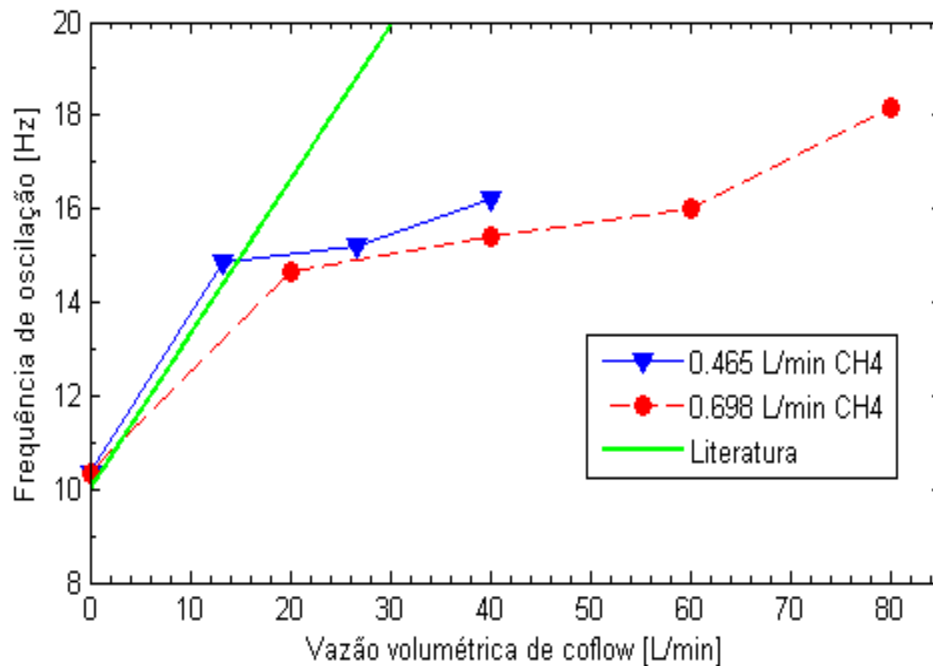


Figura 6.7 – Frequências de oscilação em função da vazão volumétrica de coflow. A reta em verde representa a relação obtida por Darabkhani et al., 2011.

Percebe-se que os resultados obtidos não apresentam o mesmo comportamento que o estudo de referência. É importante ressaltar que o estudo realizado por Darabkhani utilizou um queimador com dimensões consideravelmente menores do que o utilizado neste trabalho. Devido a isto, apesar de as velocidades de escoamento de metano e ar atmosférico serem maiores, as potências das chamas no trabalho original foram consideravelmente menores.

6.2 Fração radiante

As frações radiantes foram medidas conforme o procedimento descrito na metodologia. Foram adicionados dois pontos entre os valores de $R=0$ e $R=0.35$ para cada chama em relação aos utilizados para a caracterização das chamas, pois esta foi considerada uma região de alto interesse devido à brusca variação na frequência de oscilação.

Na Figura 7.1, pode-se verificar que, há um considerável aumento nos valores de fração radiante para as chamas de maior potência. Os valores para a maior potência atingem valores de $X_r = 0.26$, valor consideravelmente maior do que o valor máximo encontrado em chamas de CH₄, conforme a Tabela 3.1.

Para as chamas com vazões de 0.698 e 0.932 L/min, pode-se perceber um aumento significativo na fração radiante como o aumento do *coflow*. Como pode-se esperar, o valor tende a se estabilizar na medida que a oscilação da chama é suprimida e não tem mais efeito sobre a emissão de radiação da chama.

Observa-se, na chama menos potente, um comportamento diferente. A fração radiante tem inicialmente um aumento até $R = 0.35$ e depois estabiliza em um valor próximo ao valor inicial.

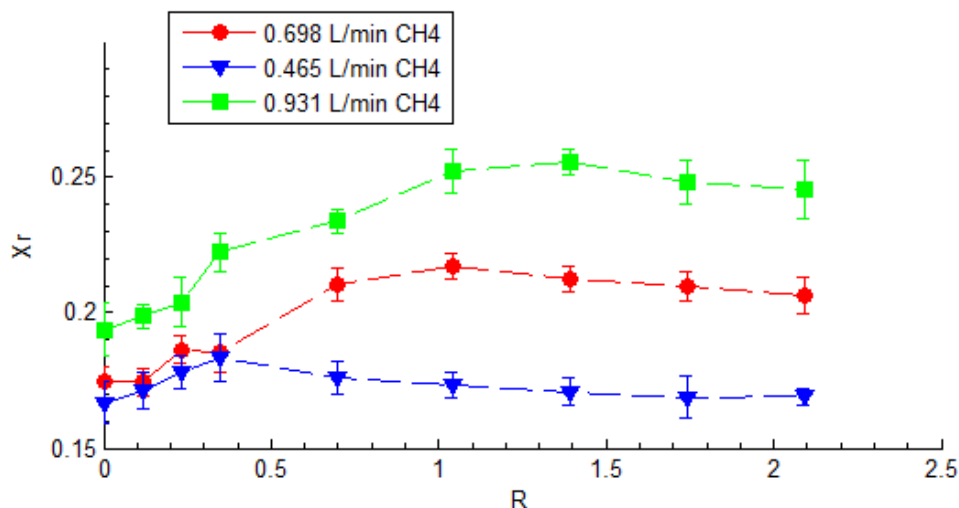


Figura 6.7 – Frações radiantes X_r em função de R , para as três diferentes potências de chama.

7 CONCLUSÕES

Foram observadas algumas diferenças significativas no comportamento das chamas quando comparado aos resultados da literatura. Neste trabalho, as chamas apresentaram uma oscilação que persistiu com valores de R acima de 1,35. Darbkhani definiu que a razão crítica para que se iniba a oscilação é de 0,72. As condições das chamas, entretanto, não foram as mesmas. No trabalho de Darbkhani, foi utilizado um queimador Santoro com dimensões significativamente menores, gerando chamas de menores potências apesar das velocidades de escoamento superiores às utilizadas neste trabalho.

A resposta do comprimento de chama ao aumento do *coflow* ocorreu de acordo conforme o esperado. Conforme apresentado nas Figuras 6.3 e 6.4, houve um aumento do comprimento de chama com o aumento da velocidade de *coflow* em ambas as potências de chama apresentadas. Para potências menores, foi verificada uma estabilização do comprimento de chama com um valor menor de R quando comparado às potências maiores. As amplitudes de oscilação também foram reduziram com o aumento da velocidade de escoamento do oxidante.

Com respeito à radiação, foram obtidas frações radiantes com valores superiores ao esperado para chamas de metano, chegando a representar um quarto da potência total da chama. Apesar disto, pôde-se perceber que a frequência de oscilação das chamas tem uma influência significativa em sua emissão de radiação. Há um considerável aumento, para todas potências de chamas estudadas, nos valores de fração radiante, principalmente na faixa de $R = 0$ a $R = 0,35$.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Machado, Isaías M. **“Caracterização experimental da radiação térmica emitida por chamas não pré-misturadas de metano diluído com CO₂”**. Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, abril de 2015.
- Charwath, M., Hentschel, J., Bockhorn, H., & Suntz, R. **“Behavior of moderately oscillating sooting methane-Air diffusion flames”**. Flow, Turbulence and Combustion, vol. 82, pp 553, 2009.
- Qin, X., Puri, I. K., Aggarwal, S. K., & Katta, V. R. N. **“Gravity, radiation, and coflow effects on partially premixed flames”**. Physics of Fluids, vol 16, pp 8, 2004.
- Modest, M. F. **“Radiative heat transfer”**. 2^a. ed. São Diego: Academic Press, 2003, ISBN 0125031637.
- Quezada, L.C., Machado, I. M, Pereira, F. **“Study of experimental techniques for visible flame length measurement on turbulent diffusion flames”**. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas, 2016.

- Gaydon, A. G., & Wolfhard, H. G. (1971). **Flames: “Their structure, radiation and temperature”**. *Physics Today*, vol 24, pp 10, 1971.
- Lacava, P. T., 2002. **“Elementos de combustão”**, P. 109, São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica,
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. **“Fundamentals of Heat and Mass Transfer”**. 6ª edição, 2007.
- KEYSIGHT TECHNOLOGIES. 34972A Unidade de aquisição, comutação e registro de dados LXI. **www.keysight.com**, 02 ago. 2014. Disponível em: <<http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5965-5290EN.pdf>>. Acesso em: 05 mai 2019.
- Fang, J., Wang, J., Guan, J., Zhang, Y., & Wang, J. (2016). **“Momentum- and buoyancy-driven laminar methane diffusion flame shapes and radiation characteristics at sub-atmospheric pressures”**. *Fuel*, vol 163, pp 295 – 303.
- Zhang, D., Fang, J., Guan, J., Wang, J., Zeng, Y., Wang, J., & Zhang, Y.. **“Laminar jet methane/air diffusion flame shapes and radiation of low air velocity coflow in microgravity”**. *Fuel*, vol 130, pp 25–33, 2014.
- Smyth, K. C., Harrington, J. E., Johnsson, E. L., & Pitts, W. M.. **“Greatly enhanced soot scattering in flickering CH₄/Air diffusion flames”**. *Combustion and Flame*, vol 95, pp 229-239, 1993.
- Gohari Darabkhani, H., Wang, Q., Chen, L., & Zhang, Y. **“Impact of co-flow air on buoyant diffusion flames flicker”**. *Energy Conversion and Management*, Vol 52, pp 2996–3003, 2011