

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

ESTUDO EXPERIMENTAL DO EFEITO DA DILUIÇÃO DO GÁS NATURAL COM DIÓXIDO DE
CARBONO SOBRE CARACTERÍSTICAS DE CHAMAS DIFUSIVAS TURBULENTAS

por

Matheus Moschetta

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, novembro de 2014

ESTUDO EXPERIMENTAL DO EFEITO DA DILUIÇÃO DO GÁS NATURAL COM DIÓXIDO DE
CARBONO SOBRE CARACTERÍSTICAS DE CHAMAS DIFUSIVAS TURBULENTAS

por

Matheus Moschetta

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^a. Dr^a. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira

Comissão de Avaliação:

Prof^a. Dr^a. Adriane Prisco Petry

Prof. Dr. Bardo Ernst Josef Bodmann

Prof^a. Dr^a. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 28 de novembro de 2014

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao orientador do trabalho e coordenador do Laboratório de Combustão da UFRGS, Professor Fernando Marcelo Pereira, pela proposição do tema, pelas fundamentais contribuições teóricas e por compartilhar seu profundo conhecimento de forma didática.

Agradeço ao Professor Nattan Caetano, pelas discussões técnicas, pelo auxílio com os experimentos e pelos conselhos para a elaboração do trabalho.

Agradeço ao estagiário do Laboratório de Combustão, Jonas Franceschi, pelo importante auxílio no projeto do queimador e pela presença durante os experimentos.

Agradeço aos meus colegas e amigos da engenharia, sem os quais essa jornada acadêmica não se concretizaria.

Agradeço ao meu irmão e engenheiro mecânico, Bruno Moschetta, pelo apoio, exemplo e motivação nos momentos bons e ruins ao longo da graduação.

Finalmente, agradeço aos meus pais, Valdecir Moschetta e Cecília Piana Moschetta, responsáveis pela consolidação desse longo caminho de desafios e conquistas.

Moschetta, M. **Estudo Experimental do Efeito da Diluição do Gás Natural com Dióxido de Carbono Sobre Características de Chamas Difusivas Turbulentas** 2014. 26. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

RESUMO

A modelagem da transferência de calor por radiação em processos de combustão é de grande interesse da engenharia. Aplicações industriais como motores, fornos e flares requerem o conhecimento de características radiativas para análise de questões de segurança e riscos, sejam humanos, ambientais e patrimoniais. O trabalho avalia experimentalmente a influência da diluição do combustível com um gás inerte sobre características geométricas e radiantes de chamas difusivas turbulentas. O combustível de estudo é o gás natural e o inerte é o dióxido de carbono, em níveis de diluição de 0%, 10%, 20%, 30% e 40% em termos de volume de CO_2 em relação à vazão volumétrica total de combustível. Para isso, projetou-se um queimador de tubo reto, cujo diâmetro de saída do combustível é de 8mm. Determinou-se o comprimento visível das chamas e a fração radiante de energia liberada pelas mesmas. O comportamento intermitente na parte superior da chama foi analisado. A técnica de medição do comprimento baseou-se na análise de fotografias de longa exposição obtidas por câmera ótica. A radiação foi medida por um sensor de radiação, assumindo a chama como uma fonte pontual de calor que irradia calor uniformemente para todas as direções. O comprimento de chamas cresce com o incremento da vazão volumétrica total de combustível e decai conforme o aumento da diluição do gás natural com dióxido de carbono. A fração radiante de energia liberada cresce com o aumento do tempo de residência e tem uma dependência mais significativa para combustíveis de maior poder calorífico. A presença de fuligem é mais significativa para maiores tempos de residência. A diluição do gás natural com dióxido de carbono aparenta ter um efeito de redução da fração radiante para chamas de mesmas faixas de potência.

PALAVRAS-CHAVE: Chamas difusivas, comprimento de chama, fração radiante, diluição de combustível

Moschetta, M. **Experimental Study of the Effect of Dilution of Natural Gas with Carbon Dioxide on Turbulent Diffusive Flames' Characteristics**. 2014. 26. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

ABSTRACT

The modelling of radiation heat transfer in combustion processes is of great interest for engineering. Industrial applications such engines, furnaces and flares require the knowledge of radiant characteristics to evaluate safety and risks issues, even human, environmental or patrimonial. The work evaluates experimentally the influence of the fuel dilution with an inert gas on turbulent diffusive flames' geometric and radiant characteristics. The fuel of study is natural gas and the inert is carbon dioxide, in dilution levels of 0%, 10%, 20%, 30% and 40% in terms of CO₂ volume related to the total fuel volumetric flow rate. In this regard, a straight tube burner was developed, which diameter is of 8mm. The visible flame length and the radiant energy fraction were determined. The intermittent behaviour on the top of the flame was analysed. The measurement technique of the flame length was based on the analysis of long exposure time photographs, obtained by an optical camera. The radiation was measured by a heat flux sensor, assuming the flame as a punctual source that uniformly irradiates heat to all directions. The flame length increases with increasing total volumetric fuel flow and decreases with higher levels of dilution of the natural gas with carbon dioxide. The radiant energy fraction grows with the increase of the flame residence time and has a more significant dependence for fuels with higher calorific values. The soot presence is more significant for higher residence times. The dilution of natural gas with carbon dioxide seems to have an effect of reducing the radiant fraction for flames of the same level of power.

KEYWORDS: Diffusion flames, flame length, radiant fraction, fuel dilution

ÍNDICE

RESUMO	iv
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Objetivos	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
2.1. Tipos de Chama.....	2
2.2. Comprimento Visível de Chama.....	2
2.3. Descolamento e Extinção de Chama	3
2.4. Radiação Térmica Emitida por Chamas	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
4. BANCADA EXPERIMENTAL E PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO.....	6
4.1. Bancada Experimental	6
4.2. Procedimentos de Medição	8
5. RESULTADOS	9
5.1. Comprimento de Chama	9
5.2. Fração Radiante.....	11
6. CONCLUSÕES	12
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13
APÊNDICE I.....	16
APÊNDICE II.....	17
APÊNDICE III.....	18
APÊNDICE IV	19
ANEXO I	20

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

A indústria do petróleo brasileira teve seu cenário significativamente alterado pelas recentes descobertas de reservas de óleo da camada do pré-sal. Segundo a Petrobras, já são produzidos mais de 500 mil barris de petróleo por dia no pré-sal, e os investimentos neste mesmo setor terão um valor acumulado de US\$102 bilhões até 2018 [Petrobras, 2014]. Se, por um lado, esta expressiva disponibilidade energética coloca o Brasil numa posição estratégica frente à grande demanda de energia mundial das próximas décadas, por outro, questiona-se o destino do carbono proveniente destas reservas. Os depósitos do pré-sal contêm uma alta concentração de dióxido de carbono, chegando até 12% no campo de Tupi [MME, 2009]. Além disso, essa característica é presente em outros poços do planeta, como, por exemplo, no nordeste da Austrália, onde a concentração de dióxido de carbono nos poços pode chegar a 50%. [Golombok e Chewter, 2004]. Este novo cenário estimula o desenvolvimento de pesquisas e tecnologias para amparar as exigências da correta destinação e uso dos produtos da combustão.

As chamas não pré-misturadas (ou difusivas), foco deste trabalho, são aquelas em que o combustível gasoso e o ar estão segregados espacialmente, vindo a se encontrar apenas na zona de reação [Poinsot et al., 2005]. São aplicadas industrialmente, por exemplo, em caldeiras, fornalhas, motores Diesel e flares. Os sistemas de *flaring*, existentes em plataformas petrolíferas e indústrias petroquímicas, têm uma operação segura, e a combustão é o método padrão para tratamento de grandes volumes de gases indesejáveis inflamáveis [Guigard et al., 2000]. Gases emitidos por refinarias, indústrias de petróleo e indústrias químicas são majoritariamente constituídos por compostos orgânicos voláteis de baixo peso molecular. Chamas difusivas, em geral, formam grande quantidade de fuligem, sendo que uma fração apreciável da energia liberada é emitida por radiação.

O mecanismo de transferência de calor por radiação não necessita a presença de um meio material [Incropera, 2008] e independe da resistência térmica imposta por camadas limites. Em altas temperaturas, a radiação tem caráter dominante frente à condução e convecção. Para superar as complexidades do transporte de radiação em meios participantes e as dificuldades inerentes de escoamentos reativos, historicamente tem-se tratado chamas de flares como fontes pontuais, utilizando frações radiantes empíricas e a transferência de calor como base para o poder emissivo [Baukal, 2013].

O design adequado de um flare é vital para as indústrias de óleo e gás, uma vez que equívocos podem causar danos aos equipamentos bem como afetar a saúde e segurança dos trabalhadores. Para isso, é fundamental que se estude e se conheça a influência da radiação nestes dispositivos. Além disso, a radiação em chamas é aplicada industrialmente em secagem de papel, no processamento de metais, em tratamentos térmicos, na queima de produtos cerâmicos, na fabricação de vidros, na secagem de tintas e revestimentos, entre outros.

1.2. Objetivos

O objetivo global desse trabalho é estudar experimentalmente o efeito da diluição com dióxido de carbono em chamas turbulentas difusivas de gás natural sobre o comprimento de chama visível e fração radiante. Para tanto, objetivos específicos são estabelecidos:

- 1) Projetar e construir um queimador de tubo reto e elaborar uma bancada experimental para análise das chamas de gás natural diluídas com dióxido de carbono.
- 2) Medir o comprimento visível das chamas através de imagens obtidas por câmera ótica;
- 3) Medir a fração radiante da energia liberada pelas chamas através de um sensor de radiação;

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Tipos de Chama

Há basicamente dois tipos de estruturas de chama de acordo com o processo de mistura dos reagentes gasosos: chamas pré-misturadas e chamas difusivas (ou não pré-misturadas). Nas chamas pré-misturadas, o combustível e o oxidante são misturados homogeneamente em nível molecular, antes de ocorrer a combustão. Este tipo de chama é usado, por exemplo, em motores de explosão. Já nas chamas difusivas, os reagentes estão inicialmente separados. Em chamas tipo jato o combustível é lançado ao meio oxidante, onde os processos de mistura ocorrem simultaneamente com a combustão. Estas chamas são usadas, por exemplo, em câmaras de combustão de turbinas a gás, caldeiras e fornalhas industriais [Coelho e Costa, 2007].

Além da classificação quanto ao processo de mistura dos reagentes, as chamas podem ser de dois tipos quanto à velocidade do escoamento: chamas laminares e chamas turbulentas. Para chamas laminares, a estrutura não apresenta flutuações no tempo, e o mecanismo predominante da combustão é a difusão molecular. Já nas chamas turbulentas, as distribuições de velocidade, temperatura e concentrações das espécies flutuam no tempo [Turns, 2000]. A turbulência provoca um aumento da taxa de mistura, bem como uma taxa de consumo dos reagentes.

2.2. Comprimento Visível de Chama

O comprimento visível de chamas difusivas turbulentas pode ser determinado experimentalmente por observação visual. É a distância entre a base e o ponto mais alto onde ainda se percebe alguma luminosidade. Pode, também, ser definido como a distância da base até o ponto, na linha central, onde a temperatura média da chama é máxima. Ainda, outra definição, é a da distância da base até ao ponto, na linha central, onde a fração de mistura média é igual à fração de mistura estequiométrica [Coelho e Costa, 2007].

Zukoski et al., 1981, propuseram outra maneira para medir o comprimento visível de chamas, que leva em conta o fenômeno da intermitência. A intermitência é definida como a fração de tempo que a chama ocupa um dado lugar geométrico no espaço. Parte da chama luminosa é vista fora do envelope da pluma formada, devido a flutuações instáveis na sua extremidade. Formatos sucessivos da chama obtidos em vídeo foram utilizados para determinação do seu comprimento visível.

Outra técnica é a de Fluorescência Induzida por Plano de Luz Laser (PLIF). Esse método rastreia a frente de chama por meio da captura da fluorescência emitida pelos radicais químicos produzidos na zona de reação, permitindo mapear a região estequiométrica. [Abu-Gharbieh et. al, 2001].

Segundo Turns, 2000, o comprimento de chama visível, em geral, tende a ser maior do que o baseado em medidas de temperatura ou da composição química da mistura.

Soliman, 2014, avaliou o comprimento visível de chamas de gás natural com diluição de CO₂ por meio de inspeção visual de 3 imagens obtidas por câmera ótica para cada vazão de combustível empregada. Utilizando apenas gás natural, realizaram-se medições para várias vazões. Para chamas com diluição, a quantidade de medições foi reduzida, devido à necessidade de utilização simultânea de 2 rotâmetros calibrados de acordo com um controlador digital de vazão.

Santos e Costa, 2005, investigaram chamas de difusão de propano e etileno emitidas de um tubo reto em ar quiescente. Fotografias diretas das chamas foram utilizadas para determinar o comprimento visível da mesma. Para Reynolds ≥ 8000 , cinco fotografias foram tiradas e, para Reynolds < 8000 , foram três fotografias. O tempo de exposição utilizado foi de 5 segundos. O comprimento visível de chama foi medido para cada fotografia com auxílio de um software de processamento de imagens, e então fez-se a média dos mesmos. Para o regime

controlado por empuxo, a correlação definida por Røkke et al., 1992, para o comprimento de chama foi dada por:

$$\frac{L_f}{d_0} = 25Fr^{1/5} \quad (2.1)$$

onde, L_f é o comprimento de chama visível (distância entre a base da chama descolada e o topo da chama visível) [m], d_0 é o diâmetro de saída do bocal [m] e Fr o número de Froude [-], definido pela Eq. 2.2:

$$Fr = \frac{u_0^2}{gd_0} \quad (2.2)$$

onde, u_0 é a velocidade média de saída do bocal [m/s] e g a aceleração da gravidade [m/s²].

Na Figura 2.1 percebe-se que, no regime de controle por empuxo, L_f/d_0 varia com $Fr^{1/5}$ para chamas de propano e etileno, de acordo com as descobertas de Røkke et al., 1992.

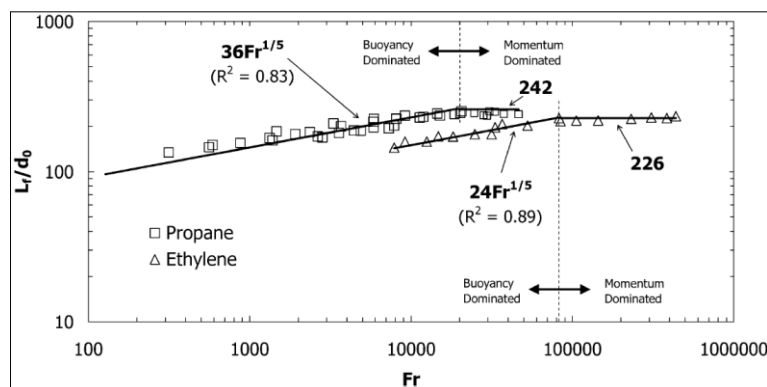


Figura 2.1: Variação do comprimento de chama normalizado pelo diâmetro de saída do combustível com o número de Froude para propano e etileno. [Adaptado de Santos e Costa, 2005].

Mungal, 1989, mediu o comprimento visível de chamas turbulentas de acetileno controladas por quantidade de movimento calculando a média de comprimentos de 2000 fotos instantâneas.

2.3. Descolamento e Extinção de Chama

Em uma velocidade suficientemente baixa, uma chama turbulenta tipo jato está ancorada (em inglês, “attached”) ao bocal. Aumentando a velocidade de saída, a chama de difusão se descola e se estabiliza em uma posição à jusante do bocal. A velocidade em que esse fenômeno ocorre é a velocidade de descolamento (em inglês, “lift-off velocity”) e a distância entre a borda do queimador e a base da chama descolada é a altura de descolamento (em inglês, “lift-off” heigth). A altura de descolamento aumenta com o acréscimo da velocidade do jato até que, ao exceder um valor de altura máximo, a chama se extingue (em inglês, “blowout”) [Peters, 2004]. Os comportamentos do levantamento e extinção da chama podem ser observados na Figura I do Anexo I.

Kalghatgi, 1984, fez um estudo sobre alturas de descolamento e comprimentos visíveis de chama para chamas de difusão turbulentas de hidrogênio, propano, metano e etileno. Três fotografias das chamas foram tiradas com um tempo de exposição de 1/30 segundos. A altura de descolamento foi medida para cada fotografia e fez-se uma média. Segundo ele, a altura de

descolamento varia linearmente com a velocidade de saída do jato independente do diâmetro de saída do jato para determinado gás.

O comportamento linear e independente do diâmetro de saída do jato está de acordo com as descobertas de Peters e Williams, 1983 e Santos e Costa, 2005.

2.4. Radiação Térmica Emitida por Chamas

As chamas de hidrocarbonetos do tipo jato emitem radiação térmica de duas formas: por meio da emissão contínua no espectro de partículas provenientes de fuligem, e por meio da emissão em bandas espectrais distintas de produtos quentes da combustão, como H₂O e CO₂. Ambas as fontes emitem, predominantemente, na região do infravermelho, mas a emissão contínua de partículas quentes se estende ao espectro visível e é responsável pela intensa luminosidade dessas chamas. [Hankinson et al., 2011].

Segundo Turns, 2000, a radiação térmica emitida por uma chama é uma fração da energia total liberada pelo combustível após a sua queima. A fração de calor radiante (adimensional), ou seja, a fração de energia da chama que é irradiada para o ambiente é definida por:

$$X_R = \frac{Q_R}{Q_T} \quad (2.3)$$

onde, Q_R é a energia total emitida para o ambiente [kW] e $Q_T = \dot{m}\Delta H_c$, onde \dot{m} é a vazão mássica do combustível [kg/s] e ΔH_c é o poder calorífico do combustível [kJ/kg]. Sivathanu e Gore, 1993, determinaram a fração radiante por meio da integração do fluxo de calor radiante obtido por um sensor de radiação total ao longo de um invólucro cilíndrico imaginário de raio R posicionado em torno da chama, com eixo central coincidente com o eixo longitudinal da chama, de acordo com:

$$Q_R = \int q_r \cdot dA = \int_{-\infty}^{+\infty} q_r \cdot 2\pi R \cdot dz = 2\pi R \int_{-\infty}^{+\infty} q_r \cdot dz \quad (2.4)$$

onde, q_r é o fluxo de calor radiante no sensor [W/m²] e R a distância horizontal do sensor até o eixo central da chama [m].

Métodos simplificados para medição da radiação emitida por chamas são de grande interesse para aplicações de engenharia. Um desses métodos é fundamentado na consideração de que a chama pode ser representada por uma fonte pontual, localizada à meia altura de chama. Assim, o valor da energia total irradiada para o ambiente pode ser calculada como o produto entre a área superficial de uma esfera de raio R ($A_s = 4\pi R^2$) e o fluxo de calor radiante q_r . Nesse caso a fração radiante pode ser aproximada por:

$$X_R = \frac{4\pi R_f^2 q_r}{\dot{m}\Delta H_c} \quad (2.5)$$

onde, R_f é a distância do ponto médio do comprimento da chama até o radiômetro [m]. Para medição da radiação em regiões distantes da chama (*far field region* - mais do que duas vezes o comprimento de chama) o método tem bons resultados, enquanto que para regiões próximas à chama (*near field region*), os resultados são insatisfatórios. Esse método simplificado é o utilizado pelos padrões da API para sistemas de flares (ANSI/API STANDARD 521, 2007).

Diversos estudos de radiação em chamas difusivas foram realizados. Turns e Myhr, 1991, Schefer et al., 2007, Markstein, 1997, e Becker e Liang, 1982, determinaram a fração

radiante para vários combustíveis empregando o método que assume a chama como fonte pontual de calor.

Santos e Costa, 2005, realizaram testes em chamas de difusão turbulentas de etileno e propano para diferentes diâmetros de saída do combustível. Dentre outros fatores, analisaram características radiantes das chamas produzidas. O fluxo de energia radiante foi medido utilizando um radiômetro com um campo de visão de 150° que faz medições nas faixas de comprimento de onda de 0.6 a 15 μm , com incertezas de $\pm 3\%$. O sensor foi colocado em uma posição radial fixa de $R_f = 0,5\text{m}$ e em uma posição axial variável em relação à saída do queimador, dada por $x = h + L_f/2$, onde h é a altura de descolamento [m]. A fração radiante é dada, também, pela Eq. 2.5.

A Figura 2.2 mostra as frações radiantes para os dois combustíveis estudados, como função do tempo de residência da chama, definido por:

$$\tau_f = \frac{L_f^3}{d_0^2 u_0} \quad (2.6)$$

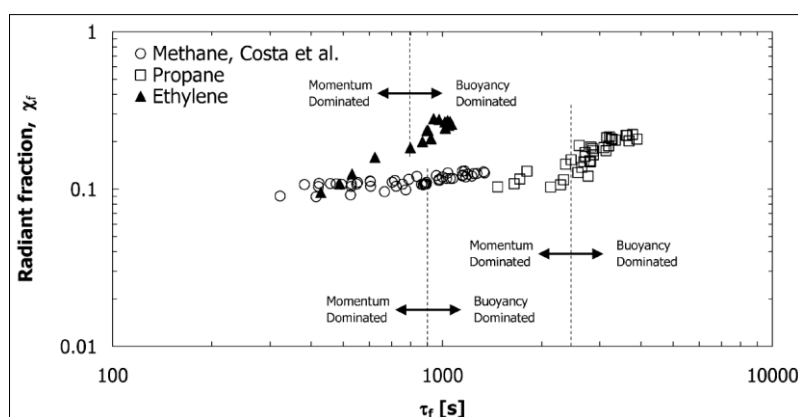


Figura 2.2: Variação da fração radiante com o tempo de residência para propano e etileno. [Adaptado de Santos e Costa, 2005].

É interessante notar que a Figura 2.2 revela pouca influência do tempo de residência sobre a fração radiante para chamas controladas por empuxo e por quantidade de movimento de metano, enquanto há uma clara influência para chamas de propano e etileno. Tanto a magnitude como a tendência da fração radiante são consistentes com os estudos de Turns e Myhr, 1991.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diversos autores investigaram o efeito da diluição do CO_2 em chamas. No estudo de efeitos térmicos, Park et al., 2008, reportaram que a perda de temperatura em chamas difusivas devido à radiação é linearmente proporcional à taxa de diluição de CO_2 . Oh J. e Noh D., 2013, obtiveram resultados para chamas turbulentas difusivas diluídas com CO_2 , os quais indicaram o aumento da temperatura média das chamas com a diminuição da fração molar de CO_2 na queima.

Quanto à estabilidade e extinção de chamas, Bae et al., 2002, e Satio et al., 1998 avaliaram os efeitos da diluição de CO_2 na estabilidade e extinção de chamas laminares difusivas. Im e Atreya, 2009, realizaram um estudo computacional de chamas difusivas esféricas em microgravidade, analisando parametricamente o efeito de diluentes na extinção de chamas. O trabalho mostrou que o CO_2 tem um maior efeito de supressão da chama por diluição do que hélio e nitrogênio com mesmos níveis de diluição. Também, que a adição de

CO₂ tem influências múltiplas no comportamento da chama, incluindo os efeitos radiantes, termodinâmicos, difusivos e químicos.

Para estudar o comprimento e altura de descolamento de chamas turbulentas difusivas, Oh J. e Noh D., 2013, estudaram níveis de diluição de até 30% de fração molar de CO₂. Observaram que o comprimento de chama aumentou com a diminuição da fração molar de CO₂ no oxidante, enquanto que a altura de descolamento diminuiu. Feese e Turns, 1998, estudaram o efeito da adição de inertes em ar e fluxos de combustível na estrutura de chamas laminares difusivas de CH₄ e ar. O comprimento de chama permaneceu praticamente constante para o combustível diluído e aumentou para a diluição do ar. Santos e Costa, 2005, obtiveram resultados experimentais para alturas de descolamento, comprimento e frações radiantes para chamas turbulentas difusivas de propano e etileno emitidas de um queimador reto em ar à temperatura e pressão atmosféricas. As condições dos testes analisaram diversas situações, modificando o diâmetro de saída do combustível e a velocidade média de saída do jato. O estudo indicou que a transição do controle por empuxo para momento linear depende do tipo de hidrocarboneto.

Quanto à formação de NO_x e fuligem, Lee et al., 2000, estudaram os efeitos da adição de CO₂ na estrutura da chama e formação de NO_x em chamas difusivas de metano e ar. Liu et al., 2001, estudaram os efeitos da adição de CO₂ na formação de fuligem e NO_x em chamas difusivas de etileno. Du et al., 1990, estudaram a influência química da adição de CO₂ na formação de fuligem em chamas difusivas. Concluíram que a adição de CO₂ suprime esse efeito.

Outros efeitos também foram estudados. Qin et al., 2001, reportaram que o efeito cinético devido à diluição de CO₂ é desprezível. Hwang et al., 2008, estudaram efeitos hidrodinâmicos de chamas difusivas de metano e ar. Os resultados indicaram que a presença de CO₂ aumenta a mistura dentro de um único vórtice e aumenta o alongamento da superfície de chama. Os experimentos também mostraram que a chama gradualmente ganhou uma cor azul com o aumento da diluição de CO₂. Vale ressaltar, também, o trabalho de Delichatsios e Orloff, 1988, no qual estudaram os efeitos da turbulência em características radiantes de chamas difusivas controladas por quantidade de movimento. No estudo, analisaram a emissão de radiação para acetileno, propileno e propano para cinco diferentes diâmetros de saída de combustível.

Na melhor busca da literatura realizada, verificou-se a oportunidade de dar continuidade aos estudos dos efeitos da diluição de combustíveis com um inerte. Na bibliografia relacionada, não se identificou um trabalho específico que estude em conjunto o comprimento visível e a fração de energia radiante liberada por chamas turbulentas difusivas de metano diluídas com dióxido de carbono, controladas por empuxo. Essa lacuna na análise das chamas do tipo jato motivou a realização do trabalho aqui apresentado.

4. BANCADA EXPERIMENTAL E PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO

Nesta seção são descritos os materiais utilizados para a realização dos experimentos, bem como o método empregado para a medição do comprimento de chama e da fração radiante.

4.1. Bancada Experimental

O queimador empregado no presente estudo é construído em três partes: 1) cama de esferas, 2) bucha de acoplamento e 3) bico injetor. A cama de esferas é usinada em aço SAE 1020 e preenchida com esferas de vidro de 2 mm de diâmetro, as quais ajudam a homogeneizar o escoamento de combustível. Nas laterais há quatro parafusos para fins de sustentação. A bucha de acoplamento, fixada sob o suporte, também é usinada em aço SAE 1020 e tem a função de permitir a intercambialidade de diferentes tubos para a saída de combustível, por meio de interferência. O tubo utilizado é circular e de aço inoxidável. Tem 245 mm de comprimento, diâmetro interno de 8 mm e espessura de parede de 1mm. Vale ressaltar

que o comprimento do tubo é aproximadamente 30 vezes maior do que seu diâmetro de saída de combustível, garantindo que o perfil de velocidades seja plenamente desenvolvido. A figura 4.1 mostra o queimador projetado e seus desenhos de fabricação encontram-se nas Figuras I, II e III do Apêndice I.

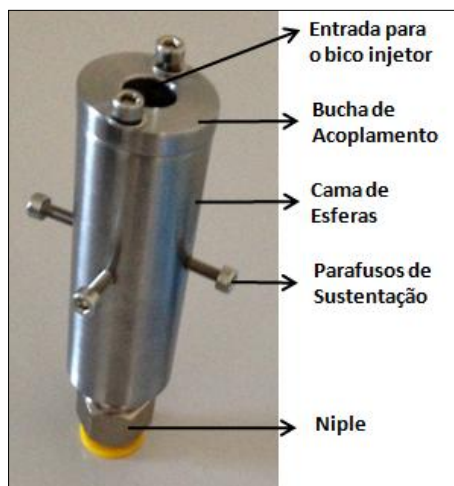


Figura 4.1: Queimador de tubo reto fabricado.

Para os testes é utilizado gás natural veicular com a seguinte composição química: 90,8% de metano, 6,6% de etano, 2,1% de propano, 0,5% de butano (e mais pesados), 0,5% de dióxido de carbono 1,5% de nitrogênio. [GasNet, 2014]. O dióxido de carbono apresenta pureza de 99,95% (WhiteMartins).

Os experimentos são realizados segundo a configuração de bancada mostrada na Figura 4.2. O gás natural e o dióxido de carbono são misturados por meio de um conector em Y. O comprimento de mistura, definido pela distância entre o conector em Y e a entrada do queimador é de 1,9 m, o que foi considerado para suficiente para obter uma mistura homogênea. As chamas são envolvidas por uma malha fina de aço galvanizado tipo M-20, com a finalidade de minimizar interferências do ar ambiente. A área aberta da malha é 58,34% e as dimensões são de 1 m x 2,5 m.

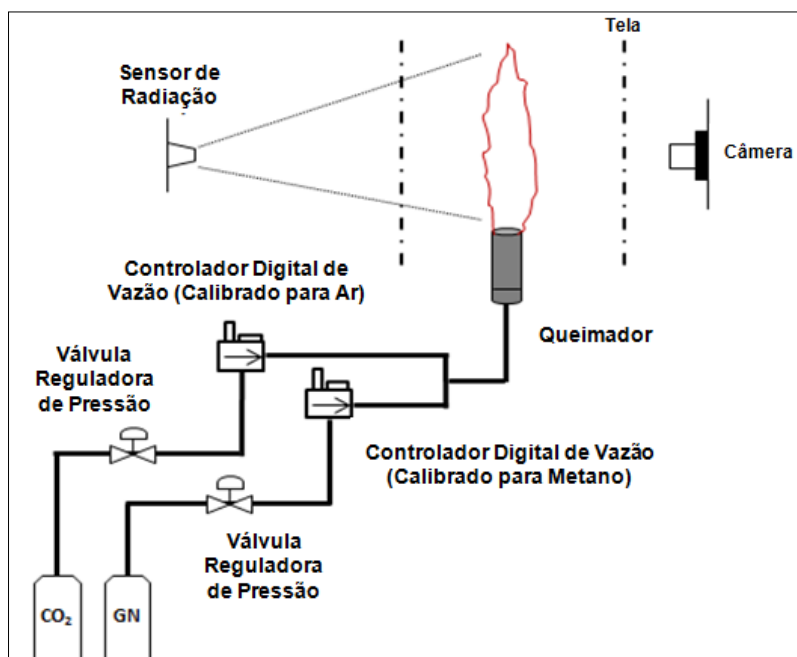


Figura 4.2.: Bancada experimental para realização dos testes.

Utilizam-se dois controladores digitais de vazão da marca BRONKHORST. Ambos são medidores mássicos que operam por princípio térmico, tornando-os independentes da pressão. Um é do modelo F-201CV, calibrado para metano, com vazão de operação máxima de 10 sl/min (onde sl é *standard litre*, padrão que utiliza como referência a pressão de 1 atm e a temperatura de 20°C) e incerteza de medição de 0,1% do valor de fundo de escala mais 0,5% da medição. O segundo é do modelo F-201CV, calibrado para ar, com vazão de operação máxima de 15 sl/min e mesma incerteza. Na Tabela I do Apêndice II podem ser encontrados os dados utilizados para a correção de vazão para cada chama.

Para obtenção das imagens, utiliza-se uma câmera ótica da marca NIKON modelo COOLPIX L810.

Para medição da radiação, utiliza-se um sensor da MEDTHERM CORPORATION, Série 64, modelo 64-0.5-20, com uma incerteza expandida de $\pm 3\%$ da responsividade do sensor, que é de 0.8503 kW/m² por mV.

4.2. Procedimentos de Medição

Os experimentos são feitos para o combustível puro e para quatro níveis de diluição: 10%, 20%, 30% e 40% em termos de volume de CO₂ em relação à vazão total de combustível. Para medição dos comprimentos de chamas, a câmera é posicionada em um tripé a 1,6m de altura em relação ao chão e distante 5 m do queimador, em linha reta. O queimador é posicionado de maneira que o bocal de saída do combustível esteja a 0,5m de altura em relação ao chão. Atrás dele, é colocado um painel preto para melhor visualização das imagens. São utilizados dois tempos de abertura para a câmera, sendo um de 4 segundos e outro de 1/125.

Inicialmente, fez-se uma avaliação de fotografias instantâneas e de longa exposição para verificar qual o melhor método para medição dos comprimentos de chama. Para isso, posicionou-se um paquímetro em uma posição vertical ao longo do eixo do queimador e obteve-se uma fotografia instantânea (de curta exposição). Então, com uma dada chama de gás natural puro, foram obtidas 90 fotografias instantâneas, com tempo de abertura de 1/125 segundos e 8 fotografias de longa exposição, com tempo de abertura de 4 segundos.

Com a fotografia do paquímetro, verificou-se a diferença de pixels entre a posição do pixel inicial e final do instrumento de medida, permitindo estabelecer o comprimento de um pixel da imagem obtida. Com as fotografias instantâneas, de longa exposição e sabendo-se a equivalência entre pixel e comprimento, determinaram-se os comprimentos de chama.

Para as fotografias instantâneas, estabeleceu-se o critério de que a comprimento de chama é dado pela distância entre a saída do queimador e o último pixel visivelmente contínuo na chama, ou seja, desconsideraram-se eventuais plumas descoladas da ponta da chama. Para as fotografias de longa exposição, estabeleceu-se o critério de que o último pixel branco totalmente luminoso determina uma sobreposição contínua de chamas, caracterizando o comprimento de sobreposição. Ainda, estabeleceu-se que o último pixel visivelmente luminoso determina o comprimento total da chama. A diferença entre o comprimento de sobreposição e o comprimento total caracteriza a intermitência. Finalmente, estabeleceu-se que comprimento de chama visível médio é dado pelo comprimento de sobreposição mais metade da intermitência.

Fez-se a comparação entre os comprimentos de chama obtidos pelas fotografias instantâneas e os comprimentos de chama de sobreposição, o que é possível, uma vez que ambos não levam em conta a região da intermitência. Os comprimentos de chama obtidos das 90 fotografias instantâneas resultaram em uma média de 62,2 cm, com variância de 6,8 cm. Pelas 8 fotografias de longa exposição, a média dos comprimento de sobreposição foi de 64,3 cm, com variância de 1,6 cm. Os dois métodos apresentaram uma discrepância de 3,3% entre suas médias. A média dos comprimentos efetivos obtidos pelas fotografias de longa exposição foi de 69,58cm, com variância de 2,1 cm. A intermitência, portanto, teve uma média de 5,2 cm, com variância de 1,1 cm.

Verificou-se uma boa concordância entre as medições realizadas por meio de fotografias instantâneas e de longa exposição. Portanto, por conveniência, adotou-se o método de medição de comprimento de chama por análise de fotografias de longa exposição, o que permite fazer a análise com um número de imagens consideravelmente menor do que utilizando fotografias instantâneas, além de permitir a visualização da região de intermitência. Detalhes do método podem ser encontrados na Figura I e Tabela I do Apêndice III.

Nos experimentos, a cada incremento de vazão volumétrica, foram registradas 3 fotos de longa exposição para análise do comprimento de chama.

Para garantir a aplicabilidade do método simplificado para medição de radiação, teve-se o cuidado de modificar a posição do sensor de radiação para cada chama estudada. Para isso, seguiu-se o seguinte passo a passo: definiam-se as vazões nos controladores digitais; esperava-se a estabilização da chama; posicionava-se uma trena milimetrada próxima ao eixo da chama; um observador (o mesmo para todas as chamas) estimava um comprimento aproximado para a chama; afastava-se o sensor de radiação à uma distância R de aproximadamente três vezes o comprimento de chama; media-se a altura H_R do sensor de radiação em relação à saída do bocal do queimador; realizava-se a medição do fluxo de calor radiante por meio de sensor de radiação.

Programou-se o datalogger para fazer uma medição a cada 400ms durante 20s, totalizando 50 medidas. A Figura 4.3 ilustra o posicionamento do sensor de radiação para cada chama. Detalhes sobre essa análise encontram-se na Tabela I do Apêndice IV

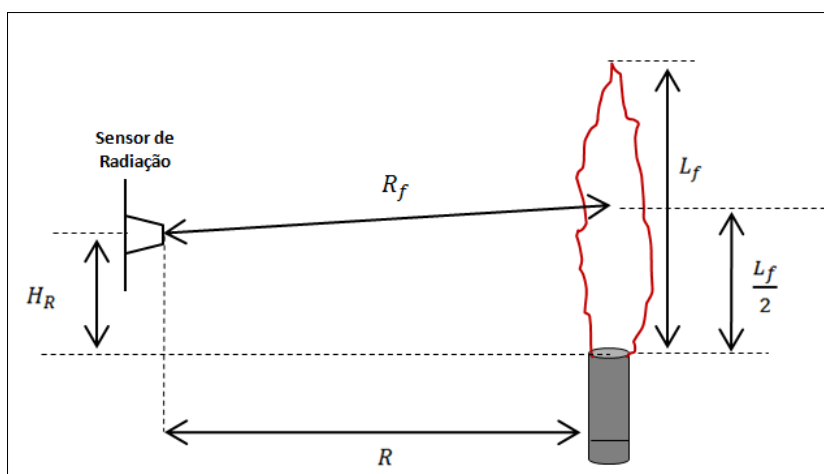


Figura 4.3: Posicionamento do sensor de radiação para cálculo da fração de energia radiante.

5. RESULTADOS

5.1. Comprimento de Chama

A Figura 5.1 mostra a variação do comprimento de chama em função da vazão volumétrica total de combustível empregada. É visível que independentemente da diluição de CO_2 utilizada, o comportamento para o comprimento de chama segue uma mesma tendência crescente. Nota-se que para as vazões de 1 sl/min até 7 l/min a diferença máxima entre os comprimentos de chama é de aproximadamente 0.1 m, com exceção para a vazão de 2 l/min, que é de 0.16 m. Para as vazões de 8 l/min até 10 l/min, a diferença máxima entre os comprimentos de chama é maior, de aproximadamente 0.18 m. É visível, também, que uma maior diluição do combustível com dióxido de carbono reduz o comprimento de chama, o que está de acordo com os resultados de Oh J. e Noh D., 2013, que afirmam que essa tendência é devida à reduzida fração molar de dióxido de carbono, isto é, há menos combustível para ser consumido. Típicas sequências de fotografias obtidas para as chamas de gás natural puro e diluídas com até 40% de CO_2 podem ser observadas nas Figuras I e II do Apêndice V.

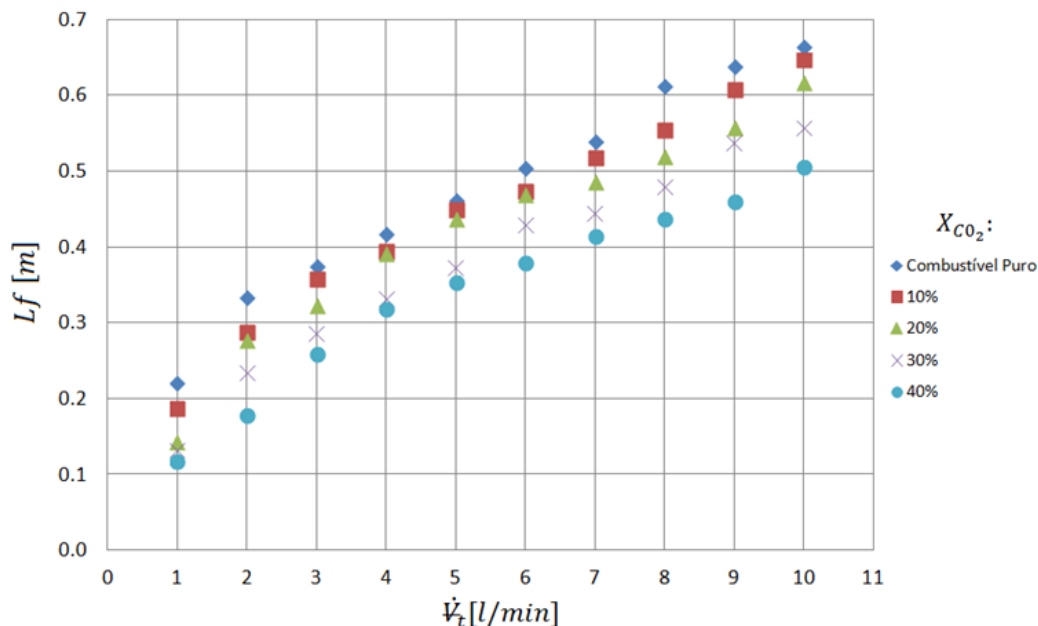


Figura 5.1: Variação do comprimento de chama [m] com a vazão volumétrica total [l/min] (referência a pressão de 1 atm e a temperatura de 20 °C).

Na Figura 5.2 observa-se o comportamento do comprimento de chama normalizado pelo diâmetro de saída do combustível em função do número de Froude. Nota-se uma visível tendência de crescimento que está de acordo com o estudo de Røkke et al., 1992, que propuseram a correlação empírica da Eq. 2.2, sugerindo que no regime controlado por empuxo, há uma dependência assintótica de L_f/d_0 com o número de Froude da ordem de $Fr^{1/5}$. Vale ressaltar que para as chamas de baixo número de Froude, nas quais as forças de empuxo predominam frente às de inércia, percebe-se um comportamento menos oscilante quanto às características geométricas da chama, comparativamente às chamas com predominância de forças inerciais.

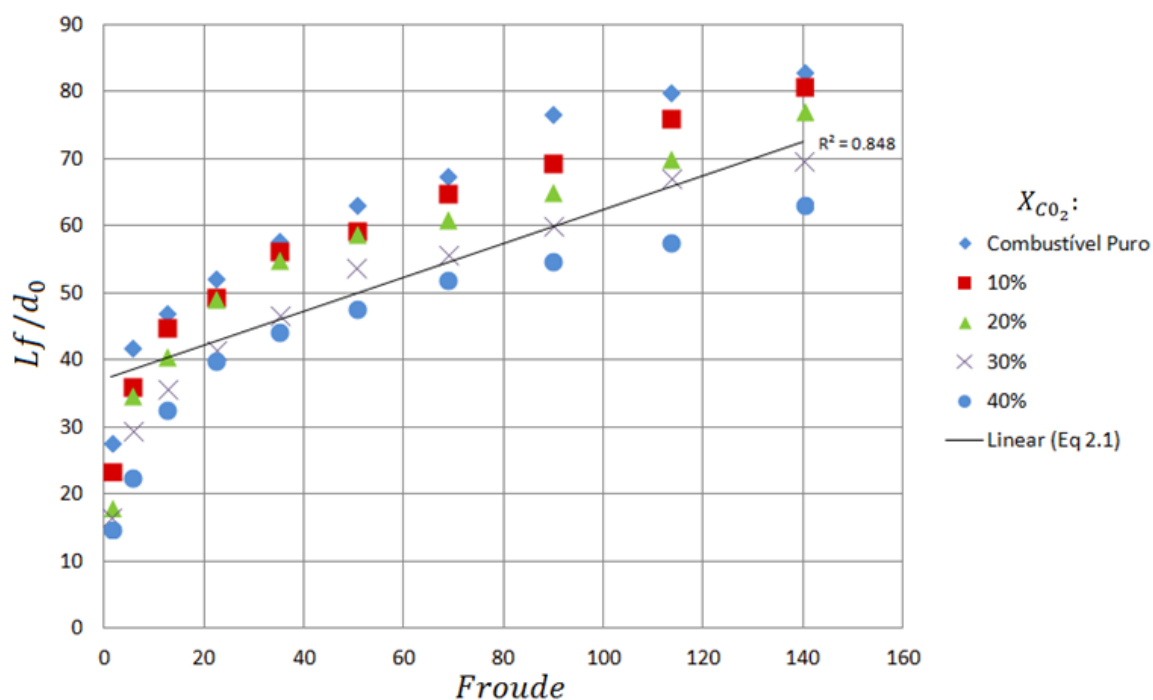


Figura 5.2: Variação do comprimento de chama normalizado pelo diâmetro de saída do combustível com o número de Froude .

5.2. Fração Radiante

O comportamento da fração radiante da energia liberada pelas chamas em função do tempo de residência definido pela Eq. 2.6 pode ser observado na Figura 5.3. Nota-se que, de maneira geral, a fração radiante tende a crescer com o aumento do tempo de residência. É interessante notar que para as chamas de combustível puro e diluição de 10% de dióxido de carbono, há uma forte dependência da fração radiante com o tempo de residência, enquanto que para as diluições maiores, de 20%, 30% e 40%, essa dependência é reduzida. Ou seja, a resposta da fração radiante de energia liberada com o tempo de residência é mais importante para combustíveis menos diluídos, o que resulta em frações radiantes maiores para o combustível puro. O estudo de Santos e Costa, 2005, revela uma maior dependência entre a fração radiante e o tempo de residência para chamas de etileno do que para propano e metano. Nota-se, então, que também há uma dependência da relação entre a fração radiante e o tempo de residência com o poder calorífico dos combustíveis, já que nas chamas com menor concentração do inerte dióxido de carbono e conseqüentemente poder calorífico mais baixo, a dependência também mais foi alta. Outro aspecto relevante observado foi quanto à presença de fuligem. Para maiores tempos de residência, e conseqüentemente chamas mais volumosas (uma vez que o tempo de residência é proporcional à L_f^3), mais fuliginosas são as chamas, característica observada também nas fotografias obtidas.

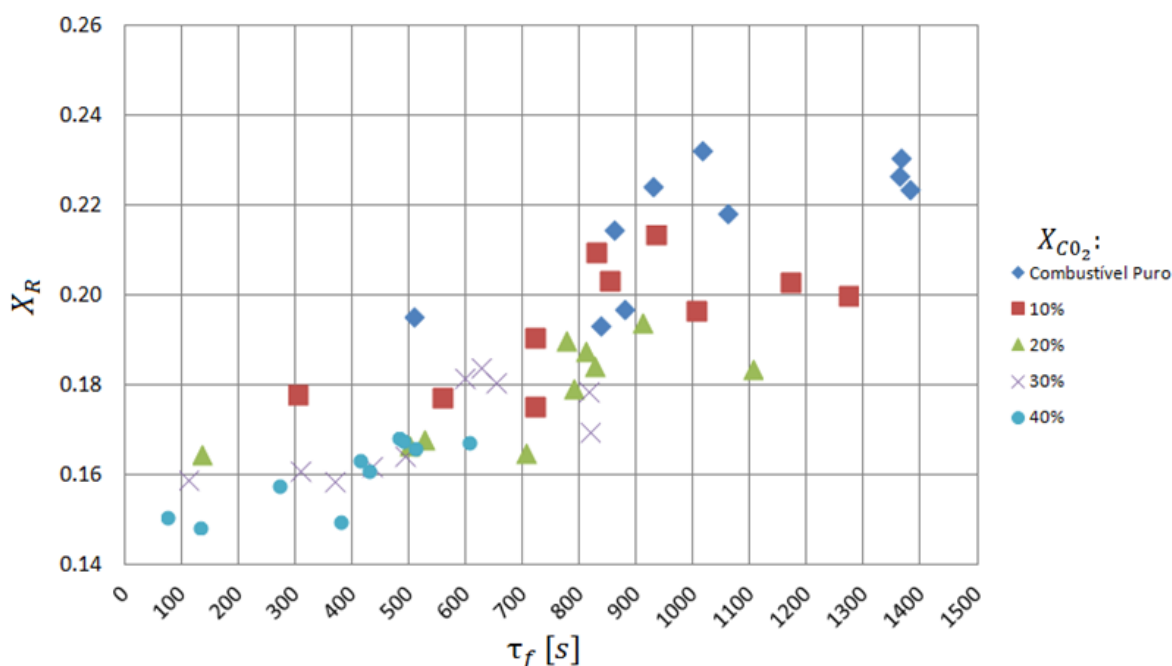


Figura 5.3: Variação da fração radiante de energia liberada com o tempo de residência [s].

O efeito da diluição do gás natural com dióxido de carbono na fração radiante de energia liberada para chamas de aproximadamente mesma potência é observado na figura 5.4. Nota-se que para todos os níveis de diluição com dióxido de carbono, a fração radiante parece tender a uma redução. Para as chamas de potência de 0,5 kW a 2 kW, os valores da frações radiantes são similares para chamas sem diluição e com 10% de diluição, enquanto que para diluição de 20% e 30%, os valores se distanciam, retornando a um nível similar para potências diluição de 40%. Para chamas de potência de 2 kW a 5 kW, o comportamento é mais estável e não apresenta valores muito discrepantes ao analisar diferentes níveis de diluição. De maneira geral, a fração radiante apresenta valores crescentes conforme aumento da potência para chamas sem diluição e tem um comportamento oscilante quando há incremento da diluição do gás natural com dióxido de carbono. No entanto, cabe uma ressalva: como as curvas

apresentadas representam uma faixa de potências, não é possível definir se os efeitos observados se dão pela diluição ou pela variação de potência ponto a ponto.

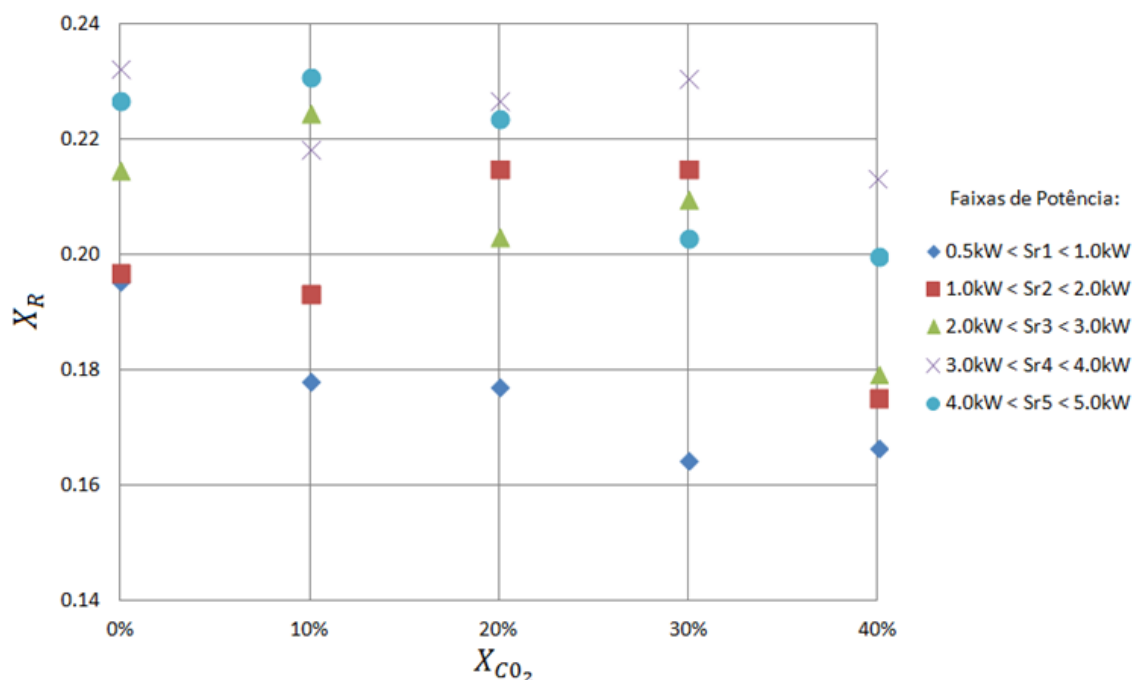


Figura 5.4: Variação da fração radiante de energia liberada com a diluição de gás natural com dióxido de carbono.

6. CONCLUSÕES

A medição do comprimento visível de chamas pela análise de fotografias instantâneas e de longa exposição apresentou boa concordância, sendo que a região de intermitência é mais facilmente identificada pelas fotografias de longa exposição.

Para as condições estudadas, o comprimento das chamas tem um comportamento crescente com o incremento da vazão volumétrica total de combustível e decai conforme aumento da diluição do gás natural com dióxido de carbono.

Confirmou-se a tendência de aumento do comprimento de chama adimensional com o número de Froude na potência $1/5$ ($Fr^{1/5}$) para chamas de gás natural diluídas com dióxido de carbono, controladas por empuxo.

A fração radiante da energia liberada apresenta comportamento crescente com o aumento do tempo de residência. Concluiu-se que, para chamas de gás natural com maior diluição de CO_2 , e conseqüentemente com menor poder calorífico, essa dependência não é tão significativa do que para chamas menos diluídas. Inferiu-se, também, que para maiores tempos de residência (chamas mais volumosas), as mesmas apresentam maior presença de fuligem, o que pode explicar a maior fração radiante.

A diluição do gás natural com dióxido de carbono aparenta ter um efeito de redução da fração radiante para chamas de mesmas faixas de potência.

Para trabalhos futuros, sugere-se usufruir da intercambialidade do queimador, para estudar influência do diâmetro de saída do combustível em características geométricas e radiantes das chamas. Ainda, sugere-se aumentar a faixa de vazão para analisar o efeito da diluição de combustível com inertes no descolamento e extinção de chamas. O aumento da faixa de vazão possibilita, também, estudar o efeito da diluição do gás natural com dióxido de carbono na transição do controle por empuxo para quantidade de movimento. Também, sugere-se estudar a diluição de outros tipos de combustíveis, a fim de ampliar a gama de resultados para combustíveis com diluentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abu-Gharbieh, R., Hamarneh, G., Gustavsson, T., and Kaminski, C.F.; **“Flame Front Tracking by Laser Induced Fluorescence Spectroscopy and Advanced Image Analysis”** Opt. Express, vol. 8, pp. 278-287, 2001.

ANSI, API Standard 521, ISO 23251; **“Pressure Relieving and Depressuring Systems”**, 5th Ed., 2007.

Bae J. R., Lee B. J., **“Effect of Diluents and Oxygen-Enrichness on the Stability of Nonpremixed Flames”**, In: Proc. KSME Spring Annual Meeting B, pp 2019–2024, 2002.

Baukal, C. E.; **“The John Zink Hamworthy Combustion Handbook – Volume 1: Fundamentals (Industrial Combustion)”**, 2nd Ed., 2012.

Becker, H. A., Liang, D.; **“Total Emission of Soot and Thermal Radiation by Free Turbulent Diffusion Flames”**, Combustion and Flame 44, pp 305–318, 1982.

Cho E. S., Chung S. H.; **“Characteristics of NO_x Emission with Flue Gas Dilution in Air and Fuel Sides”**, KSME Int. J., 2004.

Coelho, P., Costa, M.; **“Combustão”**, Edições Orion, 1^a Ed., 2007.

Delichatsios, M. A., Orloff, L.; **“Effects of Turbulence on Flame Radiation From Diffusion Flames”**, 1988.

Du D. X., Axelbaum R. L., Law C. K.; **“The Influence of Carbon Dioxide and Oxygen as Additives on Soot Formation in Diffusion Flames”**. In: Proceedings of 23rd International Symposium on Combustion; pp 1501–1507, 1990.

Feese, J. J., Turns, S. R.; **“Nitric Oxide Emission in Laminar Diffusion Flame: Effects of Airside Versus Fuel Side Diluents Addition”**, Combust. Flame, pp 66-78, 1998.

GasNet – O site do gás natural; **“Composição do Gás Natural Comercial”**, http://www.gasnet.com.br/gasnatural/gas_completo.asp#gas12. Acessado em 14/11/2014.

Glassman, I., Yetter, R. A.; **“Combustion”**, Elsevier, 4th Ed., 2008.

Golombok, M., Chewter, L; **“Centrifugal Separation for Cleaning Well GasStreams”** - Ind. Eng. Chem. Res., p 1734–1739, 2004.

Guigard, S. E., Kindzierski W. B., Harper N.; **“Heat Radiation From Flares”**, Report prepared for Science and Technology Branch, Alberta Environment, 2000.

Hankinson, G., Lowesmith, B. J.; **“A Consideration of Methods of Determining the Radiative Characteristics of Jet Fires”**, Combustion and Flame, 159, pp 1165-1177, 2011.

Hwang, C., Oh, C. B., Lee, C. E.; **“Effects of CO₂ Dilution on the Interactions of a CH₄-Air Nonpremixed Jet Flame with a Single Vortex”**, 2008.

Im, S. T. H. G., Atreya, A. A.; **“Computational Study of Spherical Diffusion Flames in Microgravity with Gas Radiation. Part II: Parametric Studies of the Diluent Effects on Flame Extinction”**, 2009.

Incropera, F.P., Dewitt, D.P., Bergman, T.L, Lavine, A.S.; **“Introduction to Heat Transfer”**, 6th Ed., John Wiley & Sons, 2008.

Kalghatgi, G. T.; **“Lift-off Heights and Visible Lengths of Vertical Turbulent Jet Diffusion Flames in Still Air”**, Combustion Science and Technology, 41: 1, 17 — 29, 1984.

Hu, L., Wang, Q., Delichatsios M., Lu, S., Tang, F.; **“Flame Radiation Fraction Behaviors of Sooty Buoyant Turbulent Jet Diffusion Flames in Reduced and Normal Atmospheric Pressures and a Global Correlation with Reynolds Number”**, Fuel 116, pp 781-786, 2013.

Lee C. E., Lee S. R., Han J. W., Park J.; **“Numerical Study on Effect of CO₂ in Flame Structure and NO_x Formation of CH₄–air Counterflow Diffusion Flame”**, Int. J. Energy Research 24, pp 2-12, 2000.

Liu H., Guo, H., Smallwood, G. J., Gulder, O. L.; **“The Chemical Effects of Carbon Dioxide as an Additive in an Ethylene Diffusion Flame: Implications for Soot and NO_x Formation”**, Combust. Flame 125, pp 778–787, 2001.

Markstein, G. H.; **“Relationship Between Smoke Point and Radiant Emission from Buoyant Turbulent and Laminar Diffusion Flames”**, Sym (Int) Combust, pp 1055-1061, 1985.

Ministério de Minas e Energia; **“Pré-Sal: Perguntas e Respostas”**, http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/noticias/2009/10_outubro/Cartilha_prx-sal.pdf. Acessado em 04/09/2014.

Mungal, M. G., O’Neil, J. M.; **“Visual Observations of a Turbulent Diffusion Flame”**, 1989.

Oh J., Noh D., **“The effect of CO₂ Addition on the Flame Behaviour of a Non-Premixed Oxy-Methane Jet in a Lab-Scale Furnace”**, 2013.

Park J., Bae D. S., Cha M. S., Yun J. H., Keel S. I., Cho H. C.; **“Flame Characteristics in H₂/CO synthetic gas diffusion flames diluted with CO₂: effects of radiative heat loss and mixture composition”**, Int J Hydrogen Energy, 33: pp 7256–7264, 2008.

Petrobras S.A.; **“Exploração e Produção de Petróleo e Gás: Pré-Sal”**, <http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal/>. Acessado em: 04/09/2014.

Peters, N.; **“Turbulent Combustion”**, Cambridge Monographs on Mechanics, 2004.

Peters, N., Williams, F. A.; **“Lift-off Characteristics of Turbulent Jet Diffusion Flames”**, AIAA Journal, vol. 21, pp. 423-429, 1983.

Poinsot, T., Veynante, D.; **“Theoretical and Numerical Combustion”**, Edward, 2nd Ed., 2005.

Qin W., Egolfopoulos, F. N., Tsotsis, T.T.; **“Fundamental and Environmental Aspects of Landfill Gas Utilization for Power Generation”**, Chem. Eng. J., pp 157–172, 2001.

Røkke, N.A., Hustad, J.E., Sønju, O.K, Williams, F.A.; **“Proc. Combust. Inst.”** 24 pp 385–393, 1992.

Saito, N., Ogawa, Y., Saso, Y., Liao, C., Sakei, R.; **“Flame-Extinguishing Concentrations and Peak Concentrations of N₂, Ar, CO₂ and Their Mixtures for Hydrocarbon Fuels”**, Fire Safety J. 27, pp 185–200, 1996.

Santos A., Costa M.; **“Reexamination of the Scaling Laws For NO_x Emissions from Hydrocarbon Turbulent Jet Diffusion Flames”**, Combust. Flame, pp 160–169, 2005;
Schefer, R.W., Houf, W.G., Williams, T.C., Bourne, B., Colton, J.; **“Int. J Hydrogen Energy 32”**, pp 2081-2093, 2007.

Sivathanu, Y. R.; Gore, J. P.; **“Total Radiative Heat Loss in Jet Flames from Single Point Radiative Flux Measurements”**, Combustion and Flame, vol 94, pp 265 – 270, 1993.

Turns, S. R.; **“An Introduction to Combustion”**, McGraw-Hill Higher Education, 2nd Ed., 2000.

Turns, S. R., Myhr, F. H.; **“Combust Flame 87”**, pp 319-335, 1991.

Zukoski, E. E., Cetegen, B. M., Kubota, T.; **“Visible Structure of Buoyant Diffusion Flames”**, 20th Int`l. Symp. on Comb., The Combustion Institute, Pitts., PA, pp 361-366, 1984.

APÊNDICE I

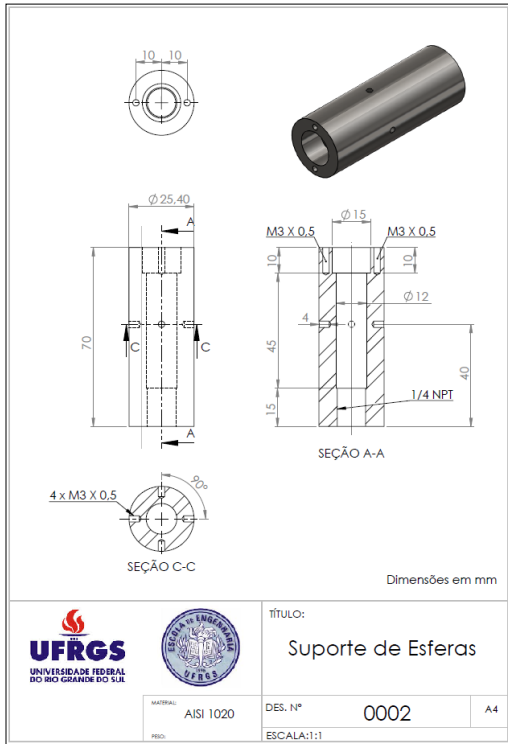


Figura I: Desenho e dimensões do suporte de esferas.

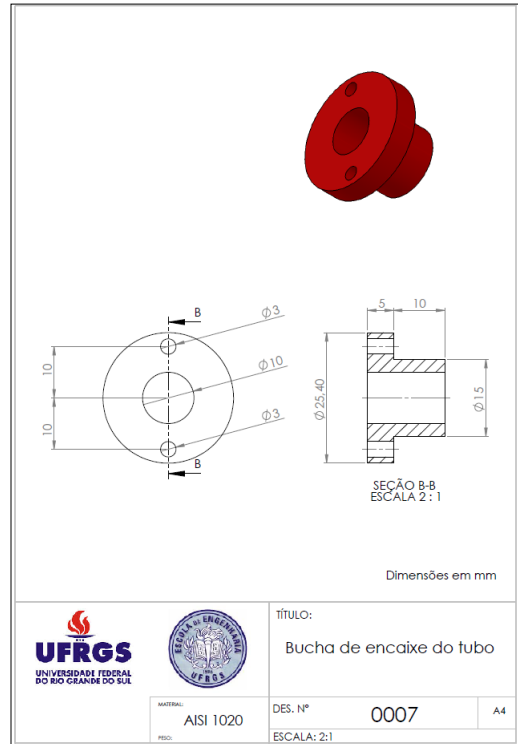


Figura II: Desenho e dimensões da bucha de encaixe do tubo

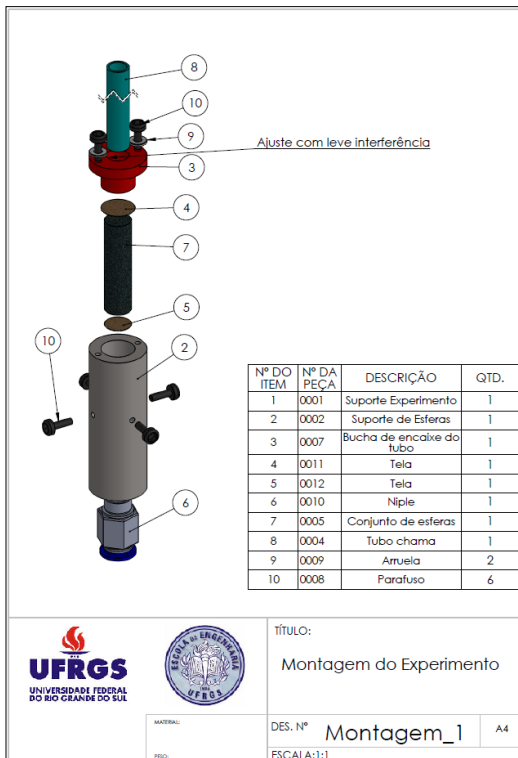


Figura III: Esquema representativo da montagem do queimador.

APÊNDICE II

A medição de vazão do gás natural foi feita utilizando-se o controlador digital calibrado para metano. O site da BRONKHORST permite obter o fator de correção informando a mistura utilizada. Já para a medição de vazão do dióxido de carbono, visto que o controlador utilizado é calibrado para outro gás, realizou-se o cálculo de conversão fornecido pelo fabricante, através de um fator de conversão, definido por:

$$C = \frac{c_{p1} \cdot \rho_1}{c_{p2} \cdot \rho_2} \quad (4.1)$$

onde, c_{p1} e ρ_1 são respectivamente o calor específico [kJ/kg.K] e a densidade [kg/m³] em condições normais do ar [kg/m³], c_{p2} e ρ_2 são respectivamente o calor específico [kJ/kg.K] e a densidade [kg/m³] em condições normais do dióxido de carbono.

Tabela I: Vazões corrigidas para cada chama e respectivas posições do sensor de radiação.

Chama	Vazão Total [sl/min]	Diluição [%]	Vazão CH4 Real [sl/min]	Vazão CO2 Real [sl/min]	Fator Conversão C [-]	Vazão CO2 Medidor de Ar [sl/min]	Dist. do Sensor à Chama (3*Lf) [cm]	Lf (observador "treinado") [cm]	Hr (a 1/2 Comp. de Chama) [cm]	Hr - Altura Bocal [cm]	Rf [cm]
A1	1	0	1	0	0.7804	0	54.8	18	60	8	55.4
A2	2	0	2	0	0.7804	0	81.9	27	64	12	82.8
A3	3	0	3	0	0.7804	0	113.3	38	67	15	114
A4	4	0	4	0	0.7804	0	130	45	69	17	131
A5	5	0	5	0	0.7804	0	150	51	71	19	151
A6	6	0	6	0	0.7804	0	168	56	73	21	169
A7	7	0	7	0	0.7804	0	178.5	60	87	35	182
A8	8	0	8	0	0.7804	0	193.8	65	90	38	197
A9	9	0	9	0	0.7804	0	208.8	69	93	41	213
A10	10	0	10	0	0.7804	0	221.5	74	95	43	226
B1	1	0.1	0.9	0.1	0.7804	0.128	55.8	18	61	9	56.5
B2	2	0.1	1.8	0.2	0.7804	0.256	80.5	26	65	13	81.5
B3	3	0.1	2.7	0.3	0.7804	0.384	93	31	67.5	15.5	94.3
B4	4	0.1	3.6	0.4	0.7804	0.513	110	37	70.5	18.5	112
B5	5	0.1	4.5	0.5	0.7804	0.641	126	42	73	21	128
B6	6	0.1	5.4	0.6	0.7804	0.769	135	45	74.5	22.5	137
B7	7	0.1	6.3	0.7	0.7804	0.897	138	46	75	23	140
B8	8	0.1	7.2	0.8	0.7804	1.025	159	53	78.5	26.5	161
B9	9	0.1	8.1	0.9	0.7804	1.153	168	56	80	28	170
B10	10	0.1	9	1	0.7804	1.281	174	58	81	29	176
C1	1	0.2	0.8	0.2	0.7804	0.256	43	14	59	7	43.6
C2	2	0.2	1.6	0.4	0.7804	0.513	63	21	62.5	10.5	63.9
C3	3	0.2	2.4	0.6	0.7804	0.769	93	31	67.5	15.5	94.3
C4	4	0.2	3.2	0.8	0.7804	1.025	102	34	69	17	103
C5	5	0.2	4	1	0.7804	1.281	114	38	71	19	116
C6	6	0.2	4.8	1.2	0.7804	1.538	123	41	72.5	20.5	125
C7	7	0.2	5.6	1.4	0.7804	1.794	129	43	73.5	21.5	131
C8	8	0.2	6.4	1.6	0.7804	2.050	144	48	76	24	146
C9	9	0.2	7.2	1.8	0.7804	2.307	168	56	80	28	170
C10	10	0.2	8	2	0.7804	2.563	162	54	79	27	164
D1	1	0.3	0.7	0.3	0.7804	0.384	39	13	58.5	6.5	39.5
D2	2	0.3	1.4	0.6	0.7804	0.769	57	19	61.5	9.5	57.8
D3	3	0.3	2.1	0.9	0.7804	1.153	78	26	65	13	79.1
D4	4	0.3	2.8	1.2	0.7804	1.538	96	32	68	16	97.3
D5	5	0.3	3.5	1.5	0.7804	1.922	105	35	69.5	17.5	106
D6	6	0.3	4.2	1.8	0.7804	2.307	117	39	71.5	19.5	119
D7	7	0.3	4.9	2.1	0.7804	2.691	126	42	73	21	128
D8	8	0.3	5.6	2.4	0.7804	3.075	138	46	75	23	140
D9	9	0.3	6.3	2.7	0.7804	3.460	153	51	77.5	25.5	155
D10	10	0.3	7	3	0.7804	3.844	150	50	77	25	152
E1	1	0.4	0.6	0.4	0.7804	0.513	33	11	57.5	5.5	33.5
E2	2	0.4	1.2	0.8	0.7804	1.025	51	17	60.5	8.5	51.7
E3	3	0.4	1.8	1.2	0.7804	1.538	69	23	63.5	11.5	70
E4	4	0.4	2.4	1.6	0.7804	2.050	93	31	67.5	15.5	94.3
E5	5	0.4	3	2	0.7804	2.563	102	34	69	17	103
E6	6	0.4	3.6	2.4	0.7804	3.075	108	36	70	18	109
E7	7	0.4	4.2	2.8	0.7804	3.588	117	39	71.5	19.5	119
E8	8	0.4	4.8	3.2	0.7804	4.100	126	42	73	21	128
E9	9	0.4	5.4	3.6	0.7804	4.613	132	44	74	22	134
E10	10	0.4	6	4	0.7804	5.126	150	50	77	25	152

APÊNDICE III

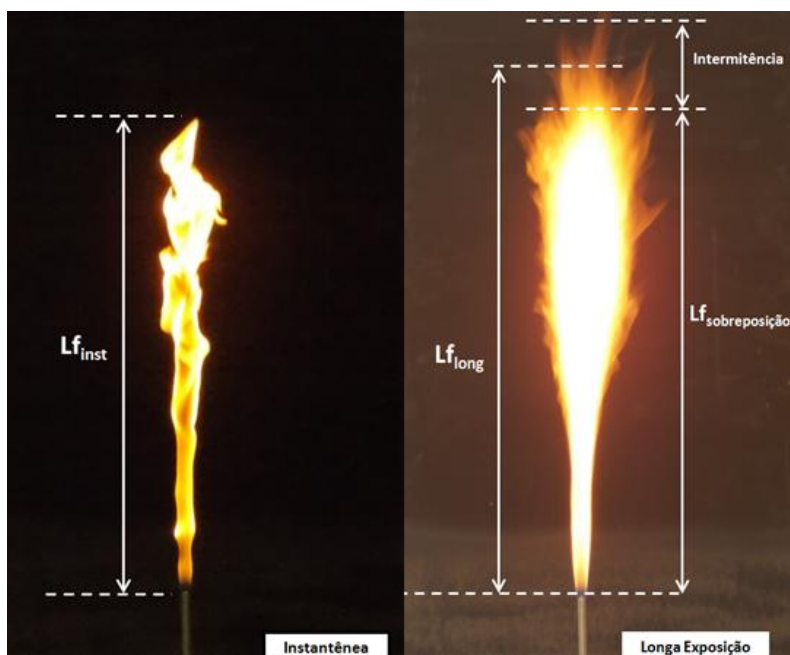


Figura 1: À esquerda, uma fotografia instantânea (tempo de exposição de 1/125 s) mostrando a definição do comprimento de chama e à direita, uma fotografia de longa exposição (tempo de exposição de 4 s) mostrando a definição de comprimento de sobreposição, intermitência e comprimento de chama.

Tabela I: Amostra de dados das chamas de gás natural puro. Distância entre câmera e queimador: 5 m; Altura da câmera em relação ao chão: 1,6 m; Altura do queimador em relação ao chão: 1 m; Tempo de exposição: 4 s; 1 pixel = 0,0005095 m.

		[pixel]	[pixel]	[pixel]	[pixel]	[pixel]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
Foto	Chama	Px Inf	Px Sup (Sobrep)	Px Sup (Max)	Dif (Inf-Sobrep)	Dif (Inf-Max)	Comp (Sobrep)	Comp (Total)	Intermitência	Comp (Efetivo)	Média Comp (Sobrep)	Média Comp (Total)	Média (Intermitência)	Média Comp (Efetivo)
DSCN0190	A1	2470	2014	2000	456	470	23.23	23.94	0.36	23.59				
DSCN0191	A1	2470	2066	1994	404	476	20.58	24.25	1.83	22.42	20.99	23.21	1.11	22.10
DSCN0192	A1	2470	2094	2049	376	421	19.16	21.45	1.15	20.30				
DSCN0193	A2	2470	1888	1724	582	746	29.65	38.01	4.18	33.83				
DSCN0194	A2	2470	1900	1779	570	691	29.04	35.20	3.08	32.12	29.96	36.83	3.44	33.39
DSCN0195	A2	2470	1858	1738	612	732	31.18	37.29	3.06	34.24				
DSCN0196	A3	2470	1814	1680	656	790	33.42	40.25	3.41	36.83				
DSCN0198	A3	2470	1820	1632	650	838	33.11	42.69	4.79	37.90	33.81	41.40	3.80	37.61
DSCN0199	A3	2470	1785	1660	685	810	34.90	41.27	3.18	38.08				
DSCN0200	A4	2470	1671	1476	799	994	40.71	50.64	4.97	45.67				
DSCN0201	A4	2470	1765	1630	705	840	35.92	42.79	3.44	39.36	37.65	45.88	4.12	41.77
DSCN0202	A4	2470	1757	1602	713	868	36.32	44.22	3.95	40.27				
DSCN0203	A5	2470	1710	1566	760	904	38.72	46.05	3.67	42.39				
DSCN0204	A5	2470	1670	1475	800	995	40.76	50.69	4.97	45.72	41.52	50.86	4.67	46.19
DSCN0205	A5	2470	1585	1374	885	1096	45.09	55.84	5.37	50.46				
DSCN0206	A6	2470	1525	1368	945	1102	48.14	56.14	4.00	52.14				
DSCN0207	A6	2470	1562	1444	908	1026	46.26	52.27	3.01	49.26	45.94	55.14	4.60	50.54
DSCN0208	A6	2470	1618	1351	852	1119	43.41	57.01	6.80	50.21				
DSCN0209	A7	2470	1500	1334	970	1136	49.42	57.87	4.23	53.65				
DSCN0210	A7	2470	1522	1340	948	1130	48.30	57.57	4.64	52.93	49.04	58.93	4.94	53.99
DSCN0211	A7	2470	1500	1266	970	1204	49.42	61.34	5.96	55.38				
DSCN0212	A8	2470	1401	1200	1069	1270	54.46	64.70	5.12	59.58				
DSCN0213	A8	2470	1388	1236	1082	1234	55.12	62.87	3.87	58.99	56.84	65.91	4.53	61.37
DSCN0214	A8	2470	1274	1093	1196	1377	60.93	70.15	4.61	65.54				
DSCN0215	A9	2470	1381	1099	1089	1371	55.48	69.85	7.18	62.66				
DSCN0216	A9	2470	1330	1095	1140	1375	58.08	70.05	5.99	64.06	57.55	70.15	6.30	63.85
DSCN0217	A9	2470	1310	1085	1160	1385	59.10	70.56	5.73	64.83				
DSCN0218	A10	2470	1250	1030	1220	1440	62.15	73.36	5.60	67.76				
DSCN0219	A10	2470	1332	1095	1138	1375	57.98	70.05	6.04	64.01	60.08	72.75	6.33	66.42
DSCN0220	A10	2470	1290	1001	1180	1469	60.12	74.84	7.36	67.48				

APÊNDICE IV

Tabela I: Cálculo da fração radiante para cada chama.

Chama	Medida (mV)	qr (kW/m ²)	Rf (m)	QR (kW)	Vazão Mássica (kg/s)	H (kJ/kg)	QT (kW)	Xr [-]
A1	3.01E-05	2.56E-02	5.54E-01	9.88E-02	1.11E-05	4.56E+04	5.05E-01	1.95E-01
A2	2.72E-05	2.31E-02	8.28E-01	1.99E-01	2.22E-05	4.56E+04	1.01E+00	1.97E-01
A3	2.10E-05	1.79E-02	1.14E+00	2.93E-01	3.33E-05	4.56E+04	1.52E+00	1.93E-01
A4	2.37E-05	2.01E-02	1.31E+00	4.34E-01	4.43E-05	4.56E+04	2.02E+00	2.15E-01
A5	2.32E-05	1.98E-02	1.51E+00	5.67E-01	5.54E-05	4.56E+04	2.53E+00	2.25E-01
A6	2.30E-05	1.96E-02	1.69E+00	7.04E-01	6.65E-05	4.56E+04	3.03E+00	2.32E-01
A7	2.19E-05	1.86E-02	1.82E+00	7.73E-01	7.76E-05	4.56E+04	3.54E+00	2.18E-01
A8	2.20E-05	1.87E-02	1.97E+00	9.17E-01	8.87E-05	4.56E+04	4.04E+00	2.27E-01
A9	2.17E-05	1.85E-02	2.13E+00	1.05E+00	9.98E-05	4.56E+04	4.55E+00	2.31E-01
A10	2.08E-05	1.77E-02	2.26E+00	1.13E+00	1.11E-04	4.56E+04	5.05E+00	2.24E-01
B1	2.37E-05	2.02E-02	5.65E-01	8.10E-02	9.98E-06	4.56E+04	4.55E-01	1.78E-01
B2	2.27E-05	1.93E-02	8.15E-01	1.61E-01	2.00E-05	4.56E+04	9.10E-01	1.77E-01
B3	2.52E-05	2.14E-02	9.43E-01	2.39E-01	2.99E-05	4.56E+04	1.36E+00	1.75E-01
B4	2.61E-05	2.22E-02	1.12E+00	3.47E-01	3.99E-05	4.56E+04	1.82E+00	1.91E-01
B5	2.65E-05	2.25E-02	1.28E+00	4.62E-01	4.99E-05	4.56E+04	2.27E+00	2.03E-01
B6	2.86E-05	2.43E-02	1.37E+00	5.72E-01	5.99E-05	4.56E+04	2.73E+00	2.10E-01
B7	3.25E-05	2.76E-02	1.40E+00	6.80E-01	6.98E-05	4.56E+04	3.18E+00	2.13E-01
B8	2.58E-05	2.19E-02	1.61E+00	7.15E-01	7.98E-05	4.56E+04	3.64E+00	1.97E-01
B9	2.68E-05	2.28E-02	1.70E+00	8.31E-01	8.98E-05	4.56E+04	4.09E+00	2.03E-01
B10	2.73E-05	2.32E-02	1.76E+00	9.09E-01	9.98E-05	4.56E+04	4.55E+00	2.00E-01
C1	3.28E-05	2.79E-02	4.36E-01	6.65E-02	8.87E-06	4.56E+04	4.04E-01	1.64E-01
C2	3.09E-05	2.63E-02	6.39E-01	1.35E-01	1.77E-05	4.56E+04	8.09E-01	1.67E-01
C3	2.14E-05	1.82E-02	9.43E-01	2.04E-01	2.66E-05	4.56E+04	1.21E+00	1.68E-01
C4	2.34E-05	1.99E-02	1.03E+00	2.67E-01	3.55E-05	4.56E+04	1.62E+00	1.65E-01
C5	2.54E-05	2.16E-02	1.16E+00	3.63E-01	4.43E-05	4.56E+04	2.02E+00	1.79E-01
C6	2.74E-05	2.33E-02	1.25E+00	4.56E-01	5.32E-05	4.56E+04	2.43E+00	1.88E-01
C7	2.94E-05	2.50E-02	1.31E+00	5.37E-01	6.21E-05	4.56E+04	2.83E+00	1.90E-01
C8	2.62E-05	2.22E-02	1.46E+00	5.96E-01	7.10E-05	4.56E+04	3.24E+00	1.84E-01
C9	2.28E-05	1.94E-02	1.70E+00	7.05E-01	7.98E-05	4.56E+04	3.64E+00	1.94E-01
C10	2.58E-05	2.19E-02	1.64E+00	7.43E-01	8.87E-05	4.56E+04	4.04E+00	1.84E-01
D1	3.37E-05	2.87E-02	3.95E-01	5.63E-02	7.76E-06	4.56E+04	3.54E-01	1.59E-01
D2	3.19E-05	2.71E-02	5.78E-01	1.14E-01	1.55E-05	4.56E+04	7.08E-01	1.61E-01
D3	2.52E-05	2.14E-02	7.91E-01	1.68E-01	2.33E-05	4.56E+04	1.06E+00	1.59E-01
D4	2.27E-05	1.93E-02	9.73E-01	2.29E-01	3.10E-05	4.56E+04	1.42E+00	1.62E-01
D5	2.40E-05	2.04E-02	1.06E+00	2.91E-01	3.88E-05	4.56E+04	1.77E+00	1.64E-01
D6	2.60E-05	2.21E-02	1.19E+00	3.90E-01	4.66E-05	4.56E+04	2.12E+00	1.84E-01
D7	2.58E-05	2.20E-02	1.28E+00	4.50E-01	5.43E-05	4.56E+04	2.48E+00	1.82E-01
D8	2.45E-05	2.08E-02	1.40E+00	5.12E-01	6.21E-05	4.56E+04	2.83E+00	1.81E-01
D9	2.21E-05	1.88E-02	1.55E+00	5.69E-01	6.98E-05	4.56E+04	3.18E+00	1.79E-01
D10	2.43E-05	2.07E-02	1.52E+00	6.00E-01	7.76E-05	4.56E+04	3.54E+00	1.70E-01
E1	3.82E-05	3.25E-02	3.35E-01	4.57E-02	6.65E-06	4.56E+04	3.03E-01	1.51E-01
E2	3.15E-05	2.68E-02	5.17E-01	9.01E-02	1.33E-05	4.56E+04	6.07E-01	1.49E-01
E3	2.74E-05	2.33E-02	7.00E-01	1.43E-01	2.00E-05	4.56E+04	9.10E-01	1.58E-01
E4	1.91E-05	1.63E-02	9.43E-01	1.82E-01	2.66E-05	4.56E+04	1.21E+00	1.50E-01
E5	2.17E-05	1.84E-02	1.03E+00	2.48E-01	3.33E-05	4.56E+04	1.52E+00	1.63E-01
E6	2.29E-05	1.95E-02	1.09E+00	2.93E-01	3.99E-05	4.56E+04	1.82E+00	1.61E-01
E7	2.38E-05	2.02E-02	1.19E+00	3.57E-01	4.66E-05	4.56E+04	2.12E+00	1.68E-01
E8	2.34E-05	1.99E-02	1.28E+00	4.07E-01	5.32E-05	4.56E+04	2.43E+00	1.68E-01
E9	2.37E-05	2.01E-02	1.34E+00	4.53E-01	5.99E-05	4.56E+04	2.73E+00	1.66E-01
E10	2.05E-05	1.75E-02	1.52E+00	5.07E-01	6.65E-05	4.56E+04	3.03E+00	1.67E-01

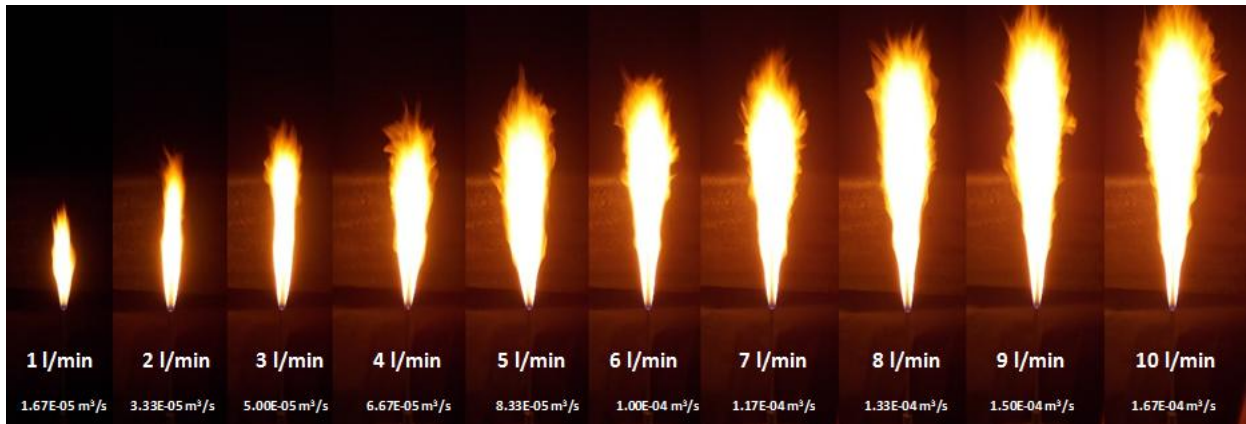


Figura I: Aspecto visual característico para sequência de fotografias de gás natural puro com incremento da vazão volumétrica total de 1 l/min a 10 l/min.

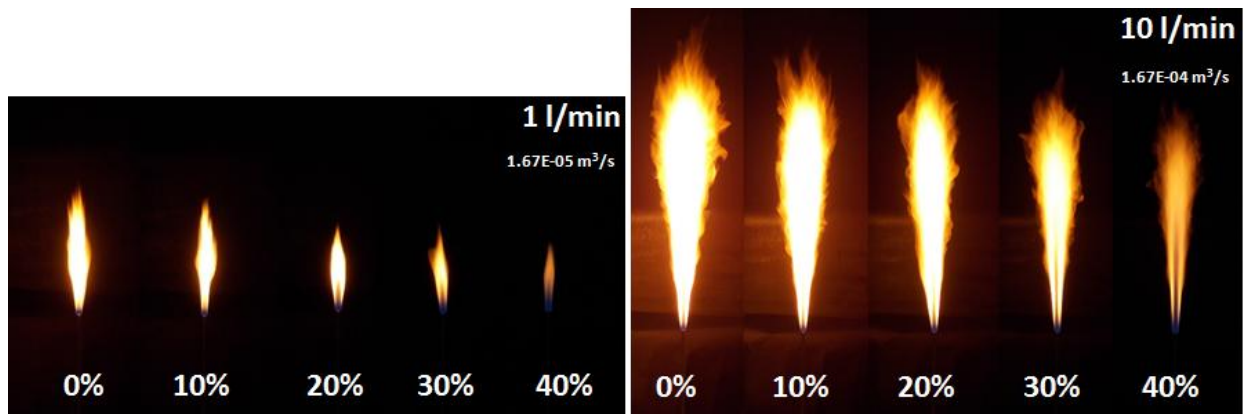


Figura II: Aspectos visuais característicos para vazões volumétricas totais fixas e incremento da diluição do gás natural com CO₂. À esquerda, vazão volumétrica de 1 l/min e, à direita, vazão volumétrica de 10 l/min.

ANEXO I

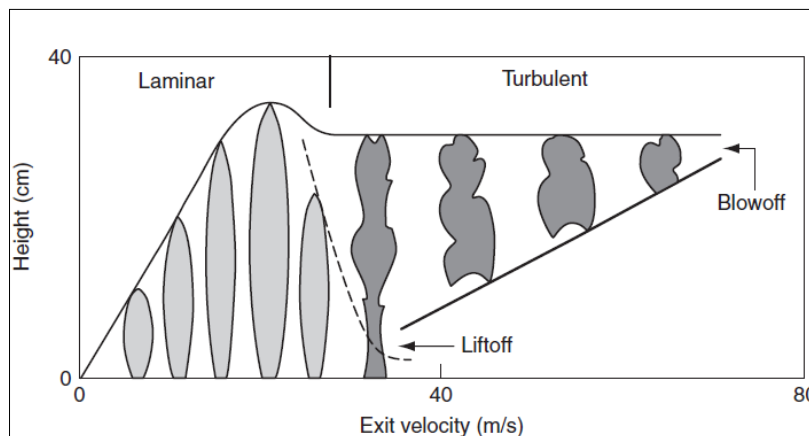


Figura I: Variação da altura de uma chama de difusão, altura de descolamento e extinção em função da velocidade de saída do combustível [Adaptado de Glassman, 2008].