

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

ESTUDO DA ESTABILIDADE DE CHAMAS DE DIFUSÃO PRODUZIDAS POR
COMBUSTÍVEIS DE BAIXO PODER CALORÍFICO

por

Tayron Zilli Stapasolla

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, junho de 2013

ESTUDO EXPERIMENTAL DA ESTABILIDADE DE CHAMAS DE DIFUSÃO PRODUZIDAS
POR COMBUSTÍVEIS DE BAIXO PODER CALORÍFICO

por

Tayron Zilli Stapasolla

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: **Ciências Térmicas**

Orientador: Prof. Dr. Nattan Roberto Caetano

Comissão de Avaliação:

Prof. Luiz Alberto Oliveira Rocha

Prof. Letícia Rodrigues

Prof. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 21 de junho de 2013.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Vladimir e Anarli, por estarem presentes em todos os momentos da minha vida, me incentivando a lutar pelos meus objetivos.

Ao meu orientador, prof. Dr. Nattan Roberto Caetano, pelo interesse e dedicação prestados, estando bastante presente na realização deste trabalho.

Ao prof. Dr. Fernando Pereira, por sugerir o tema do trabalho juntamente com meu orientador e ajudar no esclarecimento de dúvidas técnicas.

STAPASOLLA, T. Z. **Estudo da Estabilidade de Chamas de Difusão Produzidas por Combustíveis de Baixo poder Calorífico**. 2013. 25. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

RESUMO

Os mecanismos referentes à estabilização de chamas de difusão são objeto de diversos estudos contidos na literatura nas últimas décadas. A busca de soluções para a obtenção de uma combustão adequada para cada aplicação está associada à redução do impacto ambiental decorrente deste processo. Desta forma, a utilização do gás natural como combustível, por exemplo, está associada à produção de petróleo. O controle das chamas nos queimadores de rejeito é imprescindível para que haja controle no processo de combustão, visando garantir a segurança em plataformas e refinarias. Para tanto, foi realizado um estudo experimental, a fim de analisar as regiões e características de estabilidade de chamas de difusão. Neste estudo, foi utilizado um queimador com escoamento externo de ar, nos moldes da configuração proposta por Burke e Schumann. Este queimador, representativo de aplicações industriais, é capaz de estabilizar diversos regimes de combustão. Assim sendo, os fenômenos de descolamento, extinção e reatamento de chama foram ponderados. A adição de gás carbônico ao gás natural veicular permitiu estudar a influência da diluição do combustível, a partir de um inerte, na estabilidade da chama. Desta forma, por meio destas misturas sintéticas, é possível avaliar a estabilidade de combustíveis de baixo poder calorífico. A análise dos resultados possibilitou concluir que o aumento da diluição com gás carbônico produziu chamas de menor altura e com menor quantidade de fuligem. Entretanto, a altura de levantamento não foi prejudicada de maneira significativa. Além disso, o aumento da diluição resultou em limites de descolamento e extinção menores, enquanto o limite de reatamento não apresentou alterações relevantes. Todavia, as chamas de misturas com níveis elevados de gás carbônico se mostraram incapazes de reatar ao queimador. Os resultados obtidos neste trabalho servem como base para trabalhos futuros que ampliem a escala da montagem experimental de forma a equiparar às aplicações industriais.

PALAVRAS-CHAVE: (Estabilidade de chama, descolamento de chama, extinção de chama, diluição de combustível, chama de difusão)

STAPASOLLA, T. Z. **Study of Diffusion Flames Stability Produced by Low Calorific Fuels.** 2013. 25. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ABSTRACT

The mechanisms related to diffusion flames stabilization have been subject of several studies within the last decades. The search for solutions to obtain optimum combustion for each application is associated with the reduction of the environmental impact caused by this process. Thus, the use of natural gas as fuel, for example, is associated with oil production. The flame control in flares is indispensable for combustion process optimization, in order to enhance security in platforms and refineries. For such, an experimental study was performed to examine the flame stability regions and its characteristics. In this study, a burner with external air coflow, similar to that proposed by Burke and Schumann was used. This burner, representative of industrial applications, is capable of stabilizing several combustion regimes. Therefore, flame lift-off, flame blowout and flame reattachment behaviors were considered. The addition of carbon dioxide in natural gas vehicular allowed to study the influence produced by fuel dilution in flame stability. Thus, from these synthetic mixtures, it is possible to evaluate the stability of low calorific fuels. Results analysis allowed to conclude that the increase of dilution by adding carbon dioxide led to lower flame heights and less soot formation. However, the lift-off height was not affected significantly. Furthermore, the increase in carbon dioxide percentage led to lower lift-off and blowout limits, even though the reattachment behavior didn't show relevant changes. However, high concentrations of carbon dioxide produced flames which have not been able to reattach to the burner nozzle. Results obtained from this study serve as the basis for future works including scale enlargement of experimental setup, in order to equate to industrial applications.

KEYWORDS: (Flame stability, flame lift-off, flame blowout, fuel dilution, diffusion flame)

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	1
2.1. TIPOS DE CHAMA	2
2.2. ESTABILIDADE DE CHAMA.....	2
2.3. DESCOLAMENTO, EXTIÇÃO E REATAMENTO DE CHAMA	2
2.4. ALTURA VISÍVEL DE CHAMA.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
4. MATERIAIS E MÉTODOS	5
4.1. BANCADA DE TESTES.....	5
4.1.1. QUEIMADOR.....	5
4.1.2. ALIMENTAÇÃO DE GASES	6
4.1.3. SISTEMA DE MEDIÇÃO DE VAZÃO.....	6
4.1.4. SISTEMA DE CAPTURA DE IMAGENS	6
4.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	7
4.2.1. ALTURAS DE CHAMA E DESCOLAMENTO.....	7
4.2.2. MAPA DE ESTABILIDADE.....	7
5. RESULTADOS	7
5.1. ALTURA DE CHAMA E DESCOLAMENTO	7
5.2. MAPA DE ESTABILIDADE	10
5.3. CARACTERÍSTICAS DAS CHAMAS	12
6. CONCLUSÕES.....	13
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	14
ANEXO I	16
ANEXO II.....	16
APÊNDICE I.....	17
APÊNDICE II.....	18

1. INTRODUÇÃO

A poluição do meio ambiente no cenário atual, ocasionada pela emissão de gases causadores do efeito estufa e pela emissão de partículas provenientes da combustão, impõe a busca pela otimização dos processos industriais envolvidos neste panorama. A maioria das aplicações industriais que utilizam combustão no processo de produção de energia se baseiam na configuração de chama governada pela difusão, de forma análoga aos queimadores de rejeito, frequentemente encontrados em plataformas e refinarias de petróleo.

O gás natural (GN) e o gás carbônico (CO_2) são os principais dentre os gases provenientes do processo de extração de petróleo. O gás carbônico se mostra presente principalmente no contexto atual, no que diz respeito à exploração de petróleo a partir de poços situados na camada do pré-sal. A Petrobras, como principal produtora de petróleo do país, afirma estar procurando meios de separar o CO_2 do GN extraído dos poços de petróleo do pré-sal. Porém, a própria Petrobras está investindo em tecnologias e conhecimento acerca deste gás natural proveniente do pré-sal, enquanto não há métodos viáveis para tal separação.

Conforme o IPCC (Painel Intergovernamental para as Mudanças Climáticas, estabelecido pela Organização das Nações Unidas em conjunto com a Organização Meteorológica Mundial em 1988), a principal causa do aquecimento global é devida à emissão dos gases causadores do efeito estufa que cresce em conjunto com o avanço tecnológico, o qual depende de energia. Em 1997, foi assinado o Protocolo de Kyoto, que introduz metas para a redução da emissão destes gases. Assim, é necessário estabelecer um destino adequado para o GN e o CO_2 extraídos dos poços de petróleo para que não sejam lançados na atmosfera. Os gases nocivos ao ambiente e aos humanos, como no caso do metano, são convertidos pelas reações que ocorrem durante a combustão, visto que o produto da combustão é menos severo ao meio ambiente que o próprio reagente. Embora a tecnologia atual permita grande proveito do gás natural, o procedimento de queima deste gás é inerente à produção de petróleo. Segundo a Petrobras, a queima do GN em conjunto com outros gases provenientes da extração e refino é devida às necessidades operacionais e razões de segurança. Porém, a combustão em larga escala gera chamas de grande porte, sendo necessário estabilizá-las para evitar possíveis acidentes.

O presente trabalho apresenta um estudo sobre o comportamento de chamas de difusão, desde o fenômeno de descolamento até a extinção, frente a diferentes concentrações de CO_2 dissolvidos no gás natural veicular (GNV). Os fenômenos de levantamento e extinção de chama ainda não são plenamente compreendidos, embora a estabilidade de chama tenha sido alvo de muitos estudos [Vanquickenborne e van Tiggelen, 1965, Kalghatgi, 1981, Peters e Williams, 1983, Ghosal e Vervisch, 2001]. Portanto, este estudo relaciona a variação de altura visível de chama perante a alteração da vazão dos reagentes para diversas combinações de combustível/diluyente. Além disso, é apresentado um mapa de estabilidade, identificando as regiões nas quais a chama permanece estável, bem como onde ocorrem os fenômenos de levantamento, extinção e reatamento de chama. O resultado é baseado na determinação de uma faixa de operação em que os reagentes atuam dentro do limite de inflamabilidade, que pode ser utilizado para otimizar o processo de combustão.

Os resultados contribuem para a formação de uma base de dados de estabilidade de chama, a fim de disponibilizar informações para o desenvolvimento de projetos de sistemas de combustão. A validação destes, em escala de operação, é de grande importância para o projeto de queimadores de rejeito, visando o controle operacional da combustão em escala industrial. A otimização da segurança em refinarias e plataformas de petróleo depende intrinsecamente deste controle.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo objetiva expor conceitos básicos utilizados no presente estudo, a fim de favorecer a compreensão sobre a forma com que os experimentos foram realizados e os resultados foram obtidos.

2.1. TIPOS DE CHAMA

Duas classificações podem ser designadas para subdividir os tipos de chamas encontradas em aplicações de nível doméstico e industrial, a saber: chamas de pré-mistura e chamas não pré-misturadas (ou de difusão). Nas chamas de pré-mistura, a mistura entre o combustível e o oxidante é concretizada de forma homogênea antes da ignição. Por outro lado, nas chamas não pré-misturadas o combustível é lançado ao meio oxidante, onde a ignição ocorre simultaneamente com a mistura. O presente estudo aborda apenas chamas não pré-misturadas.

Chamas não pré-misturadas são dominadas, predominantemente, pelo processo de mistura que ocorre de forma relativamente lenta em relação aos processos químicos. Desta forma, a taxa de reação é determinada pela taxa de difusão. A riqueza da mistura varia da linha central da chama até seu exterior, identificando as regiões rica e pobre da reação, respectivamente [Coelho e Costa, 2007]. Além disso, podem ser classificadas como laminares ou turbulentas de acordo com o comportamento em relação à velocidade de escoamento.

A estrutura de uma chama laminar é invariável perante o tempo, ou seja, é estacionária. Neste tipo de chama, o mecanismo predominante no processo de combustão é a difusão molecular. Chamas turbulentas, por sua vez, apresentam variações instantâneas entre concentrações, velocidades e temperaturas em diferentes locais da chama, as quais comprometem o caráter estacionário [Turns, 2000]. A turbulência promove o aumento da taxa de mistura, que por sua vez, aumenta a taxa de difusão e, conseqüentemente, eleva a taxa de reação.

2.2. ESTABILIDADE DE CHAMA

Para manter a eficiência do equipamento e a segurança é fundamental que a chama utilizada esteja estabilizada. No que diz respeito às chamas turbulentas, é possível melhorar a estabilização da chama criando zonas de recirculação, onde parte do produto da combustão é levada novamente à zona de reação. Isto aumenta a temperatura da mistura, favorecendo a combustão. Contudo, existem outras maneiras de estabilizar uma chama turbulenta, a saber: os reagentes podem ser pré-aquecidos ou uma chama piloto pode ser utilizada na região de saída do jato [Coelho e Costa, 2007].

O queimador de corpo rombudo, por exemplo, cria uma região de esteira entre o jato de combustível e o escoamento de ar coaxial. Isto origina turbilhões que promovem a mistura dos reagentes, o que beneficia a difusão e, portanto, a estabilidade da chama [Caetano, 2012]. Existem, também, outros métodos para ajudar a estabilizar a chama, a saber: uso de escoamentos de combustível e de ar em direções opostas e/ou emprego da recirculação dos produtos da combustão [Turns, 2000]. Embora estes métodos sejam amplamente utilizados em aplicações industriais, o presente estudo considera um queimador com fluxo de ar axial, externo ao jato de combustível, conforme proposto no estudo de Burke e Schumann, 1928 (vide seção 4.1.1.).

2.3. DESCOLAMENTO, EXTIÇÃO E REATAMENTO DE CHAMA

Segundo Turns, 2000, a altura de chama aumenta em conjunto com a vazão de combustível. Desta forma, há uma vazão crítica para a qual a base da chama de difusão descola da base do queimador (figura 2.1a). Assim, a altura de levantamento aumenta até atingir um valor crítico para o qual a chama se extingue (figura 2.1a). Estes dois efeitos podem ser chamados de descolamento e extinção de chama, respectivamente. Na maioria dos casos, com o aumento das vazões, o escoamento atinge o regime de turbulência antes que a chama levante, ou ligeiramente depois [Ghosal e Vervisch, 2001].

A velocidade de escoamento para a qual uma chama levantada reata ao bocal do queimador é inferior à velocidade de descolamento de chama. Desta forma, o fenômeno de

histerese é caracterizado pela diferença entre estas velocidades. A figura 2.1 mostra os eventos descritos acima.

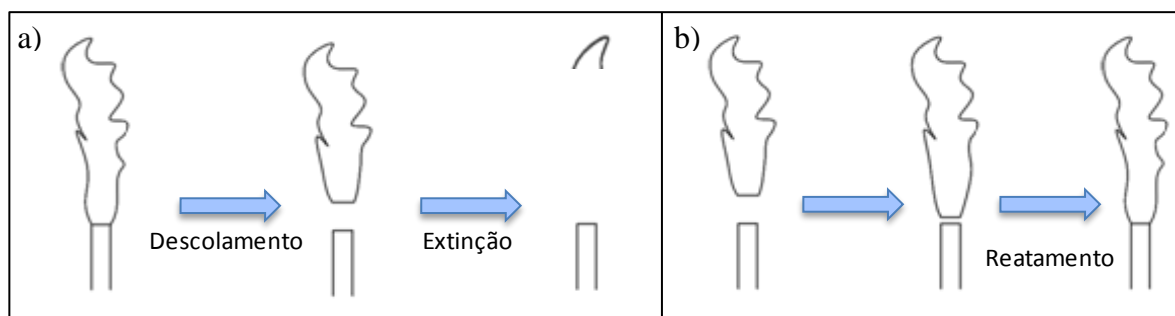


Figura 2.1 – Esquematização dos fenômenos de descolamento, extinção, e reatamento para uma chama turbulenta.

2.4. ALTURA VISÍVEL DE CHAMA

O comprimento de uma chama de difusão pode ser definido como a distância entre o bocal do queimador e o ponto mais alto na linha central onde a temperatura é máxima e a fração de mistura média é equivalente à fração de mistura estequiométrica [Coelho e Costa, 2007]. Turns, 2000, afirma que o comprimento visível de chama retorna valores maiores do que os comprimentos de chama medidos por técnicas mais aprimoradas. Para a primeira abordagem, o valor de chama visível é estimado entre 65% e 80% do valor medido [Coelho e Costa, 2007].

A posição da frente de chama pode ser medida de maneira confiável pela técnica de Fluorescência Induzida por Plano de Luz Laser (PLIF). Barreta et al., 2008, afirma que a hidroxila (OH) atinge a concentração máxima onde há maior taxa de reação química, podendo ser utilizada para mapear a região de estequiometria. A técnica PLIF permite capturar a fluorescência emitida por estes radicais químicos provenientes da reação, de forma a localizar a frente de chama. Porém, esta técnica exige equipamentos altamente sofisticados. Desta forma, o presente estudo se limita a realizar medições do comprimento visível de chama.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Estudos detalhados sobre estabilidade de chamas de difusão podem ser encontrados na literatura [Vanquickenborne e van Tiggelen, 1965, Kalghatgi, 1981, Peters e Williams, 1988]. Porém, a maioria faz referência à jatos de chama liberados ao ar ambiente, isto é, sem o escoamento coaxial de ar. Por outro lado, Burke e Schumann, 1928, estudaram chamas de difusão em um queimador com escoamento de ar coaxial ao jato central de metano. Foram propostas correlações entre vazão e a altura de chama laminar. Desta forma, concluíram que a altura da chama não é afetada pelos diâmetros do bocal ou do túnel de vento se as velocidades de escoamento permanecerem constantes. Complementando os testes, adicionaram um gás inerte (N_2) juntamente ao metano. Foi constatado que uma mistura composta por 50% de CH_4 e 50% de N_2 provocou a diminuição da altura de chama. Além disto, verificaram que o pré-aquecimento dos reagentes não apresentou grande influência nas alturas de chama estudadas.

Há uma velocidade de escoamento limite para a qual uma chama de difusão descola do bocal do queimador. Vanquickenborne e Van Tiggelen, 1965, estudaram chamas levantadas relacionando velocidade de escoamento para vários diâmetros de queimador. Foi observado que entre a saída do queimador e a base da chama levantada há uma região de pré-mistura total. Consolidando os trabalhos, sugeriram que a estabilização da chama se dá quando a velocidade média axial se iguala à velocidade de propagação de uma chama turbulenta de pré-mistura.

Janicka e Peters, 1982, com base em formulações matemáticas da equação de transporte, utilizaram a função densidade de probabilidade para prever as alturas de descolamento em uma chama turbulenta. Foram obtidos bons resultados para pequenas alturas em uma chama de metano e certa discrepância para alturas maiores de levantamento, quando em comparação com os resultados experimentais. As alturas de levantamento encontradas por meio das formulações matemáticas são inferiores, devido ao fato do fluxo turbulento não obter homogeneidade. Jacinka e Peters, 1982, constataram que o aumento da velocidade do escoamento provoca uma alteração gradual na cor da chama próxima ao bocal. O caráter amarelado da chama nesta região, atribuído à presença de fuligem, foi tomado pela cor azul, proveniente da emissão espontânea produzida a partir da quimioluminescência dos radicais formados após a reação. Isto indica que o tempo de permanência local do combustível é muito pequeno para permitir a formação de partículas de fuligem a partir da aglomeração das moléculas de carbono.

Em contraste com a teoria de Vanquickenborne e Van Tiggelen, 1965, Peters e Williams, 1983, contestaram que o grau de mistura molecular em jatos turbulentos com simetria axial não é suficiente para que haja uma região de pré-mistura total. Assim, argumentaram que na região de descolamento há uma região de pré-mistura parcial e que este percentual de pré-mistura deve ser considerado. Com base no modelo de elemento de chama laminar, afirmaram que esses elementos se extinguem onde os gradientes de concentração induzidos pela turbulência são suficientes para extinguir a combustão.

Kalghatgi, 1984, com base na teoria de Vanquickenborne e Van Tiggelen, 1965, propôs uma correlação para prever a altura de chama levantada de hidrocarbonetos em ar e concluiu que: (i) a altura de chama aumenta com o aumento da velocidade do fluxo, (ii) a altura de chama é independente do diâmetro do bocal para uma determinada velocidade, (iii) a altura de chama é inversamente proporcional ao quadrado da velocidade máxima de propagação de chama laminar.

Há outra teoria de estabilização que considera a formação de uma chama tripla na extremidade da base da chama levantada. A chama formada pela mistura completa é situada no centro enquanto que outros dois elementos de chama são encontrados, nos lados rico e pobre da mistura. Ghosal e Vervisch, 2001, afirmaram que a chama tripla acontece onde a combustão ocorre em um regime parcialmente pré-misturado. Segundo Chang e Chao, 2011, o levantamento de chama para jatos turbulentos difusivos é induzido pela extinção local de elementos de chama, resultante do espalhamento excessivo da chama no campo de escoamento não pré-misturado. Wyzgolik e Baillot, 2007, verificaram que o escoamento de ar que é arrastado para a zona de combustível induz um isolamento térmico entre a base da chama e o bocal.

Vanquickenborne e van Tiggelen, 1965, mostraram que a extinção de chama ocorre para alturas onde a mistura ar/combustível é demasiadamente pobre para manter a combustão. Broadwell e Dahm, 1985, demonstraram que a estabilização da chama ocorre quando os gases expelidos da fronteira do jato são arrastados novamente para a região de combustão. Isto aumenta a temperatura e auxilia na combustão da parcela de combustível não queimada. Se o tempo de mistura dos gases não queimados é muito pequeno, estes esfriam, prejudicando assim a ignição.

Kalghatgi, 1981, propôs uma correlação que prevê a velocidade do escoamento para qual a chama se extingue, baseada nas teorias de Vanquickenborne e van Tiggelen, 1965. Além disso, demonstrou que a velocidade de extinção é proporcional ao quadrado da velocidade máxima de propagação de chama laminar, enquanto que Vanquickenborne e van Tiggelen, 1965, afirmaram essa dependência como sendo linear.

Pitts, 1989, avaliou as teorias sobre descolamento e extinção de chama. Porém, nenhuma das teorias sobre estabilização de chama se mostrou satisfatória. Assim sendo, afirmou que os modelos existentes contém muitas limitações que apenas se satisfazem para as aplicações específicas as quais foram submetidos.

Coelho e Costa, 2007, com base nas constatações de Hottel e Hawthorne, 1949, propuseram uma correlação que comprova que a altura de uma chama de difusão turbulenta é

independente da vazão de combustível, mesmo para uma chama levantada. A figura I e a figura II (vide Anexo I e Anexo II) confirmam que o comprimento da chama permanece inalterado quando a chama está em regime turbulento.

Gollahalli et al., 1988, estudaram a estrutura de chamas de difusão de propano na região de histerese. A diluição do combustível a partir da utilização de gases inertes mostrou uma redução na velocidade de descolamento de chama, porém, não afetou significativamente a velocidade de reatamento. Segundo Lin et al., 1993, os vórtices existentes na região onde a chama está afastada do queimador transportam uma grande quantidade de ar, sendo o principal obstáculo para que a chama se propague de volta.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo é destinado à descrição dos equipamentos e procedimentos que compõem a bancada utilizada para a realização das medições de altura de chama e, também, para a construção do mapa de estabilidade. Os experimentos foram escolhidos conforme os resultados desejados, porém, foram limitados à disponibilidade dos equipamentos disponíveis no laboratório.

4.1. BANCADA DE TESTES

Os experimentos foram realizados seguindo a configuração de montagem mostrada na figura 4.1. Os cilindros de GNV e CO₂ foram conectados a rotômetros individuais, a fim de possibilitar a mistura e direcionamento dos gases ao tubo interno do queimador. A linha de ar comprimido foi filtrada e ligada ao rotômetro de ar. Este foi conectado ao tubo externo, para gerar o fluxo coaxial de ar.

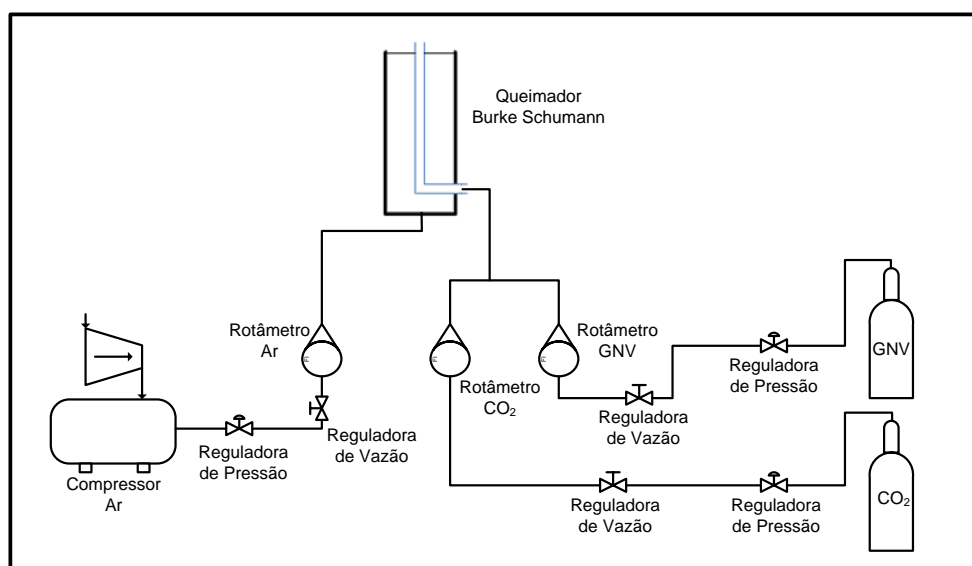


Figura 4.1 – Configuração de montagem dos equipamentos utilizados para a realização dos experimentos.

4.1.1. QUEIMADOR

Neste estudo, foi utilizado um queimador com fluxo axial de ar, externo ao jato central de combustível, em configuração coaxial e em mesmo sentido de corrente, análogo ao de Burke e Schumann, 1928. Este queimador é representativo de condições de operação industrial. O queimador, desenvolvido por Nunes, 2012, é composto por dois tubos concêntricos, de diâmetros diferentes. O interno carrega o fluxo de combustível e o externo é

utilizado para o fluxo de ar. O tubo externo é dividido em duas câmaras, sendo estas divididas por uma tela. A câmara inferior possui esferas de vidro com o objetivo de aumentar a turbulência e abranger toda a seção transversal na saída do duto, distribuindo o escoamento de ar de maneira uniforme. A figura 4.2 representa a região de saída do queimador.

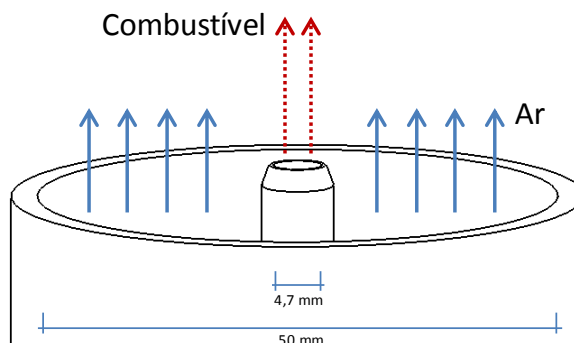


Figura 4.2 – Representação esquemática da região de saída do queimador.

4.1.2. ALIMENTAÇÃO DE GASES

Os gases inflamáveis possuem uma área isolada na parte externa do edifício, por questões de segurança no laboratório. O gás natural veicular utilizado no presente estudo, possui cerca de 93% de metano, além de outras moléculas de combustível mais pesadas, em sua composição [GasNet, 2013]. O cilindro de GNV é conectado à uma tubulação de cobre de 3/8 de polegada que leva o combustível à área de ensaios. Diferentemente, o cilindro de gás carbônico fica ao lado da bancada de testes, o qual é conectado por uma mangueira de poliuretano diretamente ao rotâmetro.

A vazão de ar é alimentada por um compressor situado, também, na área externa do laboratório. Antes de ser liberado para a utilização, o ar comprimido passa por uma válvula reguladora de pressão com filtro, para a retirada da umidade do ar proveniente da compressão.

4.1.3. SISTEMA DE MEDIÇÃO DE VAZÃO

Foram utilizados três rotômetros de esfera da marca ASA para a medição das vazões de alimentação de combustível, com escalas de 0,15 a 1,4 , 1 a 5 e 1 a 10 litros por minuto. Estes possuem incerteza de $\pm 5\%$ e são calibrados para metano à condições normais de pressão e temperatura. Neste trabalho, os rotômetros foram utilizados para medir vazões de GNV e CO_2 , as quais foram corrigidas de acordo com o gás utilizado.

Para as medições de vazão de ar foi utilizado um rotômetro da marca AppliTech, com escala de 14 a 160 litros por minuto e incerteza de $\pm 2\%$. Este instrumento está calibrado para medições com ar à pressão atmosférica (1 atm) e temperatura de 21°C .

4.1.4. SISTEMA DE CAPTURA DE IMAGENS

Uma máquina fotográfica digital da marca Sony, modelo CyberShot DSC-P93, foi utilizada para a captura de imagens. A câmera foi montada em um tripé posicionado à frente do queimador. Para cada chama abordada foram obtidas dez imagens com tempo de exposição de 1 ms cada uma. Desta forma, foi possível observar o comportamento instantâneo da chama. Para chamas levantadas foi utilizado um tempo de exposição maior, pois a formação de fuligem diminui consideravelmente e, com ela, a intensidade de luz. Para chamas levantadas de GNV foi utilizado um tempo de 50 ms e para chamas levantadas diluídas com CO_2 , 125 ms.

4.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram realizados dois tipos de experimentos envolvendo estabilidade de chama. O primeiro teve como objetivo a medição das alturas de chama, de levantamento e de reatamento. A velocidade do escoamento de ar (U_0) foi variada e a velocidade do jato de combustível (U_i) foi mantida constante. Estas, foram utilizadas na determinação das condições para as quais a chama descola, extingue e reata ao bocal do queimador. A caracterização destes limites permitiu a construção de um mapa de estabilidade para uma chama de GNV/ CO_2 .

As restrições impostas pelos equipamentos do laboratório limitaram o estudo a uma determinada faixa de vazões. A vazão de combustível foi controlada pelo rotâmetro. Entretanto, a ausência de uma válvula de duplo estágio para controle da pressão de saída do gás implicou em pequenas oscilações na chama para pequenos valores de vazão. Conseqüentemente, os experimentos se limitaram apenas ao regime turbulento da chama.

4.2.1. ALTURAS DE CHAMA E DESCOLAMENTO

As medidas de altura de chama e de descolamento da chama foram realizadas a partir da análise visual das imagens capturadas durante os experimentos. Dez fotografias consecutivas foram capturadas para cada vazão de ar, a fim de obter uma altura média para a chama em questão. Nota-se que, as chamas apresentaram certa variação na altura, a qual foi criada pela instabilidade causada pela turbulência. A montagem do experimento está detalhadamente descrita na figura III (vide Apêndice I).

O experimento foi repetido a partir de uma vazão ligeiramente menor que a vazão de extinção, até que a chama reatasse novamente ao bocal do queimador. Desta forma, foram medidas as alturas de chama e levantamento, tanto para um aumento quanto para uma diminuição da vazão de ar.

4.2.2. MAPA DE ESTABILIDADE

Quatro concentrações diferentes de CO_2 em GNV foram utilizadas para a construção do mapa de estabilidade, a saber: 0%, 8%, 14% e 40%. Assim, os limites de descolamento, extinção e reatamento foram comparados entre estes casos e analisados ao fim do estudo.

Há três vazões de ar de interesse: (i) a vazão para qual a chama descola, (ii) para qual ela se extingue e (iii) para qual ela volta a colar no bocal do queimador. A obtenção de cada curva foi realizada mantendo a vazão total da mistura GNV/ CO_2 . Assim, a vazão de ar foi alterada até que os fenômenos descritos acima ocorressem. Este procedimento foi repetido para as diferentes quantidades de diluição de CO_2 em GNV estudadas, a fim de investigar a estabilidade em chamas produzidas por combustíveis de baixo poder calorífico.

5. RESULTADOS

Este capítulo é dividido em três seções. A primeira apresenta os resultados das alturas de chama medidas neste trabalho. A segunda mostra os limites de descolamento, extinção e reatamento das chamas e a terceira é reservada para características visuais observadas na chama durante a realização dos experimentos.

5.1. ALTURA DE CHAMA E DESCOLAMENTO

Com base na metodologia apresentada na seção 4.2.1, as alturas de chama (L_f) e de descolamento (H_f) foram medidas para algumas vazões fixas de combustível (U_i), variando a velocidade do escoamento de ar (U_0). O gráfico ilustrado na figura 5.1 representa esquematicamente como os comprimentos de chama e alturas de descolamento foram obtidos, de maneira a simplificar a visualização dos resultados seguintes deste capítulo. Todas as

imagens contidas no interior deste gráfico correspondem ao comportamento instantâneo de cada chama, referentes a diferentes vazões de ar. Todavia, as medições reais foram realizadas a partir de dez imagens como estas para cada situação, sendo possível ponderar suas variações devido à turbulência. As primeiras imagens aparentam estar afastadas do bocal do queimador, devido ao tempo de captura da imagem (1 ms) que obstrui a passagem excessiva de luz e elimina a parcela de menor luminosidade. Nesta figura, são mostrados os resultados para uma chama de GNV com velocidade de escoamento constante $U_i = 9,6$ m/s, variando a velocidade de ar (U_0). Os pontos medidos foram ligados por linhas para favorecer a compreensão. Porém, estas linhas não representam, necessariamente, a tendência real da chama, cuja extremidade é identificada através dos pontos.

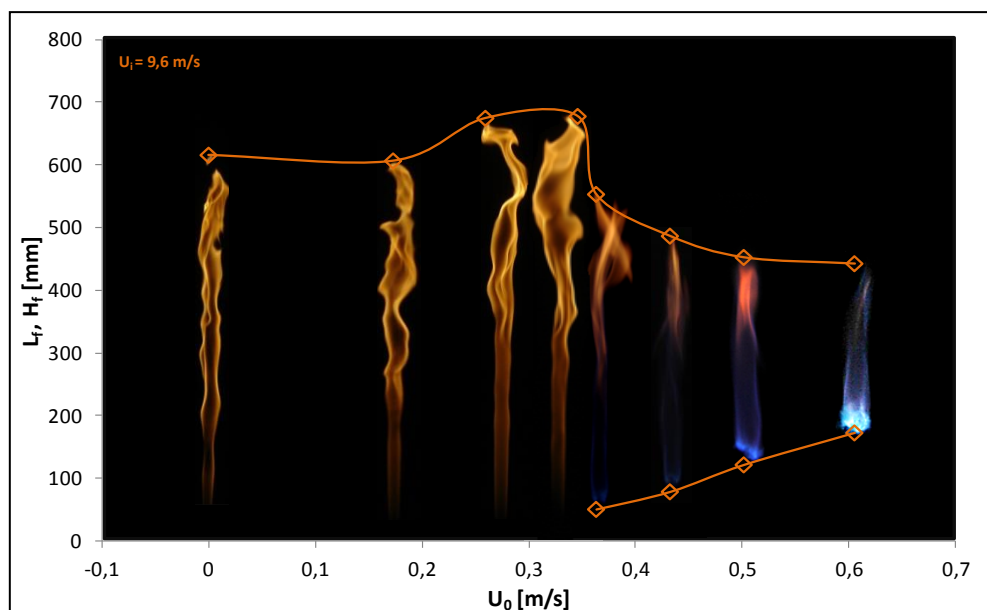


Figura 5.1– Esquematização das alturas de chama (L_f) e levantamento (H_f), para velocidade constante de combustível ($U_i = 9,6$ m/s) e velocidade de ar variável (U_0).

Como pode ser visto no gráfico acima, as linhas superior e inferior representam, respectivamente, o comprimento e a altura de levantamento visíveis da chama. A chama não apresenta variação significativa de altura, enquanto colada ao bocal do queimador, para pequenos valores de vazão de ar. Quando a chama se aproxima da vazão necessária para descolar, há um pequeno aumento na altura, seguido de uma queda abrupta quando a chama se desprende. A redução da altura da chama é devida ao aumento da taxa de reação, o qual é influenciado pela região de pré-mistura parcial criada entre o bocal do queimador e a base da chama, que favorece a combustão. Desta forma, resta menos combustível para reagir à jusante desta região, o que produz uma altura de chama menor.

A altura de levantamento da chama apresenta um comportamento aproximadamente linear em função da velocidade. Para as vazões mais altas consideradas neste estudo, o aumento da turbulência gera uma oscilação constante da base da chama levantada. Porém, o valor médio, mostrado no gráfico, demonstra seguir a mesma tendência. Embora no presente estudo seja tomada a velocidade de ar como variável, a linearidade encontrada é similar aos resultados do estudo de Kalghatgi, 1984, no qual foi proposto que há uma correlação entre a altura de descolamento e a velocidade do jato. Isto é devido à maior estabilidade gerada pela pré-mistura parcial dos reagentes nesta região, associada ao caráter predominantemente laminar da chama, nas proximidades do bocal do queimador, uma vez que o escoamento de ar possui pouca dispersão junto à região de saída.

O comportamento da altura pode ser comparado com os estudos de Hottel e Hawthorne, 1949, observando a figura II, Anexo II. É possível verificar, neste gráfico, que um aumento da vazão não modifica a altura da chama turbulenta, mesmo quando levantada. Além

disso, foi verificado que o descolamento provoca uma diminuição na altura da chama. As imagens da figura 5.1 também evidenciam esta constatação, uma vez que as alturas para uma chama colada e para uma chama levantada apresentam valores de altura praticamente constantes. A pequena discrepância entre a literatura [Hottel e Hawthorne, 1949; Coelho e Costa, 2007] e o presente estudo pode ser associada ao fato de se variar a vazão de ar ao invés da vazão de combustível. Para Hottel e Hawthorne, 1949, o aumento da velocidade de combustível mostrou uma redução na parcela laminar da chama. No presente estudo, esta região da chama apresentou comportamento contrário. Por outro lado, um aumento na quantidade de ar favoreceu a estabilidade frente a perturbações externas.

A figura 5.2 apresenta as alturas de chama e de levantamento para diferentes concentrações de CO_2 utilizadas para diluir o combustível. Entretanto, foi considerado nas medições o escoamento total de combustível ($\text{GNV} + \text{CO}_2$) constante, de $U_i = 9,1 \text{ m/s}$.

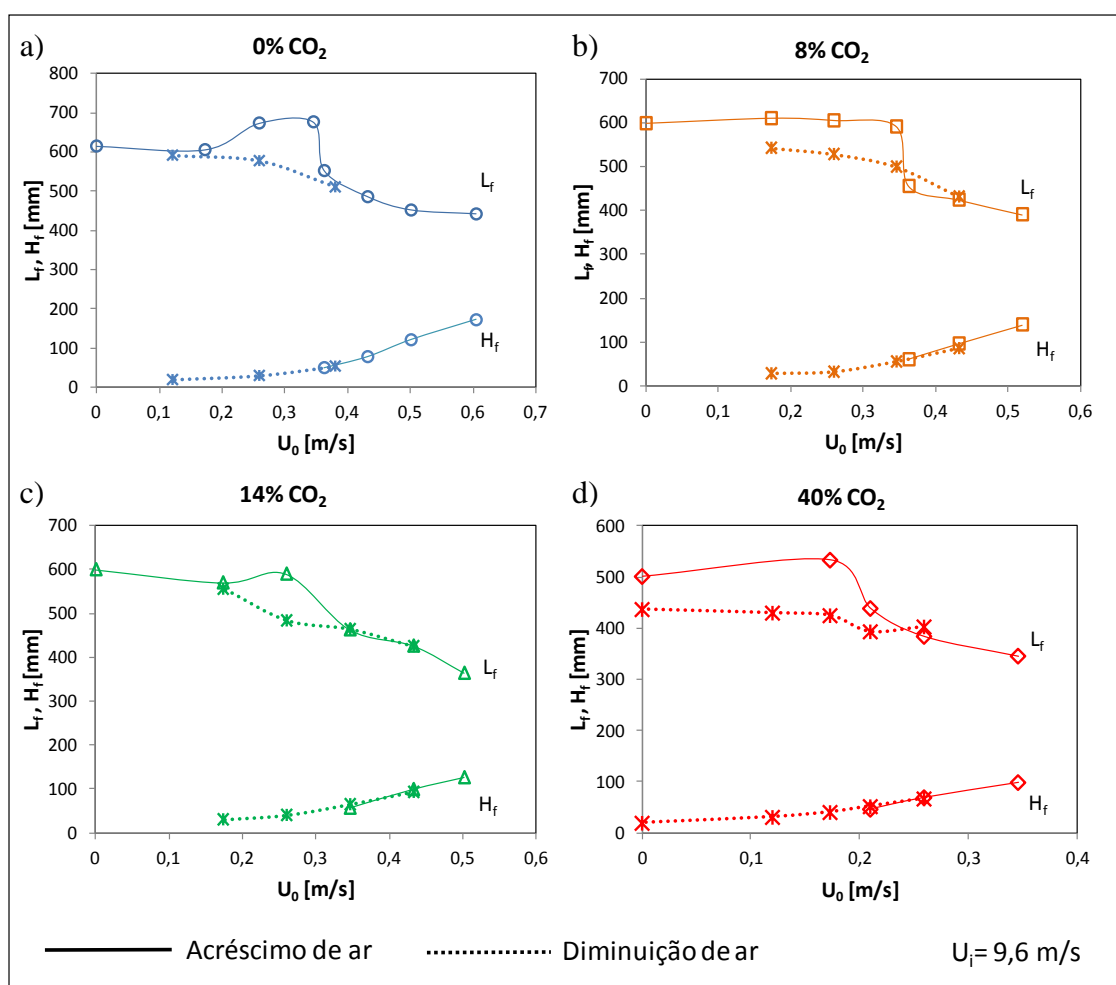


Figura 5.2 – Alturas de chama (L_f) e levantamento (H_f) para diferentes concentrações de CO_2 em GNV, para o aumento e a diminuição do escoamento de ar.

Nos gráficos acima, não foi mantida uniformidade entre as escalas, visando ressaltar os detalhes de cada caso. Os comprimentos de chama e altura de levantamento apresentaram incertezas máximas, para uma confiabilidade de 95%, de $\pm 40 \text{ mm}$ e $\pm 2 \text{ mm}$, respectivamente, em comparação com a figura 5.1. As linhas pontilhadas identificam o procedimento de redução da vazão de ar após a chama levantar. A partir do ponto de descolamento a vazão de ar deve ser reduzida para valores muito inferiores ao de deslocamento até para que chama reate ao queimador. Desta forma, estas diferentes velocidades de ar foram medidas para as diversas chamas estudadas.

O comportamento das chamas segue a mesma linha descrita para a figura 5.1. As alturas de chama não sofrem variações significativas nos casos em que se apresenta colada ou levantada. Todos os gráficos apresentam um decaimento brusco da altura quando a chama se desprende do bocal do queimador. Esse evento ocorre devido à formação da chama tripla que aumenta a reação na base da chama a partir da pré-mistura dos reagentes. Assim sendo, sobra menos combustível para reagir, o que faz com que a chama diminua de tamanho final, mesmo considerando a altura de levantamento na altura total da chama.

Na figura 5.2, a diminuição de U_0 faz com que as curvas retornem, preferencialmente, pelo mesmo caminho, até atingir o limite para qual a chama descola, onde muda de comportamento. Nesta etapa, é possível diminuir U_0 até um valor menor que o necessário para descolar, mantendo a chama levantada. A dificuldade da chama em se propagar de volta é influenciada pela massa de ar excessiva nesta região, transportada pelos vórtices provenientes da turbulência [Lin et al., 1993]. Desta forma, a pré-mistura neste espaço é demasiadamente pobre. Assim sendo, é insuficiente para manter a combustão e só atinge a estabilidade na medida em que se afasta do bocal do queimador. A altura da chama também é influenciada nesta etapa, a qual apresenta valores entre 10 e 15% menores. Esta retoma a altura normal uma vez que a chama reata ao bocal do queimador.

A figura 5.2d mostra que o percentual elevado de CO_2 dificulta o reatamento da chama, de forma que a mesma permanece levantada com a retirada do escoamento de ar. O reatamento desta chama só foi possível com o auxílio de uma influência externa, como perturbação da massa de ar ou ignição na região de pré-mistura.

A figura IV (vide Apêndice II) ilustra os resultados conjuntos de L_f e H_f , contidos na figura 5.2. A adição de CO_2 em GNV, nas proporções de 8% e 14% não apresentou variação significativa de altura de chama, enquanto colada, em relação à altura produzida pelo GNV puro: cerca de 6% e 8%, respectivamente. Porém, há uma diminuição da altura de chama, quando levantada, semelhante entre os casos de 8% e 14% de mistura de CO_2 , as quais apresentaram variações de aproximadamente 13% em relação à chama de GNV puro. Por outro lado, a mistura com 40% de CO_2 causou uma diminuição de cerca de 20% nestas alturas, em comparação aos resultados para GNV puro. A reação ocorre em alturas menores, pelo fato de haver menor quantidade de combustível para reagir com o oxidante quando há diluição com CO_2 .

Os resultados obtidos para as alturas de levantamento ressaltam que a adição de CO_2 não provoca alterações significativas nesses valores. O que pode ser visualizado é que a altura máxima de levantamento é alterada. Desta forma, a grande influência da diluição do GNV está no deslocamento dos limites de descolamento e extinção, que diminuem conforme a diluição com CO_2 aumenta.

5.2. MAPA DE ESTABILIDADE

Os resultados apresentados nesta seção são referentes aos limites de levantamento, extinção e reatamento de chama, para diferentes concentrações de CO_2 em GNV. Em síntese, a vazão de combustível foi fixada e o escoamento de ar foi variado até que os fenômenos citados acima ocorressem. Estas informações são apresentadas na figura 5.3.

Para os gráficos da figura 5.3, não houve padronização da escala, a fim de ressaltar os aspectos significativos de cada caso. As incertezas associadas a este experimento são referentes apenas às incertezas dos rotâmetros, ou seja, aproximadamente 2% para U_0 e 5% para U_i . É possível notar que, para baixas vazões de combustível, a vazão de ar necessária para descolar e extinguir a chama são iguais, dentro dos limites de incerteza. Neste caso, a chama se desprende do bocal do queimador e levanta de maneira gradual até se extinguir por completo, a uma mesma velocidade de ar, conforme ilustra a figura 5.5. Nesta etapa, fica evidente a importância do tempo de estabilização da chama para a coleta dos dados.

Há um afastamento das curvas de descolamento e extinção conforme a velocidade do jato de combustível aumenta, indicando que a chama atinge a estabilidade quando é levantada. Além disso, conforme a vazão de combustível aumenta a velocidade de ar necessária para

descolar a chama do queimador é menor. Isto ocorre porque a velocidade do escoamento é suficientemente elevada para criar vórtices junto ao bocal do queimador, os quais acabam por coalescer, originando uma região de pré-mistura parcial, conforme descrito por Coelho e Costa, 2007.

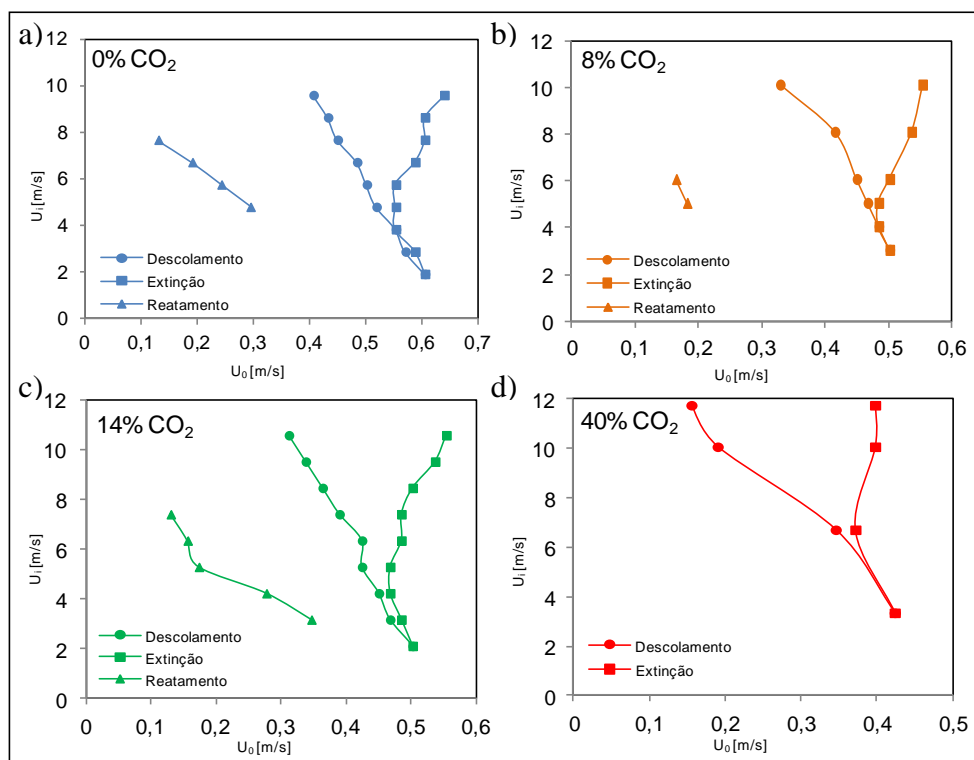


Figura 5.3 – Velocidades limite de levantamento, extinção e reatamento de chama para diferentes concentrações de CO_2 .

O valor da velocidade U_0 necessário para extinguir a chama diminui ligeiramente para baixas vazões de combustível e volta a aumentar para vazões maiores. Isso ocorre pelo fato de que valores pequenos de U_i e U_0 possuem maior influência na extinção da chama. Para U_i maiores, o elevado nível de turbulência favorece a região de pré-mistura de forma que a estabilidade da chama melhora, aumentando o limite de extinção.

Os limites de descolamento, extinção e reatamento de chama, para cada caso apresentado na figura 5.3, foram comparados conforme mostra a figura 5.4.

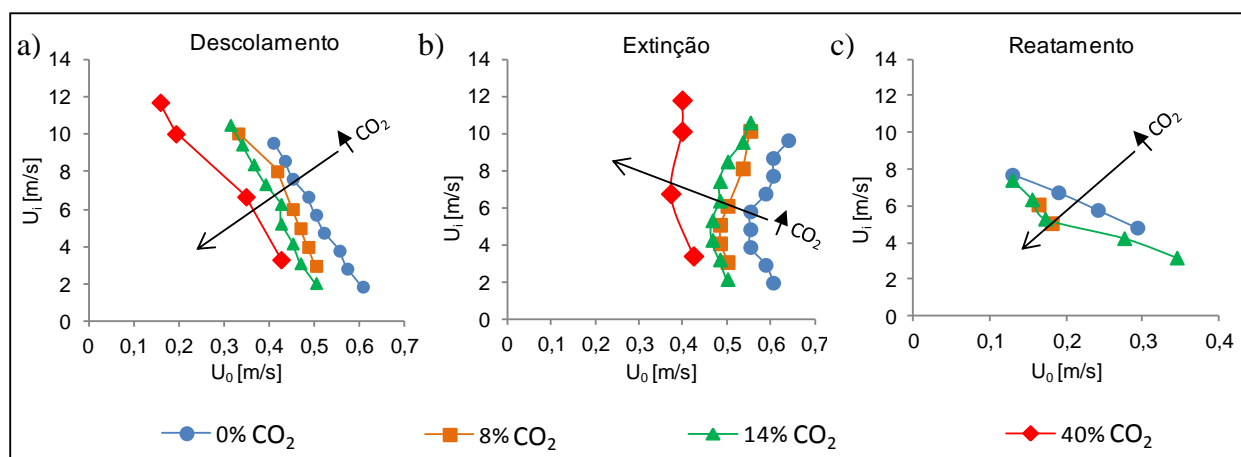


Figura 5.4 – Comparação entre os limites de descolamento, extinção e reatamento para diferentes concentrações de CO_2 em GNV.

Os gráficos da figura 5.4 permitem notar o efeito da adição de CO_2 em GNV. Como previsto, com base nos estudos de Gollahalli et al., 1988, as curvas de extinção e de descolamento deslocam para a esquerda, isto é, região onde os valores de velocidade de ar são menores. Conforme a quantidade de CO_2 na mistura é aumentada, a quantidade de ar necessária para produzir tais fenômenos é menor. Para as concentrações de CO_2 de 8%, 14% e 40%, há uma diminuição dos limites de descolamento de 12%, 18% e 26%, respectivamente. O limite de extinção, da mesma forma, apresenta variações de 9%, 12% e 32% em relação aos limites produzidos pelo GNV puro.

É evidente, na evolução mostrada na figura 5.4c, que baixas concentrações de CO_2 não levam à grandes disparidades entre as curvas de reatamento. Por outro lado, uma elevada diluição do combustível diminui consideravelmente esse limite. Note-se que, para um percentual de gás carbônico de 40%, a chama não é capaz de estabilizar novamente junto ao bocal do queimador sem intervenção externa, permanecendo levantada, mesmo sem escoamento de ar. Portanto, esta não se adapta nos limites de reatamento citados.

A figura 5.5 representa a evolução repentina da chama desde o descolamento até a extinção, na qual há um ligeiro aumento da altura próximo ao momento de extinção. Isto diverge dos resultados de altura apresentados, pois a chama está em um regime não estável, no ponto, isto é, na velocidade do escoamento em que o limite de descolamento e extinção são iguais. Assim, estas alturas não podem ser comparadas às constatações apresentadas neste capítulo.

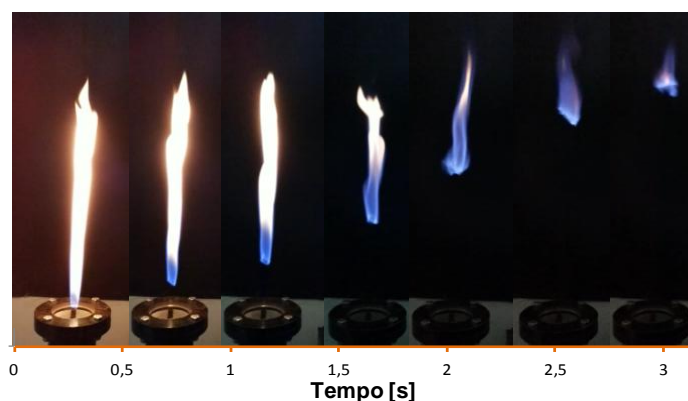


Figura 5.5 – Levantamento de uma chama de GNV seguido de sua extinção.

5.3. CARACTERÍSTICAS DAS CHAMAS

A chama colada ao bocal possui uma forte coloração avermelhada devido à alta produção de fuligem. Ao desprender do bocal, a aparência da chama é alterada. A base torna-se completamente azul, evidenciando uma diminuição da produção de fuligem. O topo da chama possui coloração avermelhada, devido ao acúmulo de fuligem. Em condições cuja vazão de ar é muito superior à vazão de combustível a produção de fuligem é reduzida até que a chama se torna completamente azul. Esta característica evidencia proximidade ao limite de extinção, como pode ser visto na figura 5.1.

A região de pré-mistura formada entre o bocal do queimador e a base da chama levantada justifica a diminuição da formação de fuligem, pois parte do ar é misturada ao combustível antes de reagir, o que aumenta a taxa de reação. A fração de fuligem produzida começa a aumentar novamente, ao passo que a vazão de ar diminui. Como consequência, a coloração azul da chama passa a ser tomada pelo tom avermelhado, característico da radiação emitida por essas partículas.

A diluição do combustível também altera a cor predominante da queima. Neste caso, a adição de gás carbônico (inerte à reação) ao gás natural veicular, diminui a formação de fuligem devido aos efeitos térmicos e químicos, que derivam chamas com temperaturas

menores. Desta forma, há uma diminuição da produção de fuligem. O acréscimo de gás carbônico altera gradualmente a cor da chama de vermelho para azul. Esta alteração de cor é mais evidente para as chamas levantadas, devido à pré-mistura parcial. Isto pode ser visualizado na figura 5.6.



Figura 5.6 – Variação da coloração de uma chama levantada de GNV com o percentual de CO_2 .

6. CONCLUSÕES

Este estudo apresenta variações na estabilidade de uma chama turbulenta não pré-misturada de GNV frente à adição de CO_2 . A utilização de um queimador, representativo de aplicações industriais, com escoamento de ar coaxial, externo ao jato central de combustível, proporcionou a realização dos experimentos.

A primeira abordagem, referente às alturas de chama, apresentou coerência com a literatura, no que diz respeito aos comportamentos da chama turbulenta. Nos experimentos, foi constatado que o acréscimo da vazão de ar não influenciou significativamente a altura de uma chama colada. O descolamento da chama provocou uma queda abrupta da altura de chama, que, por sua vez, não apresentou grandes variações com o aumento da vazão de ar. As pequenas divergências estão associadas ao fato de variar o fluxo de ar ao invés de variar o fluxo de combustível. As chamas levantadas apresentam uma altura de chama ligeiramente menor, devido à pré-mistura parcial, que favorece a reação. Assim a combustão ocorre, em maior parte, na base da chama.

As medições de alturas de levantamento de chama mostraram uma dependência aproximadamente linear com respeito à vazão de ar. Embora os estudos encontrados na literatura estejam associados à vazão de combustível, há semelhança com os comportamentos obtidos neste trabalho. Isto é devido ao efeito turbulento próximo à região de saída do jato, o qual é afetado tanto pelo escoamento de combustível quanto pelo de ar. Desta maneira, a dependência linear se mantém, uma vez que a diferença principal está nos valores das alturas.

A diluição do combustível mostrou uma pequena diminuição na altura de chama para os casos com pequenas diluições. Além disso, apresentou maiores disparidades para concentrações elevadas de CO_2 . As alturas de levantamento da chama, nos limites de extinção, diminuíram ligeiramente com a adição de CO_2 .

Em relação ao mapa de estabilidade, na medida em que a vazão de combustível foi aumentada, menor quantidade de ar foi necessária para que a chama descolasse. Contudo, o limite de extinção apresentou uma pequena queda para as menores vazões e voltou a aumentar em conjunto com a vazão de combustível. O limite de reatamento também diminuiu com o aumento da velocidade de combustível de forma similar ao limite de descolamento.

Nos resultados com as chamas de combustíveis de baixo poder calorífico foi averiguado que o aumento da diluição do combustível com o CO₂ reduziu a região de estabilidade da chama. Desta maneira, uma menor quantidade de ar foi necessária para levantar e, também, extinguir a chama. Pequenos percentuais de CO₂ não levaram a grandes diferenças no limite de reatamento. Porém, a concentração de 40% de CO₂ produziu chamas que permaneceram levantadas, mesmo sem a influência do escoamento de ar.

Os experimentos realizados ficaram limitados a faixas de vazão de combustível relativamente baixas, quando comparadas aos estudos presentes na literatura, devido às restrições impostas pelos equipamentos disponíveis no laboratório. Os rotâmetros utilizados possuem uma incerteza relativamente alta, o que interfere sensivelmente nas baixas vazões de ar. Outros fatores como oscilação do escoamento de combustível e elevada movimentação da massa de ar podem ser citados como dificuldades encontradas. A utilização de um ambiente com menores perturbações externas, além de um sistema de exaustão apropriado é recomendada, a fim de eliminar os ruídos nas medidas. Contudo, foi possível investigar os comportamentos das chamas de maneira que os resultados condizem qualitativamente com a literatura.

Além disto, a utilização de rotâmetros de maior capacidade viabilizaria a ampliação do mapa de estabilidade, bem como a realização de experimentos de maior porte. Isto possibilitaria que a extinção da chama pudesse ser atingida sem a adição de um escoamento forçado de ar. Desta forma, seria possível comparar os resultados de altura de chama levantada de forma direta com as formulações propostas na literatura. Por fim, a utilização de uma válvula duplo estágio na saída do cilindro de GNV poderia favorecer a estabilização do escoamento de combustível.

Para trabalhos futuros, pode-se aumentar a escala da montagem experimental deste trabalho, a fim de obter chamas de maior potência. Assim, será possível obter resultados em condições próximas as de operação na indústria.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barreta, L. G., Sbampato, M. E., dos Santos, L. R., dos Santos, A. M. E Destro, M. G., **“Investigação do radical OH produzido na queima do Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) usando Fluorescência Induzida por Laser (LIF)”**, VIII Workshop Anual de Pesquisa e Desenvolvimento do Instituto de Estudos Avançados/CTA, S .J. dos Campos-SP, Brasil, 2008.

Broadwell, J. E., Dahm, W. J. A. e Mungal, J.; **“Blowout of turbulent diffusion flames”**, Symposium (International) on Combustion, vol. 20, pp. 303-310, 1985.

Burke, S. P. e Shumann, T. E. W.; **“Diffusion Flames”**, Combustion Symposium, vol.20, N° 10. pp. 998-1004. 1928.

Caetano, N. R.; **“Estudo Experimental de Chamas Turbulentas não Pré-Misturadas Empregando Simultaneamente as Técnicas de Diagnóstico Laser PLIF e PIV”**, Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, pp. 180, 2012.

Chang, T. W. e Chao, Y. C.; **“The stabilization characteristics of turbulent lifted diffusion flames of CH₄/CO blended fuels”**, Proceedings of the Combustion Institute, vol. 33, pp. 1655-1662, 2011.

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

GasNet – O site do gás natural; **“Composição do Gás Natural Comercial”**, www.gasnet.com.br/novo_gasnatural/gas_completo.asp#gas13. Acessado em 20/05/2013.

Ghosal, S. e Vervisch, L.; **“Stability Diagram for Lift-Off and Blowout of a Round Jet Laminar Diffusion Flame”**, Combustion and Flame, vol. 124, pp. 646-655, 2001.

Gollahalli, S. R., Savaş, Ö., Huang, R. F. e Rodriguez Azara, J. L.; **“Structure of attached and lifted gas jet flames in hysteresis region”**, Symposium (International) on Combustion, vol. 21, pp. 1463-1471, 1988.

Hottel, H. C. e Hawthorne, W. R., **“Diffusion in Laminar Flame Jets”**, Proceedings of the Thrid Symposium on Combustion Flame and Explosion Phenomena, pp. 254-266, 1949.

Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC; **“History”**, http://www.ipcc.ch/organization/organization_history.shtml#.Ub3XY_kskvR. Acessado em 20/04/2013.

Janicka, J., Peters, N.; **“Prediction of turbulent jet diffusion flame lift-off using a pdf transport equation”**, Symposium (International) on Combustion, vol. 19, pp. 367-374, 1982.

Kalghatgi, G. T.; **“Blow-out Stability of Gaseous Jet Diffusion Flames, Part 1: in Still Air”**, Combustion Science and Technology, vol. 26, pp. 233-239, 1981.

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

Lin, C. K., Jeng, M. S. e Chao, Y. C.; **“The stabilization mechanism of the lifted jet diffusion flame in the hysteresis region”**, Experiments in Fluids, vol. 14, pp. 353-365, 1993.

Nunes, C. D.; **“Estudo Experimental de Chamas Difusivas Laminares”**, Trabalho de Conclusão do Curso – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, pp. 26, 2012.

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

Petrobras S.A., **“Tocha da produção e segurança”**, <http://fatosedados.blogspot.com.br/2009/10/24/tocha-da-producao-e-seguranca/>. Acessado em 25/04/2013.

Pitts, W. M.; **“Assessment of theories for the behavior and blowout of lifted turbulent jet diffusion flames”**, Symposium (International) on Combustion, vol. 22, pp. 809-816, 1989.

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

Vanquickenborne, L. e van Tiggelen, A; **“The Stabilization Mechanism of Lifted Diffusion Flames”**, Combustion and Flame, vol. 10, pp. 59-66, 1965.

Wu, Y., Lu, Y., Al-Rahbi, I. S. e Kalghatgi, G. T.; **“Prediction of the liftoff, blowout and blowoff stability limits of pure hydrogen and hydrogen/hydrocarbon mixture jet flames”**, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 34, pp. 5940-5945, 2009.

Wyzgolik, A. e Baillot, F.; **“Response of the non-premixed lifted flame to coaxial jet mixing layers”**, Proceedings of the Combustion Institute, vol. 31, pp. 1583-1590, 2007.

ANEXO I

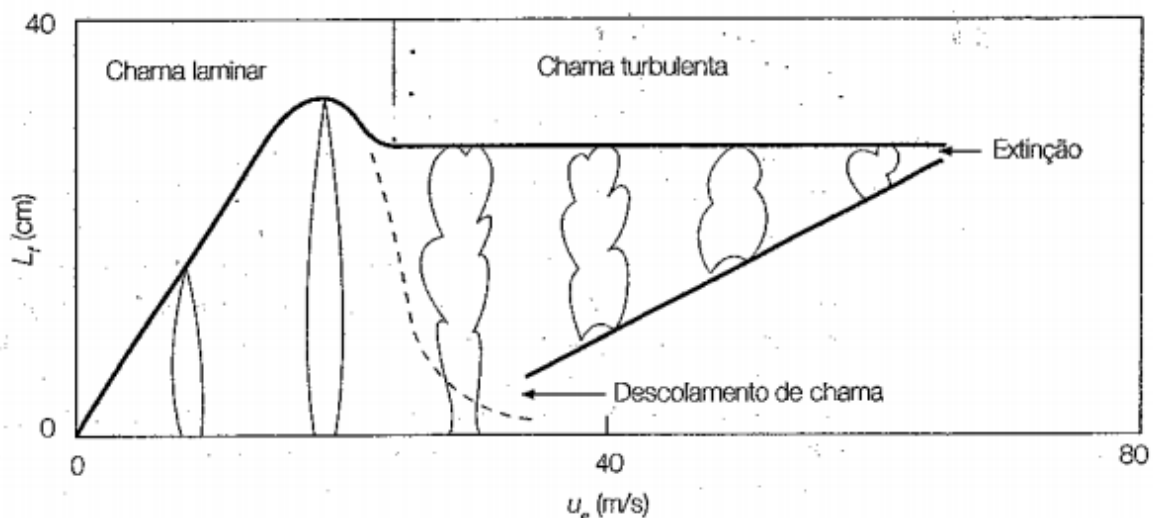


Figura I – Variação do comprimento de chama em função da velocidade do jato à saída do queimador [Coelho e Costa, 2007].

ANEXO II

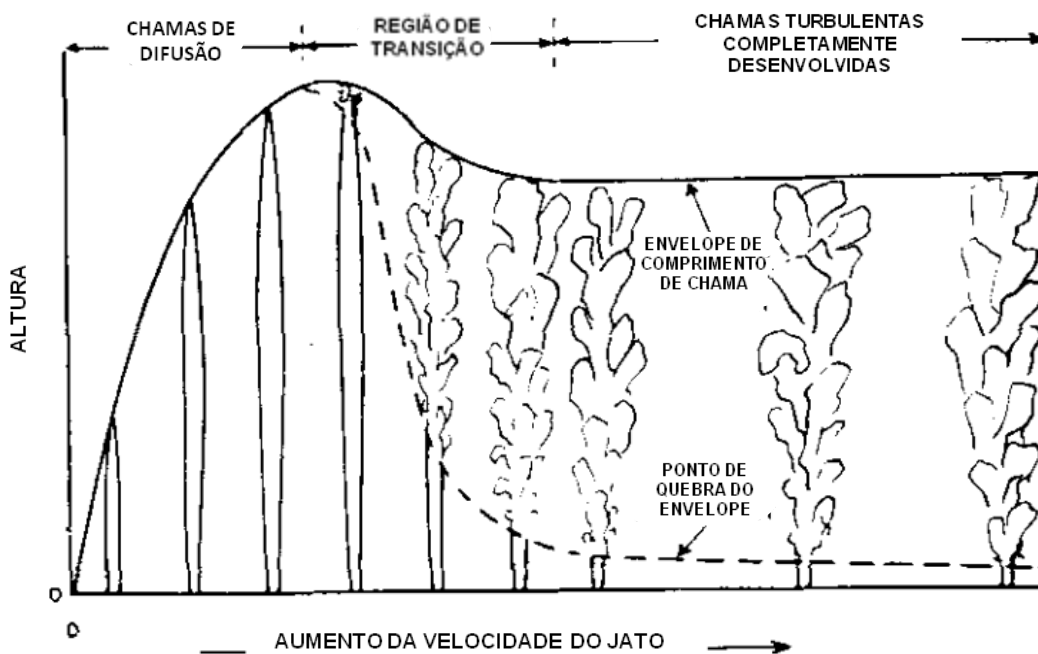


Figura II – Variação progressiva do tipo de chama com o aumento da velocidade do jato de combustível [adaptado de Hottel e Hawthorne, 1949].

APÊNDICE I

A figura III ilustra a montagem da bancada de testes para a realização dos experimentos e captura de imagens.

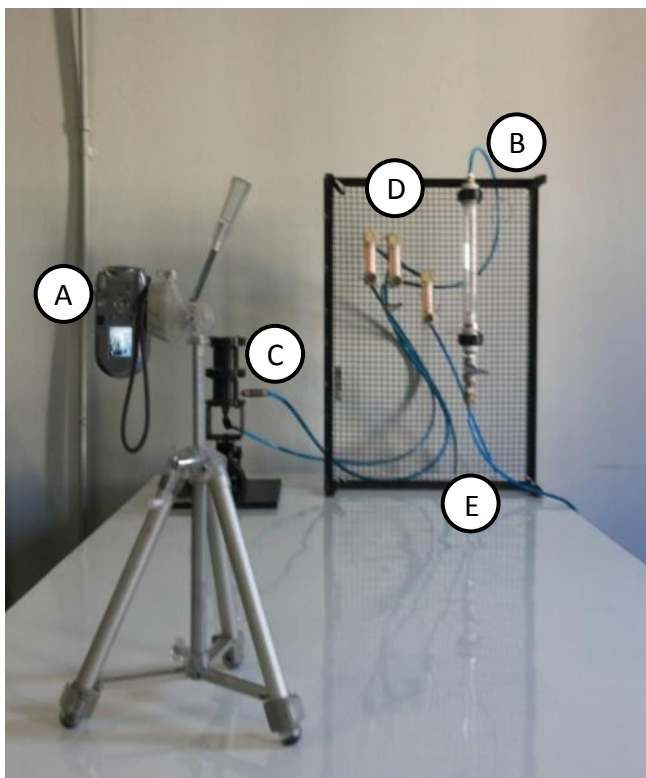


Figura III – Bancada experimental para capturar imagens de chamas. A) Máquina Fotográfica, B) Rotâmetro de ar, C) Queimador Burke-Schumann, D) Rotômetros de CH_4 , E) Mangueiras para condução dos gases.

APÊNDICE II

A figura I mostra uma comparação entre os resultados de altura de chama obtidos para diferentes concentrações de CO_2 em GNV, a saber: 0%; 8%; 14% e 40%. Os dados foram obtidos para uma velocidade total de combustível (GNV + CO_2) $U_i = 9,1 \text{ m/s}$. As linhas servem apenas para favorecer a compreensão do gráfico. Desta forma, podem não apresentar a tendência real dos pontos não traçados.

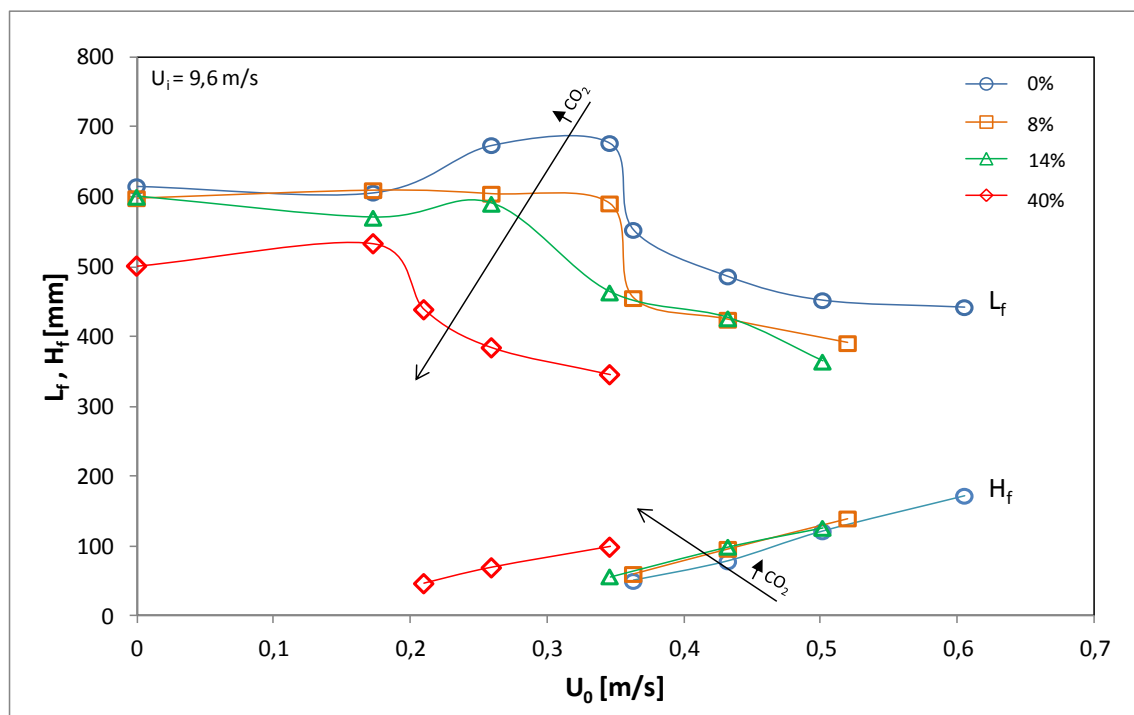


Figura IV - Comparação entre L_f e H_f para diferentes concentrações de CO_2 .