

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

ESTUDO EXPERIMENTAL DA RADIAÇÃO TÉRMICA EMITIDA POR CHAMAS LAMINARES
NÃO PRÉ-MISTURADAS UTILIZANDO COMBUSTÍVEIS DE BAIXO PODER CALORÍFICO

por

Filipe Cantelli Kroeff

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

Porto Alegre, Julho de 2013

ESTUDO EXPERIMENTAL DA RADIAÇÃO TÉRMICA EMITIDA POR CHAMAS LAMINARES
NÃO PRÉ-MISTURADAS UTILIZANDO COMBUSTÍVEIS DE BAIXO PODER CALORÍFICO

por

Filipe Cantelli Kroeff

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. Thamy Cristina Hayashi
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientador: Prof. Dr. Nattan Roberto Caetano

Comissão de Avaliação:

Prof. Thamy Cristina Hayashi

Prof. Francis H. Ramos França

Prof. Flavio T. Van Der Laan

Porto Alegre, Julho de 2013

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Nattan Roberto Caetano, pela ajuda e orientação memorável durante a realização deste trabalho e pela dedicação extrema em tentar sanar as dúvidas referentes aos conceitos aqui estudados.

Ao Prof. Fernando Pereira, pelo essencial apoio teórico.

Ao Batista, pelo apoio prestado no LETA durante as atividades experimentais.

Ao Prof. Paulo Smith Schneider, por gentilmente emprestar o sistema de aquisição de dados durante todo o período dos experimentos.

Ao Prof. Telmo Roberto Strohaecker, por emprestar o reservatório de CO₂, usado durante todo o período dos experimentos.

Ao meu irmão pela ajuda em alguns dias de realização de experimentos.

Aos meus pais, não só pelo extremo apoio nos momentos de dificuldade enfrentados durante este último semestre do curso de Eng. Mecânica, mas também por todo o suporte durante os demais anos de faculdade.

KROEFF, F. C. **Estudo Experimental da Radiação Térmica Emitida por Chamas Laminares não Pré-Misturadas Utilizando Combustíveis de Baixo Poder Calorífico**. 2013. 22. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento da radiação térmica emitida por chamas laminares não pré-misturadas. A energia produzida pela chama pode ser transferida para o meio por diversos mecanismos, sendo um deles a radiação térmica. O principal propósito desta medição é estimar a parcela de radiação térmica emitida por chamas produzidas a partir de diferentes concentrações de gás natural e dióxido de carbono, a fim de simular combustíveis de baixo poder calorífico. Há casos onde a emissão de radiação térmica deve ser reduzida ao máximo, como em queimadores de rejeito, os flares, existentes em plataformas petrolíferas, a fim de minimizar possíveis danos a componentes sensíveis ao calor e aos operários. Por outro lado, a presença de fuligem é fundamental para a transferência de calor em caldeiras, pois é o principal meio participante na emissão de radiação térmica. Portanto, este estudo é fundamental para a redução das emissões associada ao aumento da segurança na indústria do petróleo. Um sensor de intensidade de radiação, chamado de radiômetro, foi empregado para realizar as medições da fração de energia radiante da chama. Os resultados permitem verificar que a fração radiante é inversamente proporcional à vazão de combustível e à concentração de dióxido de carbono. Além disso, a radiação emitida pela chama em direções abaixo do plano do bocal do queimador exerce influência significativa no cálculo da energia total irradiada. Esta constatação é de extrema importância para o estudo de queimadores de rejeito.

PALAVRAS-CHAVE: chama laminar não pré-misturada, fração radiante, fluxo de calor radiante, gás natural, dióxido de carbono, radiômetro, fuligem.

KROEFF, F. C. **Experimental Study of Thermal Radiation Emitted by Laminar non-Premixed Flames Using Low Calorific Value Fuels**. 2013. 22. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the behavior of the thermal radiation emitted by laminar non-premixed flames. The energy produced by the flame can be transferred to the surroundings by several mechanisms, one of them being thermal radiation. The main purpose of this measurement is to estimate the amount of thermal radiation emitted by flames produced from a combination of natural gas and carbon dioxide, in order to simulate low calorific value fuels. There are cases where the thermal radiation should be reduced as much as possible, such as waste burners, called flares, used in oil rigs in order to minimize potential damage to heat sensitive components and workers. On the other hand, the presence of soot is essential for heat transfer in boilers, as it is the major participant in thermal radiation emission. Therefore, this study is critical for reducing emissions associated with increased safety in the oil industry. A radiation sensor, also called as radiometer, was used to perform measurements of the fraction of radiant energy emitted by the flame. The results allow us to verify that the radiant fraction is inversely proportional to the fuel flow rate and to the concentration of carbon dioxide. In addition, the radiation emitted by the flame in directions below the plane of the burner nozzle has a significant influence on the total irradiated energy calculation. This finding is of extreme importance for the study of waste burners.

KEYWORDS: laminar flame non-premixed flame, radiant fraction, radiant heat flux, natural gas, carbon dioxide, radiometer, soot.

ÍNDICE

| | | |
|------|---|----|
| 1. | INTRODUÇÃO | 01 |
| 2. | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 01 |
| 2.1. | Chama laminar não pré-misturada | 01 |
| 2.2. | Radiação térmica emitida por chamas | 01 |
| 2.3. | Sensores fotocondutores | 02 |
| 3. | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 03 |
| 3.1. | Estudos experimentais realizados por Sivathano e Gore, 1993 | 03 |
| 3.2. | Estudos experimentais realizados por Ditaranto e Oppelt, 2011 | 04 |
| 3.3. | Estudos realizados por Hankinson et al., 2011 | 05 |
| 4. | METODOLOGIA | 05 |
| 4.1. | Procedimento de Medição de Fluxo de Calor | 05 |
| 4.2. | Procedimento de Medição de Comprimento de Chama | 06 |
| 4.3. | Queimador Burke Shumman | 07 |
| 4.4. | Bancada experimental | 07 |
| 4.5. | Correção da vazão dos rotâmetros | 08 |
| 4.6. | Sensor fotocondutor | 09 |
| 4.7. | Calibração do Sensor Fotocondutor | 09 |
| 4.8. | Aquisição de Dados | 11 |
| 5. | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 10 |
| 6. | CONCLUSÕES | 14 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 14 |
| | APÊNDICE I – PARÂMETROS E PROPRIEDADES | 16 |

1. INTRODUÇÃO

A combustão é o método tradicional para a eliminação de grandes quantidades de gases indesejáveis e vapores inflamáveis na indústria do petróleo. A determinação dos níveis de radiação térmica emitida a partir de chamas é importante para o projeto de queimadores de rejeito existentes em plataformas petrolíferas, denominados *flares*. Esta informação é utilizada para estabelecer a distância mínima do *flare* em relação aos equipamentos, visando à segurança dos instrumentos e dos operários. As emissões, incluindo a quantidade de fuligem, liberadas pela combustão, causam danos ao sistema respiratório e contribuem para o efeito estufa [Guigard et al., 2000].

A radiação é o principal modo de transferência de calor na maior parte dos processos térmicos de alta temperatura. A radiação é geralmente o modo dominante de transferência de calor em chamas contendo fuligem ou partículas combustíveis, influenciando tanto a eficiência energética quanto a formação de poluentes [Nathan et al, 2012].

Diante desta questão, o presente trabalho pretende avaliar o comportamento da radiação térmica emitida por chamas laminares, não pré-misturadas, produzidas a partir da mistura do combustível gás natural (GN) com o inerte dióxido de carbono (CO_2) em diferentes proporções. Para realizar o estudo, será montada uma bancada de medição constituída principalmente por um sensor de fluxo de calor radiante e um queimador do tipo representativo de aplicações industriais. O uso desta mistura como combustível da chama tem como justificativa simular o processo de queima dos gases retirados das reservas de petróleo e gás na faixa do subsolo oceânico brasileiro, que antecede a densa camada de sal, chamado pré-sal, muito explorado atualmente na bacia sedimentar de Santos (RJ e SP) e no Parque das Baleias (ES). Segundo Gouveia, 2010, o gás de alguns reservatórios do pré-sal é contaminado com uma grande quantidade de CO_2 . No campo de Tupi, por exemplo, a presença de CO_2 pode chegar a 12%.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Chama laminar não pré-misturada

A principal característica de chamas laminares não pré-misturadas, também chamadas de chamas laminares difusivas, é o fato de o combustível e o comburente não estarem misturados inicialmente. Neste caso, para que ocorra a reação de combustão, estes devem se misturar pelo processo de difusão de espécies químicas, sendo que o combustível e comburente se difundem em direção à frente de chama, enquanto que os produtos da combustão se difundem para longe desta. O comprimento efetivo da chama, denominado por L_f , é definido como sendo a distância ao longo do eixo central da chama, desde a saída do bocal de combustível até a frente de chama, como observado na figura 2.1 (a), [Turns, 2000].

2.2. Radiação térmica emitida por chamas

A radiação térmica emitida pela chama é uma fração da energia total liberada pelo combustível após sua queima. A fração de calor radiante [adimensional], ou seja, a fração de energia da chama que é irradiada para o ambiente é definida como:

$$X_R = Q_R/Q_T \quad (2.1)$$

onde Q_R é a energia total emitida para o ambiente [W], e $Q_T = \dot{m} H$ onde \dot{m} e H são a vazão mássica [kg/s], e o poder calorífico do combustível [J/kg], respectivamente, [Turns, 2000]. O termo Q_R pode ser obtido pela integração do fluxo de calor radiante, q_r [W/m²], ao longo de um invólucro cilíndrico de raio R posicionado em torno da chama, com eixo central coincidente com o eixo axial da chama, de acordo com a seguinte equação:

$$Q_R = \int q_r dA = \int_{x_i}^{x_f} q_r 2 \pi R dx = 2 \pi R \int_{x_i}^{x_f} q_r dx \quad (2.2)$$

onde x é a posição vertical do sensor [m], sendo $x = 0$ a posição coincidente com o plano do bocal do queimador. Além disso, R é a distância horizontal do sensor até o eixo central da chama [m], [Sivathanu et al., 1993].

Os valores experimentais de fração radiante encontrados na literatura são baseados nas equações (2.1) e (2.2), sempre integrando o fluxo de calor radiante, medido por um sensor, ao longo de um cilindro virtual em torno da chama. Apesar disso, alguns autores desenvolveram correlações aproximadas para a determinação de X_R de determinados combustíveis. Tan, 1967, por exemplo, propôs uma relação da fração de calor radiante em função da massa molecular do combustível, M [g/mol]:

$$X_R = 0,048 \sqrt{M} \quad (2.3)$$

Para os combustíveis metano e propano, as massas moleculares são 16 e 44 g/mol, respectivamente. Portanto, segundo a equação (2.3), X_R para os combustíveis metano e propano, seriam aproximadamente 20% e 33%, respectivamente.

Outros autores desenvolveram correlações para a determinação de X_R dependentes da velocidade de escoamento do jato de combustível e da geometria da chama. Cook et al., 1987, por exemplo, relacionou a fração de calor radiante de uma determinada chama produzida a partir do combustível metano, segundo a seguinte equação:

$$X_R = 0,321 - 0,418 x 10^{-3} u_j \quad (2.4)$$

onde u_j é a velocidade de escoamento do jato de combustível [m/s].

O Instituto Americano do Petróleo recomenda por meio da equação 2.5, uma distância mínima R [m], entre um Flare e um objeto no qual a exposição à radiação deve ser limitada.

$$R = \sqrt{\frac{\tau X_R Q_T}{4 \pi q_p}} \quad (2.5)$$

onde τ é a transmissibilidade no meio [adimensional] e q_p é a radiação a que o objeto pode ser exposto [W/m^2], [API, 1969]. Rearranjando a equação (2.5), podemos definir a fração radiante em termos da radiação térmica q_p [W/m^2] medida a uma distância R [m], da chama e do calor total liberado pelo combustível após a queima Q_T [W]:

$$X_R = \frac{q_p 4 \pi R^2}{Q_T \tau} \quad (2.6)$$

2.3. Sensores fotocondutores

Sensores fotocondutores de seleneto de chumbo (PbSe) são amplamente utilizados para detectar radiação, na faixa do infravermelho próximo, isto é, de 1,0 a 4,8 μm . Os mecanismos do sensor PbSe são diferentes dos fotodiodos, os quais geram uma corrente elétrica quando expostos à radiação. No caso dos fotocondutores, a resistência elétrica do material é reduzida quando exposto à radiação.

A teoria de funcionamento dos sensores com material fotocondutor é simples. A radiação incidente causa uma diminuição na resistência elétrica do material. Esta alteração de resistência, por sua vez, causa uma alteração na tensão medida nas extremidades de um resistor ligado em série no circuito. Assim, a fotossensibilidade do sensor é a expressa em

unidades de V/W, ou seja, uma relação entre a tensão de resposta do sensor e o fluxo de calor incidente.

O mecanismo de detecção baseia-se na condutividade da película fina com área ativa. O sinal de resposta do sensor é definido pela seguinte equação:

$$V_{resposta} = \frac{R_{resistor}}{R_{PbSe} + R_{resistor}} V_{entrada} \quad (2.7)$$

Uma alteração $\Delta V_{resposta}$ ocorre, então, devido a uma alteração ΔR_{PbSe} na resistência do detector quando a luz atinge a superfície do material fotocondutor. A equação 2.8 descreve este fenômeno.

$$\Delta V_{resposta} = \frac{R_{resistor} V_{entrada}}{(R_{PbSe} + R_{resistor})^2} \Delta R_{PbSe} \quad (2.8)$$

Esta configuração para medição é simples, mas não é recomendada para medir radiação térmica com precisão, devido ao alto nível de ruído gerado e à baixa alteração no valor de tensão elétrica medida saída do fotocondutor. Para isso, recomenda-se o uso de um filtro e um amplificador de sinal elétrico. No caso do sensor fotocondutor PbSe da Thorlabs, estes dois componentes são instalados internamente equipamento [Thorlabs, 2013].

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os métodos descritos na literatura para avaliar a radiação térmica emitida por chamas, e por consequência, a fração de calor radiante remetem ao uso de um determinado sensor fotocondutor. Este sensor, também chamado de radiômetro, é capaz de medir o fluxo de calor radiante incidente em uma pequena placa de material fotocondutor instalada no sensor.

3.1. Estudos experimentais realizados por Sivathano e Gore, 1993.

Sivathano e Gore, 1993, realizaram medições da radiação térmica emitida por chamas produzidas por três diferentes combustíveis (CH_4 , C_2H_2 e C_2H_4) utilizando um radiômetro posicionado a uma distância constante $R = 0,5 L_f$ do eixo axial da chama. Este sensor foi deslocado verticalmente desde o plano do bocal do queimador até o ponto onde o fluxo alcançava 5% do valor máximo medido. Este ponto variava tipicamente entre $1,5 L_f$ e $2,5 L_f$. A figura 3.1 (a) apresenta a disposição do sensor em relação à chama utilizada.

A partir dos resultados encontrados e de valores de X_R retirados da literatura, Sivathano e Gore, 1993, obtiveram um coeficiente C^* [adimensional], dependente apenas de x/L_f e R/L_f . Este coeficiente foi calculado para cada posição vertical segundo a seguinte equação:

$$C^* = \frac{4 \pi R^2 q_r}{Q_T X_R} \quad (3.1)$$

As duas curvas apresentadas na figura 3.1 (b) representam os limites mínimo e máximo dos valores do coeficiente C^* calculados a partir dos resultados experimentais obtidos por Sivathano e Gore, 1993, em função da posição adimensional x/L_f . Com base nestes resultados, verifica-se que as medições de fluxo de calor radiativo em $0,5 < x/L_f < 0,7$ produzirão uma estimativa da taxa radiante total da chama com $C^* = 0,85$.

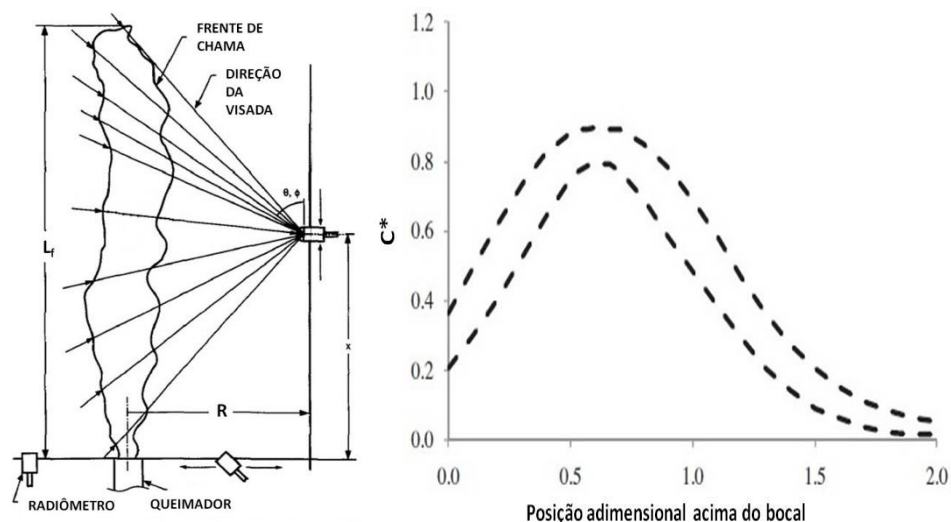


Figura 3.1: (a) Disposição do sensor em relação à chama e (b) comportamento do coeficiente C^* em função da altura adimensional x/L_f , [Sivathano e Gore, 1993].

3.2. Estudos experimentais realizados por Ditaranto e Oppelt, 2011.

Ditaranto e Oppelt, 2011, também realizaram medições experimentais do fluxo de calor radiante produzido por chamas laminares não pré-misturadas. O combustível empregado neste caso foi apenas metano, porém ar puro e diferentes composições de O_2 e CO_2 foram utilizados como oxidante. Diferentes vazões de combustível foram também utilizadas a fim de estudar o comportamento para valores distintos de número de Reynolds na saída do bocal.

Assim como em Sivathano e Gore, 1994, um sensor de fluxo de calor foi utilizado para medição do fluxo radiante emitido pela chama. O sensor foi posicionado a uma distância horizontal R fixa em relação ao eixo axial da chama e em diferentes posições ao longo deste eixo axial, iniciando a partir do plano do bocal do queimador até o ponto onde o sensor era incapaz de medir o fluxo radiante, pelo fato do valor deste nesta posição ser muito pequeno. A figura 3.2 (a) apresenta o comportamento do fluxo de calor radiante ao longo do comprimento da chama. Nota-se que conforme se aumenta a concentração de O_2 no CO_2 , maior é o fluxo de calor, porém menor é o comprimento da chama.

Para calcular a fração de energia radiante emitida pela chama, Ditaranto e Oppelt, 2011, realizaram a integração do fluxo de calor ao longo do comprimento da chama utilizando uma equação similar à equação (2.2), a fim de obter o valor da energia total irradiada pela chama para o ambiente, assim como fizeram Sivathano e Gore, 1994. Posteriormente, usando a equação (2.1), a fração radiante é também calculada e apresentada na figura 3.2 (b).

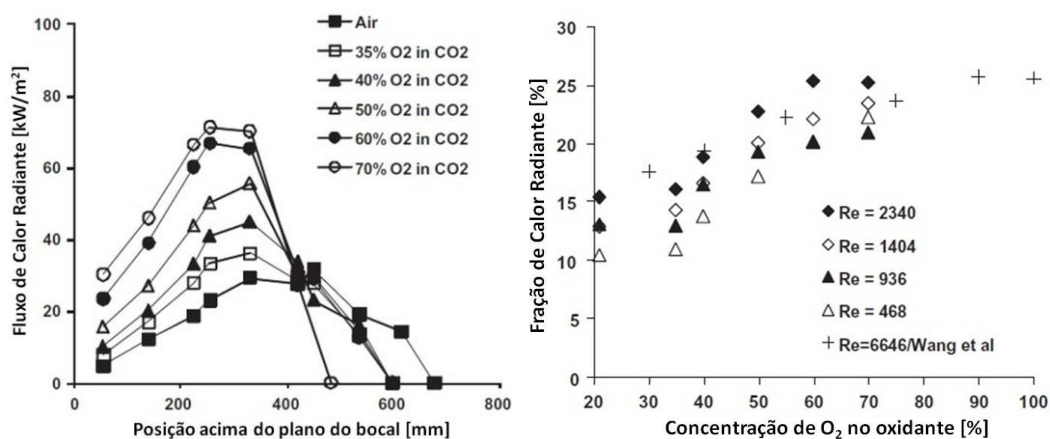


Figura 3.2: (a) Comportamento do fluxo de calor em função da altura e (b) comportamento da fração radiante em função da composição do oxidante [Ditaranto e Oppelt, 2011].

3.3. Estudos realizados por Hankinson et al., 2011.

Hankinson et al., 2011, relatou uma análise de diferentes métodos para se determinar as características radiativas de chamas. Dentre os diferentes métodos estudados, o mais simples foi descrito como sendo a consideração da chama como uma fonte de calor pontual localizada no eixo axial da chama, a uma altura de meio comprimento de chama. Para se estimar o valor de X_R usando este método, considerou-se que a chama, simplificada por uma fonte pontual, irradiava calor para todas as direções uniformemente, criando o que se pode considerar esferas virtuais concêntricas de isofluxos de calor. Com isso, o valor da energia total irradiada para o ambiente pode ser calculado como o produto entre a área superficial de uma esfera de raio R , ($A_s = 4 \pi R^2$) e o fluxo de calor por unidade de área, (q_r), medido no ponto localizado a mesma distância R da fonte de calor pontual. A equação apresentada por Hankinson et al., 2011, portanto, se mostrou idêntica à equação (2.6), e o método foi considerado como satisfatório para casos em que a distância R entre a fonte de calor e o ponto de medição era superior a duas vezes e meia o comprimento de chama.

Além da consideração da chama como uma fonte de calor pontual, Hankinson et al., 2011, desenvolveram métodos para descrever o comportamento radiativo de chamas como uma série de fontes de calor pontuais de igual valor, situadas ao longo do eixo central da chama, figura 3.3 (a). Por último, modelos sólidos de chamas como um cilindro, um cone ou dois cones opostos foram desenvolvidos, figura 3.3 (b). Nestes modelos, o fluxo de calor em determinado ponto no espaço é calculado levando em consideração o fluxo emitido por diferentes fontes de calor situadas ao longo do eixo axial da chama. Este fluxo emitido por cada fonte é calculado por um programa computacional e depende da forma geométrica do modelo escolhido.

A fim de validar seus modelos e equações, Hankinson et al., 2011 comparou trabalhos anteriores; na figura 3.3 (c) é apresentado o comportamento do coeficiente adimensional C^* para medições realizadas a diferentes distâncias R da chama. Fica evidente que conforme o ponto de medição é distanciado da chama, mais esta se aproxima de uma fonte de calor, pois o fluxo ao longo da posição vertical tem pouca variação devido às esferas virtuais de isofluxo descritas anteriormente.

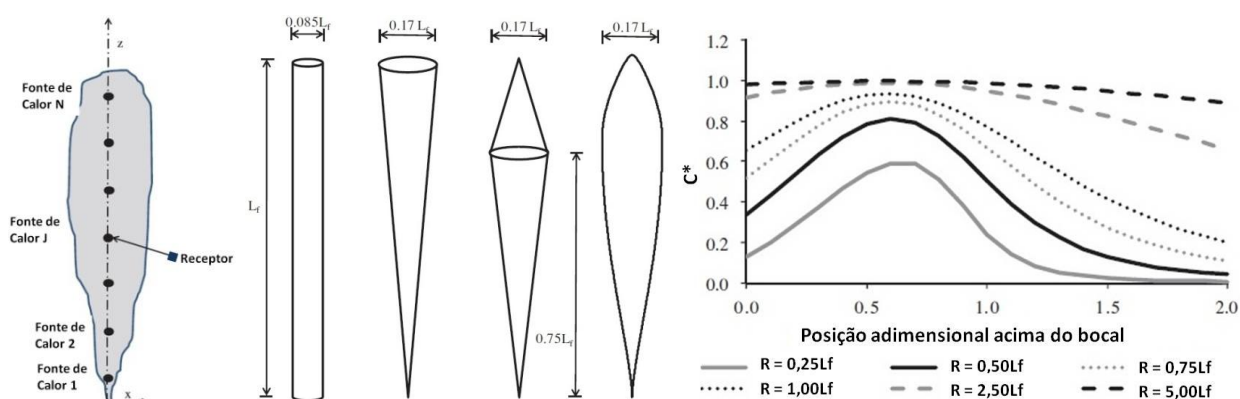


Figura 3.3: (a) Modelo de fontes pontuais, (b) modelos sólidos de chamas e (c) comportamento do de C^* para diferentes distâncias R [Hankinson et al., 2011].

4. METODOLOGIA

4.1. Procedimento de medição de fluxo de calor

Para realizar as medições de fluxo de calor radiante emitido por determinada configuração de chama, usando o sensor fotocondutor, a bancada foi montada de acordo com a descrição que será apresentada na seção 4.4. Uma régua foi fixada na parede do laboratório e o queimador foi afastado desta até a distância de interesse, garantindo assim que a distância

horizontal R entre o centro bocal do queimador e o a face frontal do radiômetro permanecesse constante ao longo do período de medição de determinada configuração de chama. Inicialmente o sensor foi posicionado a uma posição x abaixo do plano do bocal do queimador, a uma distância longe o suficiente da chama de modo que o fluxo de calor incidente atingia um valor de cerca de 10% do fundo de escala do sensor.

Devido ao comportamento quanto à resposta do sensor, uma medição contínua em cada posição x não foi possível de ser realizada. Sendo assim, com a chama estável, um anteparo é posicionado entre a chama e o radiômetro, antes de iniciar a gravação dos valores de resposta elétrica do sensor. Para adquirir o valor pontual, retira-se o anteparo do sistema, permitindo que a radiação atinja o radiômetro. Neste momento, um pico de tensão de resposta é observado, seguido de um decaimento logarítmico até que o sinal de resposta atinge o valor nulo. Em seguida, o anteparo é novamente posicionado entre a chama e o radiômetro, a fim de se obter o segundo valor de pico de tensão de resposta.

Este procedimento é repetido três vezes para cada altura de medição, resultando em seis valores de tensão elétrica de resposta, que posteriormente são relacionadas a um determinado valor de fluxo de calor radiante. A figura 4.1 (a) mostra o gráfico da tensão de resposta do sensor adquirida pelo equipamento em uma configuração particular de chama. Os momentos identificados pela letra "A" são os instantes em que se retira o anteparo do sistema. Por outro lado, os momentos identificados pela letra "B" são os instantes em que se recoloca o anteparo entre a chama e o sensor.

Tendo adquirido os seis valores de resposta do sensor para determinada posição, este é deslocado verticalmente para o próximo ponto de medição, e o procedimento é repetido. A posição $x = 0$ é considerada como sendo a posição coincidente ao plano do bocal do queimador. Sendo assim, as posições abaixo deste plano possuem valores negativos e as acima, positivos. O processo de medição é finalizado no momento em que a posição do sensor ao longo de x acarreta em uma distância muito elevada, e com isso fluxo de calor por este medido atinge valores muito baixos, cerca de 10% do fundo de escala do sensor. A figura 4.1 (b) apresenta a disposição do sensor em relação à chama, juntamente com os parâmetros L_f (comprimento de chama), x (posição do sensor), e R (raio do cilindro virtual em torno da chama).

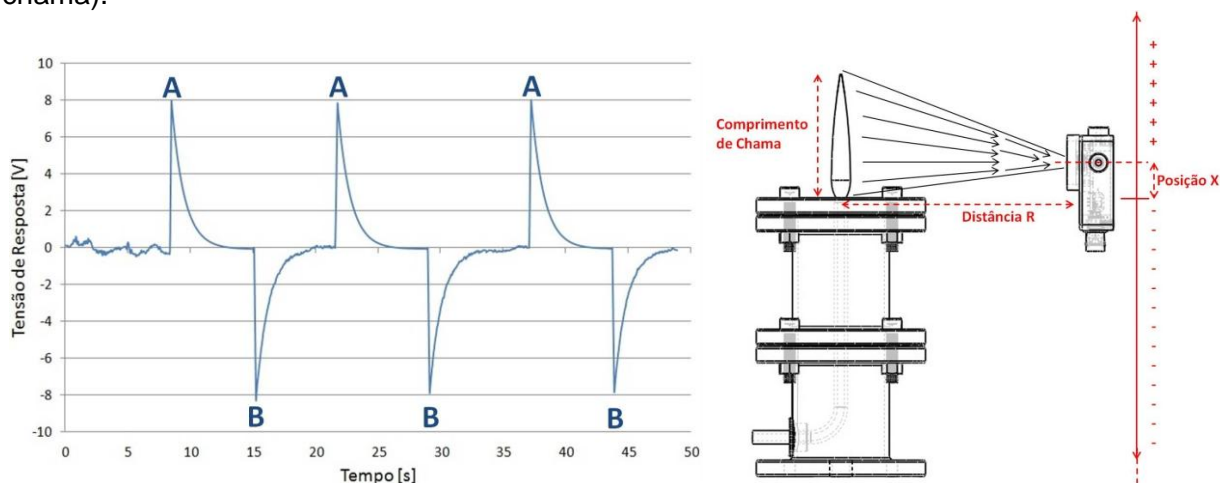


Figura 4.1: (a) Tensão elétrica de resposta do sensor quando exposto à chama e (b) Esquema de medição de fluxo de calor.

4.2. Procedimento de medição de comprimento de chama

O comprimento de chama L_f foi medido com o auxílio de uma câmera fotográfica digital comercial, e de uma trena graduada, com comprimento máximo de 5 m e resolução de 1 mm. A câmera foi posicionada em um tripé e com esta, foram retiradas fotografias das chamas em

cada patamar de vazão. Posteriormente, foram computadas dos valores de L_f para cada chama e uma média aritmética dos valores foi realizada.

4.3. Queimador Burke Shumman

O queimador usado para produzir a chama foi construído seguindo o projeto de Burke Shumman [Burke e Shumman, 1928]. Este queimador possui duas câmaras separadas por uma tela de malha fina e um tubo interno alimentado por combustível. Na câmara inferior, são depositadas esferas de vidro de 1,8 mm de diâmetro médio, a fim de se obter uma distribuição uniforme da velocidade do ar. O tubo interno, por onde passa o combustível, possui um diâmetro interno de 4,7 mm, com um chanfro de 2,6 mm e 14° na extremidade [Nunes, 2012]. A figura 4.2 apresenta uma vista em corte deste queimador de chamas não pré-misturadas.

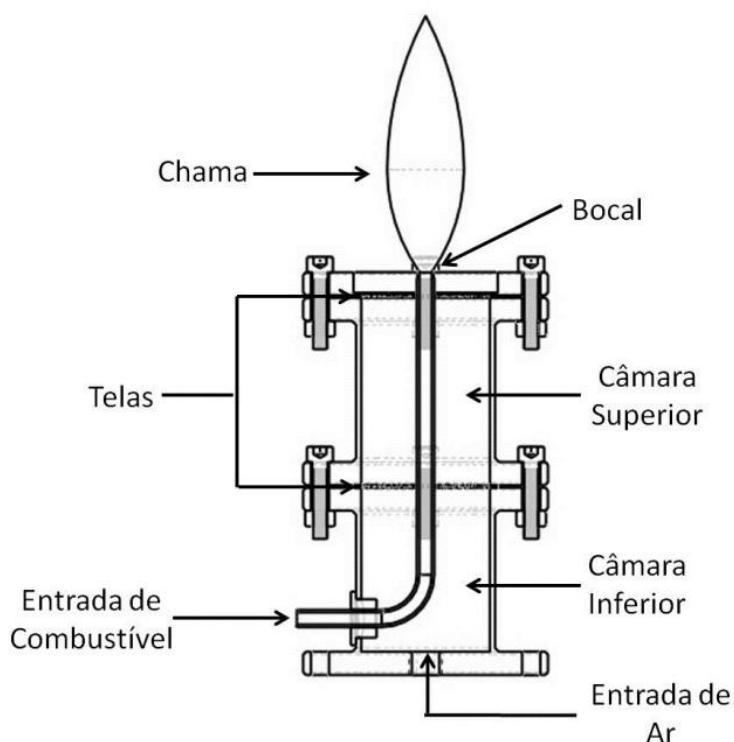


Figura 4.2: Bancada de ensaios de chama laminares não pré-misturadas.

4.4. Bancada experimental

Para medição do fluxo de calor radiante emitido pelas diferentes configurações de chama, foram utilizados três rotômetros, um para a vazão de ar, um para vazão de gás natural (GN) e outro para a vazão de dióxido de carbono (CO_2). O primeiro dos três rotômetros, utilizado para a medição e controle da vazão de ar, é calibrado para pressão atmosférica e temperatura de 21°C e possui escala de 15 a 160 litros por minuto (l/min) e precisão de $\pm 2\%$ do fundo de escala. Os dois outros rotômetros são calibrados para o combustível metano (CH_4), pressão atmosférica e temperatura de 21°C , e possuem precisão de $\pm 5\%$ do fundo de escala. Estes dois rotômetros possuem escalas de medição distintas, um possui escala de 0,15 a 1,4 l/min, e o outro, de 0,5 a 5 l/min.

A configuração da bancada é mostrada na Figura 4.3, descrita a seguir. O reservatório de ar comprimido é ligado por meio de uma linha rígida até uma válvula reguladora de pressão, que estabiliza a pressão em 7,5 bar. Uma linha flexível leva o ar comprimido até o rotômetro calibrado para ar, passando antes por uma válvula reguladora de vazão. Outra linha flexível conecta este rotômetro a uma conexão localizada na parte inferior do queimador.

O reservatório de CO₂ é ligado por meio de uma linha rígida até uma válvula reguladora de pressão, que estabiliza a pressão em 3,0 bar. Uma linha flexível leva o CO₂ até um dos rotômetros calibrados para CH₄, passando antes por uma válvula reguladora de vazão. Uma segunda linha flexível conecta este rotômetro a um dispositivo em Y para que o CO₂ seja posteriormente misturado ao GN.

O reservatório de GN é ligado por meio de uma linha rígida até uma válvula reguladora de pressão, que estabiliza a pressão em 3,0 bar. Uma linha rígida/flexível leva o GN até o segundo rotômetro calibrado para CH₄, passando antes por uma válvula reguladora de vazão. Uma segunda linha flexível conecta este terceiro rotômetro ao dispositivo em Y para que o GN seja posteriormente misturado ao CO₂. Uma terceira linha flexível longa faz a ligação entre o dispositivo em Y e a entrada de combustível do queimador.

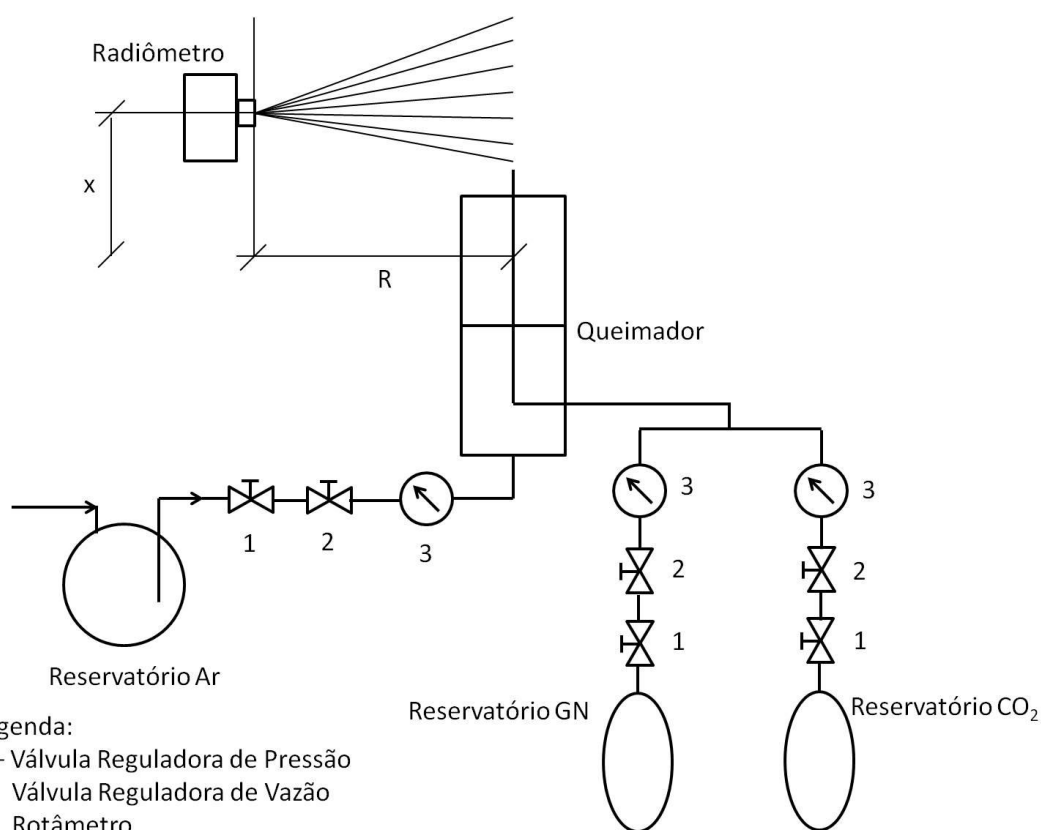


Figura 4.3 Configuração de montagem da bancada para medição do fluxo de calor radiante

4.5. Correção da vazão dos rotômetros

Como os rotômetros utilizados neste estudo para medição e controle da vazão de GN e CO₂ foram calibrados para uma vazão de CH₄, uma correção deve ser feita. Segundo Maurice e Dutra, 1999, nestes instrumentos, o fluido escoar em um tubo cônico vertical, sempre no sentido de baixo para cima, movimentando um flutuador. A posição do flutuador, neste caso, fornece a indicação da vazão de gás. Na utilização dos rotômetros, devem ser observadas tanto a pressão, quanto a temperatura em que foi executada a calibração, assim como o tipo de fluido utilizado neste procedimento. No caso de haver discrepâncias em algum desses parâmetros, torna-se necessário utilizar equações paramétricas com o objetivo de corrigir a leitura fornecida pelo instrumento. O procedimento de correção toma por base a expressão:

$$V_R = V_M F_c = V_M F_t F_d F_p \quad (3.1)$$

onde V_R corresponde à vazão corrigida, V_M à vazão mensurada F_c ao fator de correção da leitura do fluxímetro, F_t ao fator de correção devido à temperatura do fluido, F_d ao fator de correção devido à massa específica do fluido e F_p ao fator de correção devido à pressão do fluido. O fator F_d , por exemplo, pode ser calculado por:

$$F_d = \sqrt{\frac{d_{cal}}{d_t}} \quad (3.2)$$

onde T_{cal} é a temperatura à qual o instrumento foi calibrado ($^{\circ}\text{C}$); T_t é a temperatura de trabalho ($^{\circ}\text{C}$); d_{cal} é a densidade relativa ao ar, do fluido com que o instrumento foi calibrado; d_t é a densidade relativa ao ar, do fluido utilizado; P_t é a pressão no interior do instrumento, com o fluido utilizado (bar); P_a é a pressão atmosférica (bar); P_{cal} é a pressão de calibração do instrumento (bar).

4.6. Sensor fotocondutor

Um sensor fotocondutor, da marca Thorlabs, modelo PDA20H, figura 4.4 (a), é utilizado para realizar as medições de fluxo de radiação térmica. Este sensor realiza medições na faixa de comprimento de onda de $1,5 \mu\text{m}$ a $4,8 \mu\text{m}$, com o pico de resposta de $2 \times 10^5 \text{ V/W}$ e incerteza de $\pm 5\%$ do fundo de escala quando o comprimento de onda da radiação incidente é cerca de $4,0 \mu\text{m}$. O gráfico apresentado na figura 4.4 (b) mostra a curva de sensibilidade do radiômetro em relação ao comprimento de onda da radiação incidente, [Thorlabs, 2013].

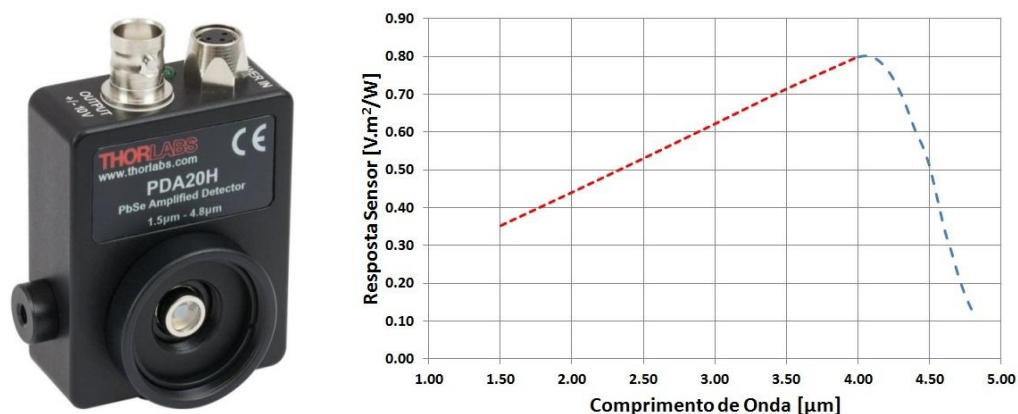


Figura 4.4: (a) Sensor de fluxo radiante PDA20H Thorlabs e (b) gráfico da resposta relativa.

4.7. Calibração do Sensor Fotocondutor

Para obter o valor instantâneo do fluxo de calor radiante relativo a cada medição, foi necessário calibrar o sensor, baseando-se na curva de resposta do fabricante e em distribuições espectrais de chamas laminares [Zheng et al., 2002] e [Ji et al., 2004]. Dependendo da intensidade e do comprimento de onda da radiação incidente no sensor, é produzida uma tensão correspondente. A resposta do sensor é máxima para a radiação incidente com comprimento de onda de $4,0 \mu\text{m}$, sendo que a taxa é de $2 \times 10^5 \text{ V/W}$. Como a área efetiva do sensor é de $4,0 \text{ mm}^2$, a resposta máxima do sensor será de $0,80 \text{ V}\cdot\text{m}^2/\text{W}$. Conforme o comprimento de onda da radiação incidente é alterado, esta taxa deve ser alterada para uma determinada percentagem do valor máximo, de acordo com o gráfico apresentado na figura 4.4(b). Duas equações foram usadas para descrever a curva da figura 4.4 (b), sendo as seguintes:

$$IR_A = 0,1794 \lambda + 0,0826 [\text{V}\cdot\text{m}^2/\text{W}] \quad (3.3)$$

$$IR_B = 2,9025 \lambda^4 - 49,661 \lambda^3 + 316,95 \lambda^2 - 894,91 \lambda + 944,52 [\text{V}\cdot\text{m}^2/\text{W}] \quad (3.4)$$

onde λ é o comprimento de onda da radiação incidente, em micrometros (μm), IR_A é a resposta do sensor, em Volts por Watts por metro quadrado ($\text{V}\cdot\text{m}^2/\text{W}$), para $1,5 < \lambda < 4,0$ e IR_B é a resposta do sensor, em ($\text{V}\cdot\text{m}^2/\text{W}$), para $4,0 \leq \lambda < 4,8$.

Como as chamas emitem radiação em diferentes comprimentos de onda foi necessário quantificar o fluxo radiante total emitido em cada faixa de comprimento de onda, denominado como I_λ . No estudo de Zheng et al., 2002, foram realizadas medições de fluxo de calor radiante emitido por chamas turbulentas não pré-misturadas, as quais apresentaram a radiação emitida para cada faixa do espectro, segundo a distribuição mostrada na figura 4.5(a). Estes resultados foram comparados com o estudo realizado por Ji et al., 2004, no qual o fluxo de calor radiante emitido por chamas laminares pré-misturadas também foi medido para faixas diferentes de comprimento de onda, como mostra a figura 4.5(b).

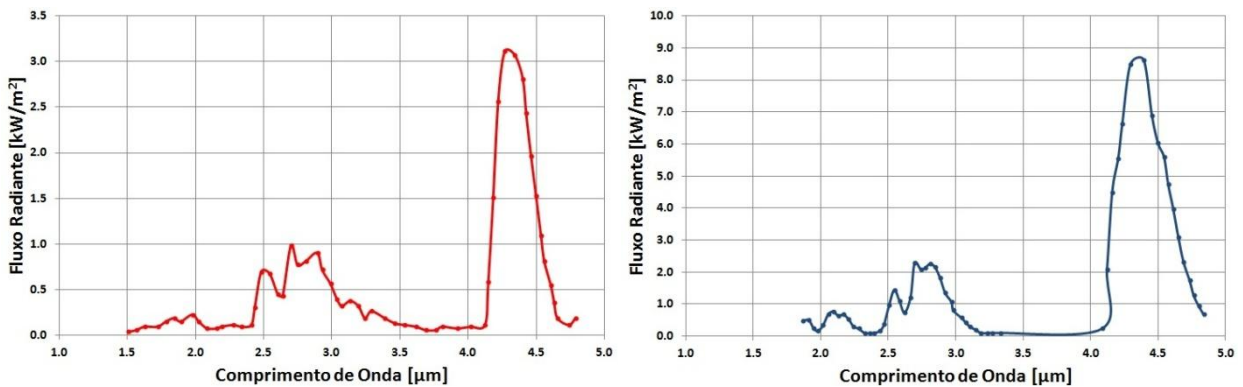


Figura 4.5: (a) Intensidade de radiação de chamas turbulentas não pré-misturadas [Zheng et al, 2002] e (b) Intensidade de radiação de chamas laminares pré-misturadas [Ji et al, 2004].

Os resultados destes dois estudos se mostraram muito semelhantes. Para obter o comportamento final de resposta do sensor, para esta condição, ou seja, o $IR_{MÉDIO}$ uma integração numérica foi realizada, representada pela equação (3.5), considerando as equações (3.3) e (3.4) e as distribuições apresentadas nas figuras 4.5(a) e (b). Usando os dados de Zheng et al., 2002, o valor de $IR_{MÉDIO}$ obtido foi de $0,6100 \text{ V/W/m}^2$. Utilizando os resultados de Ji et al., 2004, o valor de $IR_{MÉDIO}$ obtido foi de $0,5634 \text{ V/W/m}^2$. Para o presente estudo, portanto, foi considerado o valor de $IR_{MÉDIO} = 0,5984 \text{ V/W/m}^2$, uma média dos dois valores anteriores. Para se obter o valor do fluxo de calor q_r , faz-se o uso da equação (3.6), onde $V_{resposta}$ é a resposta do sensor, em Volts.

$$IR_{MÉDIO} = \frac{\int_{1,5\mu\text{m}}^{4,0\mu\text{m}} IR_A I_\lambda d\lambda}{\int_{1,5\mu\text{m}}^{4,0\mu\text{m}} I_\lambda d\lambda} + \frac{\int_{4,0\mu\text{m}}^{4,8\mu\text{m}} IR_B I_\lambda d\lambda}{\int_{4,0\mu\text{m}}^{4,8\mu\text{m}} I_\lambda d\lambda} \quad (3.5)$$

$$q_r = V_{resposta}/IR_{MÉDIO} \quad (3.6)$$

4.8. Aquisição de dados

Para realizar a leitura da tensão de resposta do sensor fotocondutor, foi utilizada uma unidade de aquisição, comutação e registro de dados da marca Agilent Technologies, modelo 34970A, conectado a um computador. Este equipamento é capaz de realizar medições de tensão contínua em diferentes faixas. Para este caso, é utilizada a faixa de até 10 V, com incerteza de 0,0035% do valor medido mais 0,0005% do valor de fundo de escala. Para o tratamento dos dados, é utilizado um software próprio do equipamento juntamente com planilhas de dados [Agilent Technologies, 2013].

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O poder calorífico indica a energia latente do combustível; parte desta energia é liberada em forma de calor durante a combustão. Um dos principais mecanismos de transferência de calor é a radiação, sendo que cerca de 95,6% desta pequena parcela da energia é emitida na faixa de comprimentos de onda de 1,45 a 14,5 μm , [Parent et al., 2010]. Apesar de conter a maior intensidade, apenas de radiação emitida entre 1,5 e 4,8 μm pôde ser medida neste trabalho devido às limitações do sensor. Devido a esta limitação, os resultados dos valores de fração de energia radiante se mostraram inferiores aos encontrados na literatura.

O fluxo de calor radiante foi medido para 10 diferentes configurações de chamas laminares não pré-misturadas, produzidas utilizando combinações de gás natural (GN) e dióxido de carbono (CO_2), segundo o método descrito na seção 4.1., a fim de analisar o comportamento da fração de energia irradiada para o ambiente pela chama. Na Tabela 5.1 são apresentados os diferentes parâmetros controlados durante todo o processo de medição, bem como os resultados obtidos a partir destes testes. No APÊNDICE I são apresentados os demais parâmetros, propriedades e resultados pertinentes.

Tabela 5.1 - Parâmetros utilizados nos ensaios de fluxo de calor radiante.

| Configuração de Chama: | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| R [mm] | 310 | 440 | 500 | 540 | 500 | 500 | 500 | 540 | 540 | 540 |
| L_f [mm] | 70 | 130 | 170 | 180 | 175 | 180 | 185 | 185 | 190 | 200 |
| R/L_f | 4.43 | 3.38 | 2.94 | 3.00 | 2.86 | 2.78 | 2.70 | 2.92 | 2.84 | 2.70 |
| Vazão GN [l/min] | 0.20 | 0.44 | 0.59 | 0.79 | 0.59 | 0.59 | 0.59 | 0.79 | 0.79 | 0.79 |
| Vazão CO_2 [l/min] | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.12 | 0.24 | 0.39 | 0.15 | 0.33 | 0.54 |
| Concentração de CO_2 no combustível | 0% | 0% | 0% | 0% | 17% | 29% | 40% | 16% | 30% | 41% |
| Energia Irradiada abaixo do bocal | 26.67% | 31.56% | 36.10% | 31.78% | 31.99% | 32.08% | 30.87% | 30.48% | 30.23% | 31.34% |
| Energia Irradiada acima do bocal | 73.33% | 68.44% | 63.90% | 68.22% | 68.01% | 67.95% | 69.13% | 69.52% | 69.77% | 68.66% |
| Q_R [W] | 11.96 | 24.81 | 32.96 | 42.16 | 28.85 | 26.68 | 27.83 | 36.65 | 29.34 | 31.94 |
| Q_T [W] | 127.28 | 286.38 | 381.85 | 509.13 | 381.85 | 381.85 | 381.85 | 509.13 | 509.13 | 509.13 |
| X_R | 9.40% | 8.66% | 8.63% | 8.28% | 7.56% | 6.99% | 7.29% | 7.20% | 5.76% | 6.27% |

A distância R para as configurações de chama 01 a 04 foram escolhidas de modo que o fluxo máximo medido pelo sensor, usualmente quando a posição x se encontrava entre $0,5L_f$ e $0,7L_f$, assim como observado por Sivathano e Gore, 1993, não atingisse valores superiores a 90% do valor de fundo de escala do mesmo, a fim de garantir que os resultados obtidos fossem válidos. No caso das configurações 05 a 10, procurou-se repetir os mesmos valores de distância R , para a vazão de GN de referência, para fins de comparação posteriores dos resultados.

As vazões volumétricas apresentadas na Tabela 5.1 foram corrigidas utilizando o fator de correção devido à densidade do fluido, segundo as equações (3.1) e (3.3). Os fatores de correção da vazão devido à temperatura e à pressão do fluido não se fizeram necessárias, pois a variação destes não foi significativa.

Nas quatro primeiras configurações de chama utilizadas, apenas GN foi usado como combustível. Nas seis demais, foram utilizadas diluições do combustível em CO_2 , conforme mostrado na tabela 5.1.

É importante salientar que, no caso do presente estudo, o fluxo radiante foi mensurado em posições tanto acima, como também abaixo do plano do bocal do queimador, diferente dos estudos realizados anteriormente por Sivathano e Gore, 1993, e Ditaranto e Oppelt, 2011, em que apenas alturas acima do bocal foram utilizadas. O principal motivo pelo qual se fez necessário a realização das medidas abaixo do plano do bocal é o fato de que a energia da

chama é irradiada para todas as direções, inclusive para baixo, atravessando o plano acima descrito.

A radiação transmitida nesta direção é de extrema importância quando se estuda queimadores de rejeito de plataformas petrolíferas e refinarias em solo, pois os equipamentos sensíveis à radiação e os trabalhadores estão normalmente localizados abaixo da chama. Os resultados mostram que da radiação total emitida pela chama para o ambiente, cerca de 30% é recebida nas posições abaixo do plano do bocal da chama, e o restante, nas posições acima. Como a medição do fluxo de calor em posições ao longo de $x = 0$, pra diferentes valores de R , como Sivathano e Gore, 1993, realizaram, não foi possível, visto que o fundo de escala de medição do sensor seria alcançado facilmente ao aproximar este da chama, foi decidido que a medição abaixo de $x = 0$, na distância R , poderia estimar o fluxo de calor.

As figuras 5.1 e 5.2 apresentam o comportamento do fluxo de radiação térmica emitido por diferentes configurações de chama, calculados segundo a seção 3.5. e mensurados com a ajuda do sensor fotocondutor ao longo da posição x a uma distância R . A partir destas figuras verifica-se primeiramente que o comportamento do fluxo radiante encontrado neste estudo é muito semelhante ao encontrado na figura 3.3 (c), para o caso de $R = 2,5L_f$, em que este fluxo tem uma variação pequena ao longo da posição vertical de medida. Outra questão importante a ser apontada é a quantidade de radiação sendo emitida abaixo do plano do bocal, indicando que a medição nestes pontos é obrigatória quando a distância R é da ordem de $2,5L_f$ ou mais.

Analisando as figuras 5.1 e 5.2 nota-se que as posições verticais de medida que mais contribuem para a integração da energia total irradiada para o ambiente ficam na faixa de -100 mm a 300 mm, que neste caso representa cerca de $0,5L_f$ abaixo e $1,5L_f$ acima do plano do bocal. Isso indica que a temperatura tem grande influência na fração de calor radiante da chama, pois nestas posições o sensor está recebendo o fluxo proveniente das partículas de fuligem e dos gases que combustão que se encontram em alta temperatura. A contribuição restante é devido aos gases de combustão que se encontram acima da chama a temperaturas ainda elevadas, porém inferiores a temperatura dos gases próximos da frente de chama.

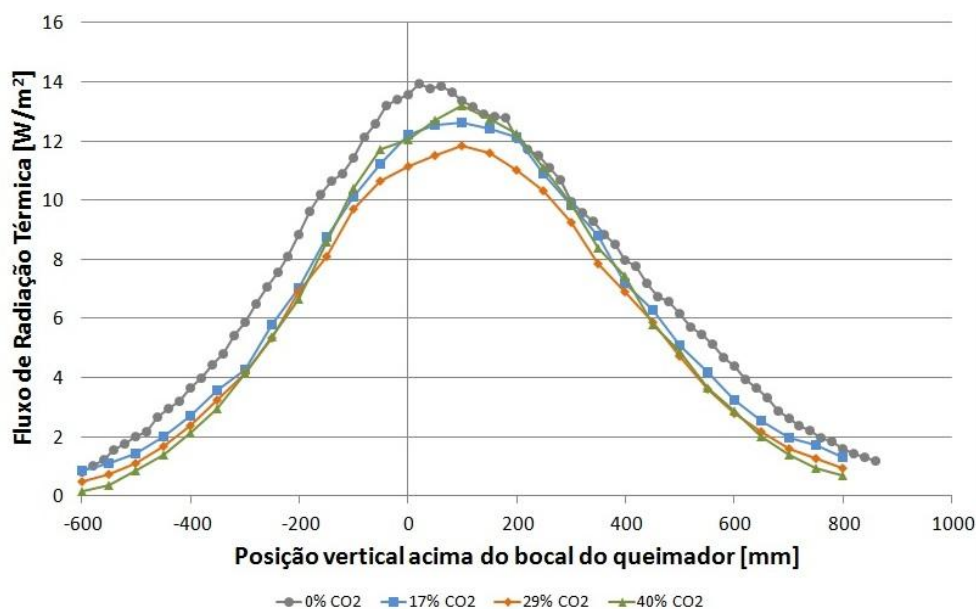


Figura 5.1: Comportamento do fluxo de radiação em função de x para chama produzida com vazão de 0,59 l/min de GNV e concentrações de CO_2 .

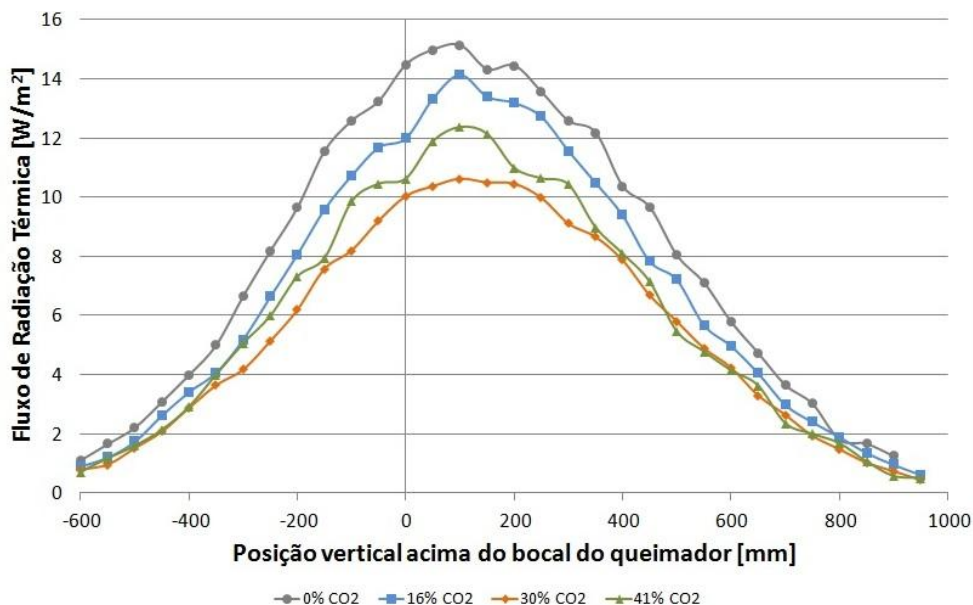


Figura 5.2: Comportamento do fluxo de radiação em função de x para chama produzida com vazão de 0,79 l/min de GNV e concentrações de CO_2 .

Depois de realizadas todas as medidas de fluxo de calor radiante ao longo das posições verticais x para as 10 configurações de chama escolhidas, a fração de calor radiante foi calculada com base na equação (2.1), considerando a vazão mássica e o poder calorífico do GN. A figura 5.3 apresenta o comportamento da fração de calor radiante em função da vazão de GN em cada chama. Além disso, pode-se observar a diferença dos resultados para diferentes concentrações do inerte CO_2 na composição do combustível.

Analisando a figura 5.3, pode-se afirmar que a fração de energia radiante possui uma tendência em diminuir seu valor, conforme a vazão de combustível é aumentada.

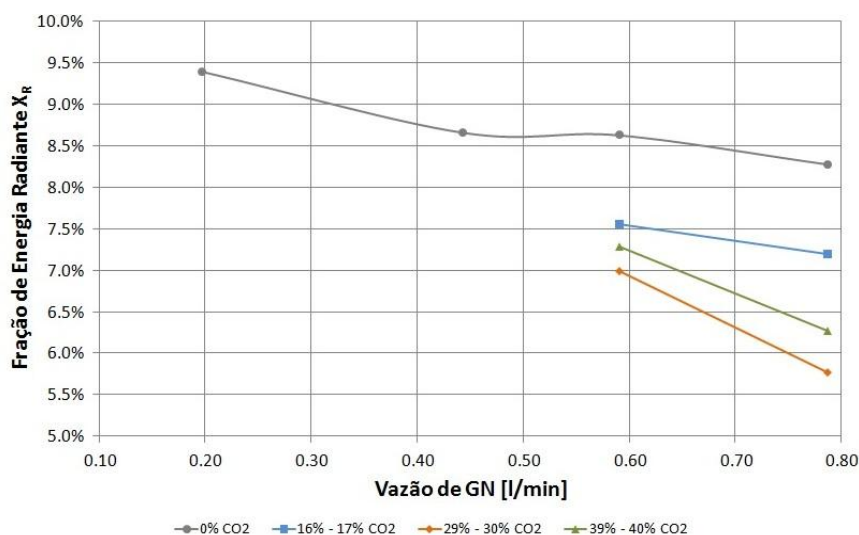


Figura 5.3: Comportamento da Fração de Energia Radiante em função da vazão de combustível.

Finalmente, pode-se dizer que a presença de CO_2 no combustível parece reduzir a fração de energia radiante da chama, como o esperado. A presença de 16% a 17% deste gás inerte no combustível da chama reduziu em cerca de 13% o valor de X_R , se comparado à chama de GN puro. A presença de 29% a 30% de gás inerte no combustível reduziu em cerca de 25% o valor de X_R , se comparado à chama de GN puro. Na chama com 40% a 41% de CO_2 , a presença de CO_2 reduziu em cerca de 20% o valor de X_R , se comparado à chama de GN puro.

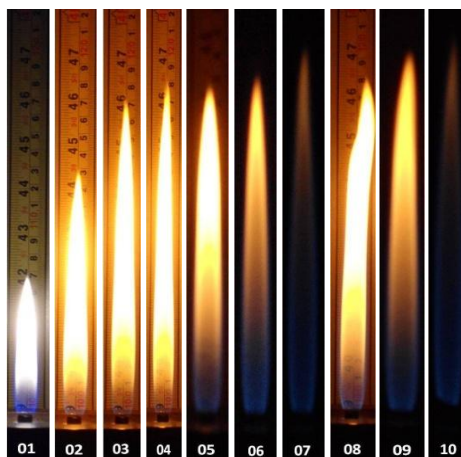


Figura 5.4: Comprimento de chama para diferentes configurações de chama.

6. CONCLUSÕES

O método de medição da radiação térmica emitida por chamas laminares não pré-misturadas, utilizando concentrações de gás natural e dióxido de carbono como combustível do queimador e um sensor fotocondutor de PbSe mostrou resultados coerentes com os disponíveis na literatura, principalmente quanto ao comportamento do fluxo radiante.

Os resultados globais aqui obtidos mostram que a fração de energia radiante é inversamente proporcional à vazão de combustível, assim como a equação 2.4 de Cook et al., 1987. Aumentando a taxa de liberação de gás combustível, uma menor fração da energia latente deste combustível será transferida para o ambiente na forma de radiação térmica.

A concentração de gás inerte no combustível também influencia a fração de energia irradiada pela chama. Aumentando a vazão de dióxido de carbono, porém mantendo a mesma vazão de gás natural, assim mantendo a mesma energia latente da chama, o fluxo de calor tende a diminuir.

O fluxo de calor medido em diferentes posições ao longo de um eixo paralelo ao eixo da chama possui um comportamento semelhante para diversas configurações de chama. O fluxo máximo é identificado na posição de cerca de 0,5 a 0,7 vezes o comprimento da chama, onde se sabe que a temperatura e a concentração de fuligem são mais elevadas, devido à coloração da chama neste local. O fluxo de calor medido ao longo deste eixo diminui conforme o sensor é posicionado para longe da posição de fluxo máximo, tendendo ao valor nulo, tanto na direção superior da chama, quanto na direção inferior.

A medição do fluxo de calor abaixo do plano do bocal do queimador deve ser executada caso a distância horizontal entre o queimador e o sensor for maior que cerca de duas vezes o comprimento da chama. O fluxo de calor emitido pela chama na direção do solo é cerca de 30% do fluxo total emitido pela chama, e por isso contribui significativamente para a integração da energia total emitida pela chama, além de ser parâmetro importante no estudo de queimadores de rejeito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agilent Technologies, <http://www.home.agilent.com>, acessado em 21/04/2013.

API; “**Guide for Pressure-Relieving and Depressuring Systems - American Petroleum Institute Recommended Practice 521**”. American Petroleum Institute, Edition 1, 1969.

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

Ditaranto, M.; Oppelt, T.; **“Radiative heat flux characteristics of methane flames in oxy-fuel atmospheres”**, Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 35, pp 1343 - 1350, 2011.

Cook, D. K.; Fairweather, M.; Hammonds, J.; Hughes, D. J.; **“Size and Radiative Characteristics of Natural Gas Flares. Part 1 – Field Scale Experiments”**, Chemical Engineering, Research and Design, vol. 65, 1987.

Fox, R.W.; McDonald, A.T. and Pritchard, P.J., **“Introduction to Fluid Mechanics”**, John Wiley & Sons, INC. 6th edition, 2004.

Gouveia, F.; **“Tecnologia nacional para extrair petróleo e gás do pré-sal”**, Conhecimento & Inovação, vol. 6, Nº 1, 2010.

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, vol. 159, pp 1165 - 1177, 2012.

Ji, J.; Gore J. P.; Sivathanu, Y. R.; Lim, J.; **“Fast infrared array spectrometer with a thermoelectrically cooled 160-element PbSe detector”**, Review of Scientific Instruments, vol. 75, Nº 2, pp 333 - 339, 2004.

Maurice, A. V.; Dutra J. C.; **“Importância Da Utilização E Calibração De Fluxímetros Empregados Na Soldagem A Arco Com Proteção Gasosa”**, XXV Encontro Nacional De Tecnologia Da Soldagem, 1999.

Nathan G. J.; Kalt P. A. M.; Alwahabi Z. T.; Dally B. B.; Medwell P. R.; Chan Q. N.; **“Recent advances in the measurement of strongly radiating, turbulent reacting flows”** Progress in Energy and Combustion Science, vol. 38 pp 41 - 61, 2012.

Nunes, C.; **“Estudo Experimental do Comprimento de Chamas Difusivas Laminares”**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Departamento de Engenharia Mecânica, 2012.

Parent, G.; Acem Z.; Lechêne, S.; Boulet, P.; **“Measurement of infrared radiation emitted by the flame of a vegetation fire”**, International Journal of Thermal Sciences, vol. 49, pp 555 - 562, 2010.

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.

Tan, S. H.; **“Flare System Design Simplified”**, Hydrocarbon Processing, vol. 46, 1967.

Thorlabs, **“PbS and PbSe Transimpedance Amplified Photodetectors”**, <http://www.thorlabs.com>, acessado em 20/04/2013.

Turns, R. S.; **“An Introduction to Combustion: Concepts and Applications”**, International Editions, 2nd edition, 2000.

Zheng, Y.; Sivathanu, Y. R.; Gore J. P.; **“Measurements and Stochastic Time and Space Series Simulations of Spectral Radiation in a Turbulent Non-Premixed Flame”**, Proceedings of the Combustion Institute, vol. 29, pp 1957 – 1963, 2002.

APÊNDICE I – PARÂMETROS E PROPRIEDADES

Tabela 01: Parâmetros e propriedades utilizados nas Equações

| Teste | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Posição Horizontal R [mm] | 310 | 440 | 500 | 540 | 500 | 500 | 500 | 540 | 540 | 540 |
| Altura da Chama L _r [mm] | 70 | 130 | 170 | 180 | 175 | 180 | 185 | 185 | 190 | 200 |
| Razão R/L _r | 4.43 | 3.38 | 2.94 | 3.00 | 2.86 | 2.78 | 2.70 | 2.92 | 2.84 | 2.70 |
| Distância entre Pontos Medidos [mm] | 20.00 | 20.00 | 20.00 | 50.00 | 50.00 | 50.00 | 50.00 | 50.00 | 50.00 | 50.00 |
| Posição Vertical Inicial [mm] | -300 | -500 | -600 | -600 | -600 | -600 | -600 | -600 | -600 | -600 |
| Posição Vertical Final [mm] | 600 | 740 | 860 | 950 | 800 | 900 | 900 | 950 | 950 | 950 |
| Massa Específica Ar [kg/m ³] | 1.1614 | 1.1614 | 1.1614 | 1.1614 | 1.1614 | 1.1614 | 1.1614 | 1.1614 | 1.1614 | 1.1614 |
| Viscosidade Dinâmica Ar [N.s/m ²] | 1.85E-05 | 1.85E-05 | 1.85E-05 | 1.85E-05 | 1.85E-05 | 1.85E-05 | 1.85E-05 | 1.85E-05 | 1.85E-05 | 1.85E-05 |
| Massa Específica CH ₄ [kg/m ³] | 0.6434 | 0.6790 | 0.6790 | 0.6790 | 0.6790 | 0.6790 | 0.6790 | 0.6790 | 0.6790 | 0.6790 |
| Viscosidade Dinâmica CH ₄ [N.s/m ²] | 1.12E-05 | 1.12E-05 | 1.12E-05 | 1.12E-05 | 1.12E-05 | 1.12E-05 | 1.12E-05 | 1.12E-05 | 1.12E-05 | 1.12E-05 |
| Massa Específica GNV [kg/m ³] | 0.6643 | 0.6643 | 0.6643 | 0.6643 | 0.6643 | 0.6643 | 0.6643 | 0.6643 | 0.6643 | 0.6643 |
| Viscosidade Dinâmica GNV [N.s/m ²] | 1.12E-05 | 1.12E-05 | 1.12E-05 | 1.12E-05 | 1.12E-05 | 1.12E-05 | 1.12E-05 | 1.12E-05 | 1.12E-05 | 1.12E-05 |
| Massa Específica CO ₂ [kg/m ³] | 1.7730 | 1.7730 | 1.7730 | 1.7730 | 1.7730 | 1.7730 | 1.7730 | 1.7730 | 1.7730 | 1.7730 |
| Viscosidade Dinâmica CO ₂ [N.s/m ²] | 1.49E-05 | 1.49E-05 | 1.49E-05 | 1.49E-05 | 1.49E-05 | 1.49E-05 | 1.49E-05 | 1.49E-05 | 1.49E-05 | 1.49E-05 |
| Poder Calorífico GNV [kJ/m ³] | 38800 | 38800 | 38800 | 38800 | 38800 | 38800 | 38800 | 38800 | 38800 | 38800 |
| Vazão GNV MEDIDA [l/min] | 0.20 | 0.45 | 0.60 | 0.80 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.80 | 0.80 | 0.80 |
| Vazão GNV REAL [l/min] | 0.20 | 0.44 | 0.59 | 0.79 | 0.59 | 0.59 | 0.59 | 0.79 | 0.79 | 0.79 |
| Velocidade GNV REAL [m/s] | 0.19 | 0.43 | 0.57 | 0.76 | 0.57 | 0.57 | 0.57 | 0.76 | 0.76 | 0.76 |
| Vazão CO ₂ MEDIDA [l/min] | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.20 | 0.40 | 0.65 | 0.25 | 0.55 | 0.90 |
| Vazão CO ₂ REAL [l/min] | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.12 | 0.24 | 0.39 | 0.15 | 0.33 | 0.54 |
| Velocidade CO ₂ REAL [m/s] | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.12 | 0.23 | 0.38 | 0.14 | 0.32 | 0.52 |
| Concentração de GNV em volume | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 100.00% | 83.05% | 71.02% | 60.13% | 83.94% | 70.38% | 59.22% |
| Concentração de CO ₂ em volume | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 16.95% | 28.98% | 39.87% | 16.06% | 29.62% | 40.78% |
| Número de Reynolds Associado | 52.81 | 118.81 | 158.42 | 211.22 | 231.63 | 301.85 | 387.39 | 302.88 | 408.23 | 527.81 |
| Potência Radiante Medida em x<0 [W] | 3.19 | 7.83 | 11.90 | 13.40 | 9.23 | 8.56 | 8.59 | 11.17 | 8.87 | 10.01 |
| Potência Radiante Medida em x>0 [W] | 8.77 | 16.98 | 21.06 | 28.76 | 19.62 | 18.13 | 19.24 | 25.48 | 20.47 | 21.93 |
| Potência Radiante Medida em x<0 | 26.67% | 31.56% | 36.10% | 31.78% | 31.99% | 32.08% | 30.87% | 30.48% | 30.23% | 31.34% |
| Potência Radiante Medida em x>0 | 73.33% | 68.44% | 63.90% | 68.22% | 68.01% | 67.95% | 69.13% | 69.52% | 69.77% | 68.66% |
| Potência Radiante Medida [W] | 11.96 | 24.81 | 32.96 | 42.16 | 28.85 | 26.68 | 27.83 | 36.65 | 29.34 | 31.94 |
| Potência Radiante Calculada [W] | 127.28 | 286.38 | 381.85 | 509.13 | 381.85 | 381.85 | 381.85 | 509.13 | 509.13 | 509.13 |
| Fração de Energia Radiante Obtida | 9.40% | 8.66% | 8.63% | 8.28% | 7.56% | 6.99% | 7.29% | 7.20% | 5.76% | 6.27% |