

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

ESTUDO EXPERIMENTAL DA RADIAÇÃO TÉRMICA EMITIDA POR CHAMAS LAMINARES
DE DIFUSÃO

por

Jair de Almeida

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

Porto Alegre, novembro de 2013



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO EXPERIMENTAL DA RADIAÇÃO TÉRMICA EMITIDA POR CHAMAS LAMINARES
DE DIFUSÃO

por

Jair de Almeida

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

Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientador: Prof. Dr. Nattan Roberto Caetano

Comissão de Avaliação:

Prof. Prof. Paulo Otto Beyer

Prof. Prof. Fernando Marcelo Pereira

Prof. Prof. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 14 de novembro de 2013

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, não somente nestes anos como universitário, mas ao longo de toda a minha vida.

A minha esposa, Sabrina, pelo amor, companheirismo e compreensão durante o período de graduação, principalmente nos dias em que estive ausente devido aos estudos para as provas e realizações de trabalhos.

Aos meus pais, Celso e Nair, que mais do que me proporcionar uma boa infância, formaram os fundamentos do meu caráter. Obrigado por serem a minha referência de tantas maneiras e estarem sempre presentes na minha vida de uma forma indispensável.

Aos meus irmãos e sobrinhos que sempre me apoiaram e torceram por mim para a concretização deste sonho.

Ao meu orientador, Prof. Nattan, pelo suporte no tempo que lhe coube, principalmente, nas noites até mais tarde no laboratório, em que ficou auxiliando nas realizações dos experimentos, indicando o caminho para a execução de um bom trabalho.

Aos meus professores, colegas e amigos que de uma maneira ou de outra contribuíram para que eu obtivesse mais essa conquista.

A todos, o meu muito obrigado.

Almeida, J. **Estudo Experimental da Radiação Térmica Emitida por Chamas Laminares de Difusão**. 2013. 26. 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 estudo consiste na realização de medições experimentais da radiação térmica emitida por chamas laminares, produzidas a partir da combustão de gás natural veicular e ar ambiente. Para tanto, foi montada uma bancada contendo um queimador típico de chamas não pré-misturadas. Um sensor fotocondutor foi conectado a um osciloscópio, a fim de realizar as medições do fluxo de calor radiante da chama. Assim, foram realizadas medições na região do infravermelho em uma faixa do espectro de comprimento de onda, entre 1,5 e 4,8 μm . A energia total emitida para o ambiente foi obtida a partir da integração do fluxo radiante, medido em diferentes configurações de chama, na área lateral de um cilindro virtual. Os resultados permitem quantificar a fração radiante e comparar com modelos descritos na literatura. Além disso, foram utilizados filtros ópticos espectrais passa-banda, centrados em 3,75 e 4,75 μm , a fim de avaliar a contribuição da radiação térmica emitida pelas partículas de fuligem e pelo CO_2 contido nos gases quentes produzidos a partir da reação do combustível. Os resultados das medições mostram que a fração de energia transferida pelo mecanismo de radiação térmica é responsável por cerca de 10% da energia química do combustível, por conseguinte, cerca de 2% desta quantidade de radiação emitida é proveniente das partículas de fuligem e cerca de 14% é devido ao CO_2 . Estes resultados são importantes para auxiliar no desenvolvimento de modelos numéricos, a fim de representar o perfil do fluxo radiante.

PALAVRAS-CHAVE: Radiação térmica, chamas laminares, queimador, filtros ópticos.

Almeida, J. **Experimental Study of Thermal Radiation Emitted by Laminar Diffusion Flames**. 2013. 26. 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 present study consists of carrying out experimental measurements of thermal radiation emitted by laminar flames produced from combustion of natural vehicle gas and ambient air. Therefore, we built a workbench containing a non premixed flames typical burner. A intensity radiation sensor was connected to an oscilloscope in order to perform the measurements of the flow of radiant heat from the flame. Thus, measurements were made in the infrared spectral range, between 1,5 and 4,8 μm wavelength. The total energy emitted to the ambient has been obtained from the integration of the radiant flux, measured in different flame configurations, on the lateral area of a virtual cylinder. The results allow to quantify the radiant fraction and compare models described in the literature. Moreover, bandpass spectral optical filters were used, centered at 3.75 and 4.75 μm , in order to assess the contribution of thermal radiation emitted by the soot particles and the CO_2 contained in the hot gases produced from the fuel reaction. The measurement results shows that the fraction of energy transferred by the mechanism of thermal radiation is accounted for about 10% of the latent energy of the fuel, therefore, approximately 2% of this radiation quantity is produced by soot particles and about 14% due CO_2 . These results are important to support numerical models development that represent the profile of the radiant flux.

KEYWORDS: Thermal radiation, laminar flames, burner, optical filters.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1.
2. OBJETIVOS	1.
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1.
3.1 Radiação Térmica.....	1.
3.1.1 Radiação Térmica Emitida por Chamas	2.
3.2 Radiometria	3.
3.3 Medição de Radiação Térmica Emitida por Chamas.....	3.
4. METODOLOGIA	6.
4.1 Bancada Experimental.....	6.
4.2 Queimador Burke Shumman.....	7.
4.3 Rotâmetros	7.
4.3.1 Calibração dos Rotâmetros	7.
4.4 Sensor Fotocondutor	7.
4.4.1 Calibração do Sensor Fotocondutor	7.
4.5 Filtros Ópticos Espectrais	8.
4.6 Sistema de Aquisição	8.
4.7 Sistema de Medição	8.
4.8 Tratamento Estatístico	9.
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	10.
6. CONCLUSÕES	13.
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14.
ANEXO I	16.
ANEXO II.....	16.
APÊNDICE I	16.
APÊNDICE II	17.
APÊNDICE III.....	17.
APÊNDICE IV.....	18.
APÊNDICE V	18.
APÊNDICE VI.....	19.

1. INTRODUÇÃO

O poder calorífico de um composto é a energia liberada quando há conversão para produtos de oxidação na reação com oxigênio molecular [Francesquett et al., 2013]. Uma porção desta energia é transferida em forma de radiação térmica. Este mecanismo de transferência de calor não exige a presença de um meio material [Incropera et al., 2008]. Por este motivo, estudar a emissão de radiação de maneira experimental é foco de estudos, a fim de investigar o aproveitamento da energia liberada.

Nas últimas décadas, estudos sobre a radiação térmica têm sido realizados para entender o comportamento da distribuição da energia ao longo de chamas, a fim de obter modelos numéricos para estimar a propagação da radiação em diferentes distâncias a partir da fonte de calor [Sivathanu et al., 1993, Zeng et al., 2002, e Hankinson et al., 2011]. Portanto, um banco de dados experimentais é necessário para auxiliar no desenvolvimento desses modelos.

Além das aplicações na indústria e o controle de poluição, a transferência radiativa é bem conhecida por desempenhar um papel essencial na propagação de incêndios, como indicado, por exemplo, em alguns dos artigos dedicados à avaliação da radiação emitida pelo fogo [Parent et al., 2010].

A intensidade de radiação térmica é comandada pela temperatura da superfície emissora, receptora e o meio participante. A faixa de comprimentos de onda englobados pela radiação térmica fica aproximadamente entre 0,1 e 100 μm . Essa faixa é subdividida em ultravioleta, visível e infravermelho. A maior parte da radiação térmica está fora da faixa do visível, mais especificamente na faixa do infravermelho. Cerca de 95,6% da radiação térmica emitida por chamas, ocorre no intervalo de 1,45 a 14,5 μm de comprimento de onda [Parent et al., 2010].

O conhecimento da transferência de calor é de fundamental importância para a engenharia. A fim de projetar queimadores e superfícies radiantes cada vez mais eficientes. Exemplos incluem geradores de vapor, fornalhas industriais, combustores e diversos outros. Portanto, este trabalho é dedicado ao estudo da energia transferida pela radiação emitida por uma chama, a partir da combustão de gás natural veicular, que é o combustível comercial.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo a realização de um estudo experimental sobre a emissão da radiação térmica emitida no processo de combustão de gás natural, por meio de chamas laminares não pré-misturadas, a fim de avaliar o aproveitamento eficiente da energia gerada.

Objetivos específicos:

- Medir a radiação térmica emitida em uma posição paralela ao eixo da chama.
- Integrar o fluxo de radiação medido, a fim de quantificar a radiação que atravessa as fronteiras de um cilindro virtual;
- Quantificar a contribuição da radiação emitida por partículas de fuligem e pelos gases quentes de CO_2 produzidos pela reação do combustível.
- Comparar os resultados das medições com a literatura, a fim de validar o experimento.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Radiação Térmica

A radiação térmica pode ser definida como a energia eletromagnética emitida por um meio ou superfície em virtude da sua temperatura, sempre que estiver acima de 0 K. A energia radiante emitida por um corpo pode ser transferida à superfície de outro corpo distante,

sem requerer um meio entre estes. O fluxo radiante depende da forma, do tamanho, e principalmente da temperatura de cada corpo. Para gases, a emissão é um fenômeno volumétrico, isto é, a radiação proveniente de um volume finito de matéria é o efeito integrado da emissão local através do volume [Perin, 2009].

3.1.1 Radiação Térmica Emitida por Chamas

A radiação térmica emitida por chamas de hidrocarbonetos é proveniente, predominantemente, de duas fontes. A primeira, é devido à emissão contínua no espectro, a qual é proveniente de partículas de fuligem. A segunda, é emitida em faixas espectrais distintas, a partir de produtos quentes da combustão, os quais se encontram em temperatura elevada após a reação, como CO_2 e H_2O . Ambas emitem, principalmente, na região do infravermelho. Porém a emissão das partículas de fuligem abrangem o espectro do visível, [Hankinson et al, 2011].

A radiação térmica emitida pela chama é uma fração da energia total liberada pelo combustível na reação. A fração de calor radiante, ou seja, a fração de energia da chama que é emitida para o ambiente é definida como:

$$F_R = \frac{Q_R}{Q_T} \quad (3.1)$$

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 de combustível, [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, ao longo de um invólucro cilíndrico de raio R posicionado em torno da chama, com eixo central coincidente com o eixo longitudinal da chama, de acordo com a equação:

$$Q_R = \int q_r \cdot dA = \int_{z_i}^{z_f} q_r \cdot 2\pi R \cdot dz = 2\pi R \int_{z_i}^{z_f} q_r \cdot dz \quad (3.2)$$

onde, q_r é o fluxo de calor radiante, [W/m²], R a distância horizontal do sensor até o eixo central da chama, [m], z_i e z_f os intervalos de integração, [m].

Os valores das medidas experimentais da fração de energia radiante encontrados na literatura são baseados nas equações 3.1 e 3.2, sempre integrando o fluxo de calor radiante. Este valor é medido por um sensor, ao longo de um cilindro virtual em torno da chama. Alguns autores desenvolveram correlações para a determinação de F_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], pela equação 3.3.

$$F_R = 0,048 \cdot \sqrt{M} \quad (3.3)$$

O Instituto Americano do Petróleo, o qual recomenda que objetos e operadores permaneçam uma distância, R , mínima da fonte, a fim de manter o controle da exposição à radiação, utiliza a equação 3.4, assumindo que a fonte é pontual.

$$F_R = \frac{4\pi R^2 q_r}{Q_T \cdot \tau} \quad (3.4)$$

onde, τ é a transmissividade no meio [adimensional], q_r a radiação a que o objeto é exposto, [W/m²] e Q_T a energia total emitida, [W], [API, 1969].

Outros autores desenvolveram correlações para a determinação de F_R dependentes da velocidade de escoamento do 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 equação:

$$F_R = 0,321 - 0,418 \cdot u_j \cdot 10^{-3} \quad (3.5)$$

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

3.2 Radiometria

A quantificação pode ser feita por um sensor de radiação, o qual é definido como um dispositivo que recebe e responde a um estímulo de radiação com sinal elétrico. São inúmeras as aplicações de sensores de radiação, que podem ser utilizados como dispositivos acionadores de processos automáticos, indicadores de radiação, dispositivos de medidas de radiação e em diversas outras aplicações [Mccluney, 1994].

Sensores fotocondutores de seleneto de chumbo (PbSe) são amplamente utilizados para detectar radiação, em uma faixa do infravermelho próximo, isto é, de 1,0 a 4,8 μm . Nos fotocondutores, a resistência elétrica do material é reduzida quando exposto à radiação provocando variação na tensão de resposta [Thorlabs, 2013].

3.3. Medição de Radiação Térmica Emitida por Chamas

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, o que produz uma variação de tensão como resposta.

Sivathanu et al., 1993, realizaram medições da radiação térmica emitida por chamas produzidas por três diferentes combustíveis (CH_4 , C_2H_2 e C_2H_4). Um radiômetro posicionado a uma distância, R , de 0,5 comprimentos de chama, L_f , em relação ao eixo da chama. Este sensor foi deslocado na direção desde o plano do bocal do queimador até o ponto onde o fluxo medido era de 5% do valor máximo. Este ponto variava tipicamente entre $1,5L_f$ e $2,5L_f$. A figura 3.1 (a) apresenta a disposição do aparato experimental para realizar as medidas de radiação.

A partir dos resultados encontrados e de valores de retirados da literatura, Sivathanu et al., 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:

$$C^* = \frac{4\pi \cdot R^2 \cdot q_r}{Q_T \cdot F_R} \quad (3.6)$$

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 Sivathanu et al., 1993, em função da posição adimensional x/L_f . Com base nestes resultados, as medições de fluxo de calor radiativo em $0,5 < x/L_f < 0,7$ produziram a máxima potência radiante ao longo da chama.

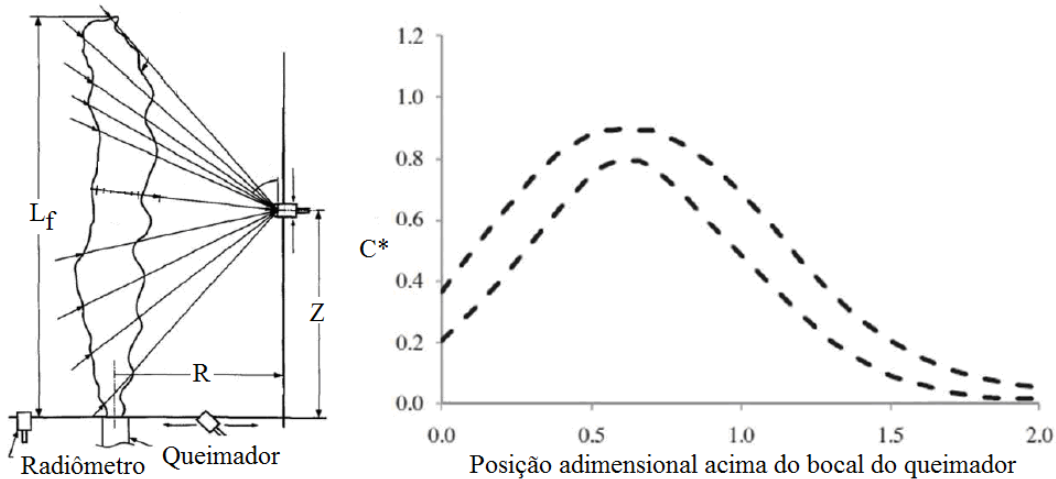


Figura 3.1: (a) Disposição do sensor em relação à chama e (b) comportamento do coeficiente C^* em função da altura adimensional x/L_f , [Adaptado Sivathanu et al., 1993].

Zheng et al., 2002, realizaram estudos experimentais em chamas turbulentas não pré-misturadas de CH_4 , H_2 e N_2 , com auxílio de um espectrômetro infravermelho. A faixa de medição foi de 1,4 a 4,8 μm de comprimento de onda. Naquele trabalho foi medida a intensidade de radiação emitida, a uma distância fixa do eixo da chama, em diferentes posições ao longo da altura da chama. Com isso, foi possível obter a distribuição da intensidade de radiação emitida, conforme mostra a figura 3.2 (b). Estes resultados experimentais representaram um dos primeiros trabalhos de medição da intensidade de radiação espectral, que podem ser utilizados para validar futuros modelos numéricos de combustão.

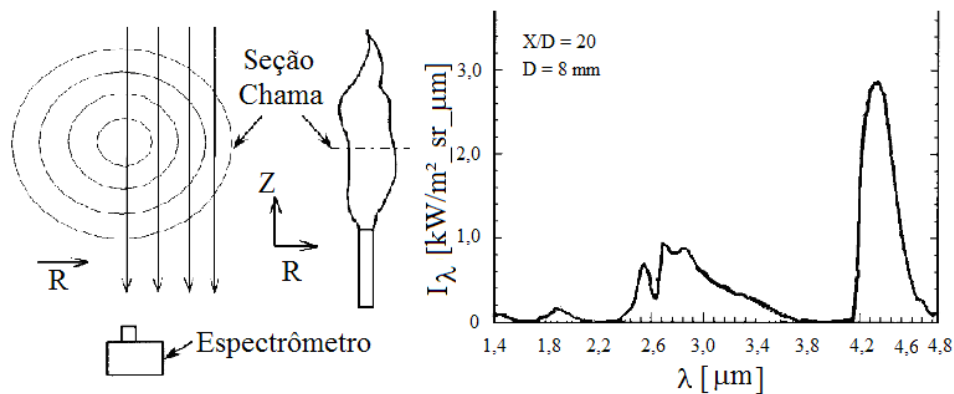


Figura 3.2: (a) Disposição do sensor para medição da radiação, (b) Intensidade de radiação espectral [Adaptado Zeng et al., 2002].

Ji et al., 2004, realizaram experimentos com chamas laminares pré-misturadas de CH_4 . Para realização do experimento foi utilizado um espectrômetro de infravermelho, que opera na faixa de 1,8 a 4,9 μm de comprimento de onda. Assim como, Zheng et al., 2002, também verificaram que os maiores picos de intensidade de radiação ocorreram em um comprimento de onda ao redor de 2,7 e 4,3 μm , o que corrobora com os resultados da literatura. Os autores concluíram então, que esses picos eram formados pelos efeitos combinados de dióxido de carbono e vapor d'água, visto que estes são produtos da combustão, porém as diferenças deveriam ser analisadas em trabalhos futuros.

Parent et al., 2010, realizaram medições experimentais da intensidade de radiação produzida por chamas emitidas pela queima de vegetação (ramos de videira), como mostra a figura 3.3. Para realização do experimento, foram utilizados uma câmera de infravermelho e filtros espectrais centrados em $3,8 \mu\text{m}$, $4,45 \mu\text{m}$ e $7,83 \mu\text{m}$, a fim de observar o fluxo radiante nas regiões espectrais onde a predominância da emissão de radiação é dada pelas respectivas espécies: fuligem, CO_2 , e H_2O , vide figura 3.4.



Figura 3.3: Chamas produzidas pela queima de vegetação [Adaptado Parent et al., 2010].

Segundo Parent et al., 2010, os resultados apresentados mostram que a contribuição do CO_2 é maior quando comparada à contribuição das partículas de fuligem e H_2O produzidos pela combustão. Também apresentaram resultados mostrando que a uma distância no nível da base e a 10 cm acima desta, a radiação ao redor de $3,8 \mu\text{m}$ representava 27,08% e 6,25% e os valores medidos ao redor de $7,83 \mu\text{m}$ correspondiam a 45,8% e 12,90%, respectivamente, quando comparada com a radiação filtrada em $4,45 \mu\text{m}$.

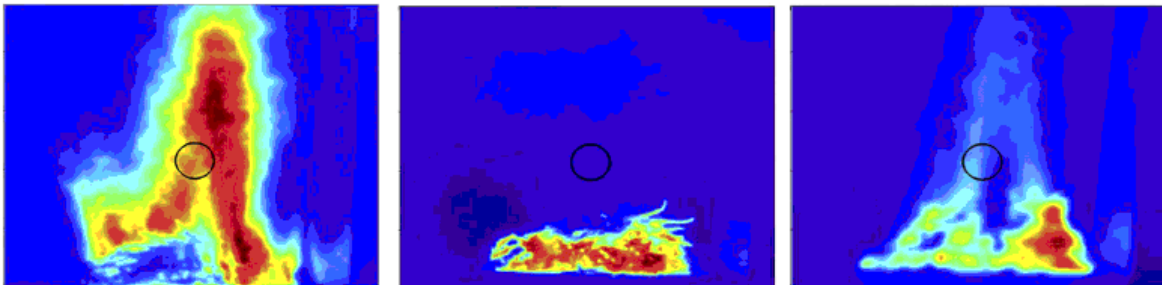


Figura 3.4: (a) imagem com filtro espectral ao redor de $4,45 \mu\text{m}$ (predominância de CO_2), (b) imagem com filtro espectral ao redor de $3,8 \mu\text{m}$ (predominância de fuligem) e (c) imagem com filtro espectral ao redor de $7,83 \mu\text{m}$ (predominância de H_2O) [Adaptado Parent et al., 2010].

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, vide figura 3.5 (a), localizada no eixo axial da chama, a uma altura de meio comprimento de chama. Além da consideração da chama como uma fonte de calor pontual os autores desenvolveram métodos de 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, vide figura 3.5 (b). Por último, modelos sólidos de chamas como um cilindro, um cone ou dois cones opostos foram desenvolvidos, ver figura 3.5 (c). 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.

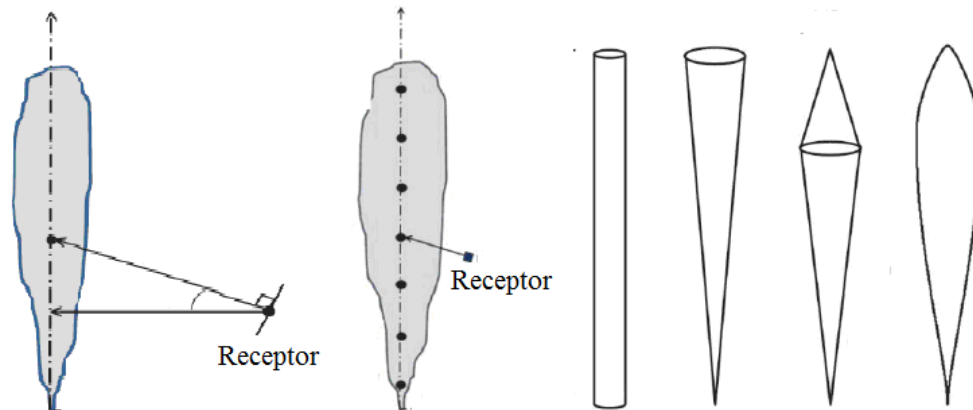


Figura 3.5: (a) Modelo de fonte pontual, (b) modelo de fonte multiponto e (c) modelos sólidos de chamas [Adaptado Hankinson et al., 2011].

4. METODOLOGIA

Uma bancada foi montada, a fim de realizar as medições do fluxo radiante emitido por chamas produzidas pela combustão de gás natural.

4.1 Bancada Experimental

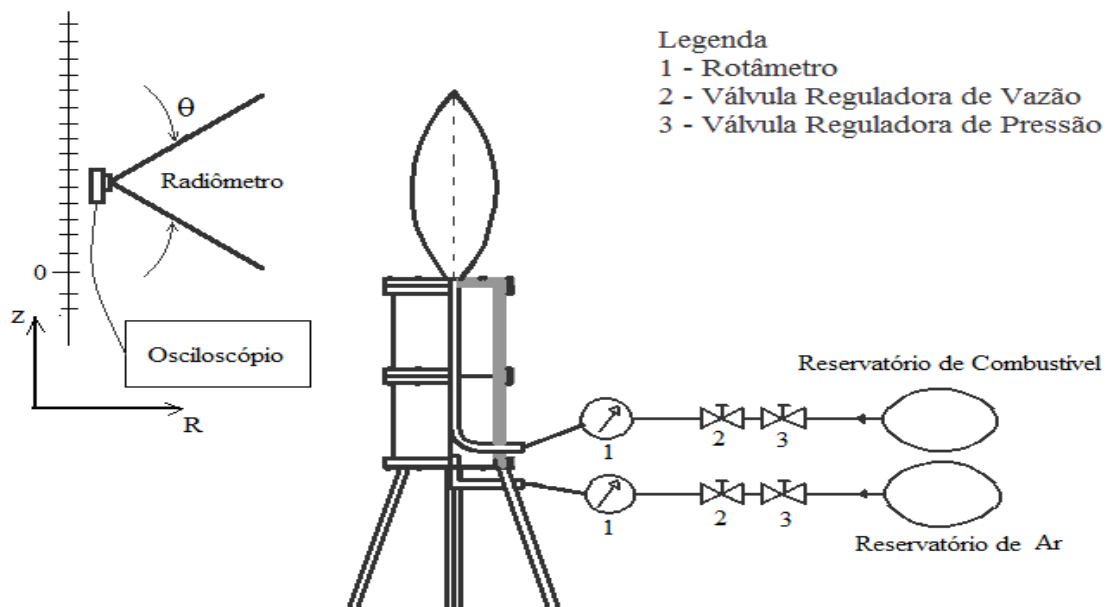


Figura 4.1: Configuração esquemática da bancada experimental.

Conforme a figura 4.1, o queimador está ligado a duas linhas de fluidos. Estas linhas conectam o queimador aos reservatórios de ar comprimido e de combustível, passando pelas válvulas reguladoras de vazão e pressão. Ambas as linhas são estabilizadas em 3 bar de pressão.

O sensor fotocondutor é ligado ao osciloscópio e se desloca na direção longitudinal da chama para realizar as medições, até uma distância de interesse.

Dois filtros ópticos passa-banda foram utilizados a fim de realizar medições do fluxo radiante em diferentes faixas.

4.2 Queimador Burke-Shumman

O queimador usado para produzir as chamas foi construído baseado no projeto de Burke-Shumman [Burke e Shumman, 1928], na qual se utiliza dois tubos concêntricos para garantir uma chama axissimétrica. 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. O tubo externo do queimador possui um diâmetro máximo de 95 mm [Nunes, 2012].

4.3 Rotâmetros

Os rotâmetros, marca Krohne, modelo 420, utilizados neste estudo para medir o fluxo de combustível e ar foram calibrados para uma vazão de CH₄, com pressão de 0,025 bar, temperatura de 25°C e incerteza de ±0,32% [Conaut, 2013]. A equação 4.1 foi utilizada neste experimento para ajustar as vazões dos rotâmetros, considerando uma pressão de 3 bar, temperatura de 20° C, combustível gás natural e incerteza de ±5% do valor lido, os quais correspondem aos parâmetros utilizados.

$$Q = kQ_{\text{Rotâmetro}} \quad (4.1)$$

onde, Q representa a vazão corrigida em l/min, k o fator de correção para diferentes pressões e $Q_{\text{Rotâmetro}}$ a vazão lida no rotâmetro em l/min. Os valores de K utilizados foram 2,088 e 2,086 para o combustível e o ar comprimido, respectivamente.

4.4 Sensor Fotocondutor

Um sensor fotocondutor, da marca Thorlabs, modelo PDA20H, vide figura I (a), Anexo I, foi utilizado para realizar as medições de fluxo de radiação térmica em função da variação de tensão. Este sensor realiza medições na faixa de comprimento de onda de 1,5 μm a 4,8 μm, com o pico de resposta de 2×10^5 V/W e incerteza de ±0,5% do fundo de escala quando o comprimento de onda da radiação incidente é cerca de 4,0 μm. A radiação incidente nos sensores fotocondutores 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 expressa em unidades de V/W, ou seja, uma relação entre a tensão de resposta do sensor e o fluxo de calor incidente [Thorlabs, 2013].

4.4.1 Calibração do Sensor Fotocondutor

O valor instantâneo do fluxo de calor é obtido pela integral da curva de resposta do fabricante e em distribuições espectrais de chamas, obtidas nos trabalhos de Zheng et al., 2002 e Ji et al., 2004 [Kroeff, 2013]. $\overline{IR} = 0,5984$ V/W/m² foi utilizado neste trabalho a fim de obter o valor do fluxo radiante no intervalo de $1,5 < \lambda < 4,8$ μm de comprimento de onda. De maneira análoga foram considerados \overline{IR} iguais a 0,1482 e 0,0637 V/W/m² para os intervalos de $3,5 < \lambda < 4,0$ μm e $4,5 < \lambda < 4,8$ μm, respectivamente, devido a utilização dos filtros ópticos, vide resolução no Apêndice IV. O fluxo de calor, q_r , é obtido, então, por meio da equação 4.2.

$$q_r = \frac{V_{resposta}}{\overline{IR}} \quad (4.2)$$

onde, $V_{resposta}$ é a resposta do sensor, [V] e \overline{IR} o valor para cada faixa espectral, [$V/W/m^2$].

4.5 Filtros Ópticos Espectrais

Filtros passa-banda fornecem uma das maneiras mais simples para transmitir um determinado comprimento de onda [Thorlabs, 2013]. Dois filtros ópticos passa-banda, marca Thorlabs, foram utilizados a fim de quantificar o fluxo de radiação em diferentes faixas de comprimento de onda. Um deles centrado em $3,75 \mu\text{m}$ de comprimento de onda e outro em $4,75 \mu\text{m}$, ambos com 70 % de transmissibilidade e uma faixa de banda de $0,5 \mu\text{m}$.

4.6 Sistema de Aquisição

Um osciloscópio digital, modelo DS2202, 200 MHz, marca Rigol, foi utilizado para leitura da tensão gerada pelo sensor fotocondutor. Este equipamento é capaz de realizar medições de tensão em diferentes faixas [Rigol, 2013]. O aparelho foi configurado para um pico de tensão máxima de 12 V.

4.7 Sistema de Medição

Uma escala foi fixada a parede do laboratório e o queimador foi afastado desta até a distância R de interesse, assim a distância horizontal entre o eixo central da chama e a face frontal do sensor permanece constante ao longo das medições para cada configuração de chama, o que possibilita realizar as medições de fluxo de calor radiante emitida por determinada configuração de chama. O sensor foi deslocado para posições, Z , abaixo e acima do plano do bocal do queimador, conforme mostra a Figura 4.2.

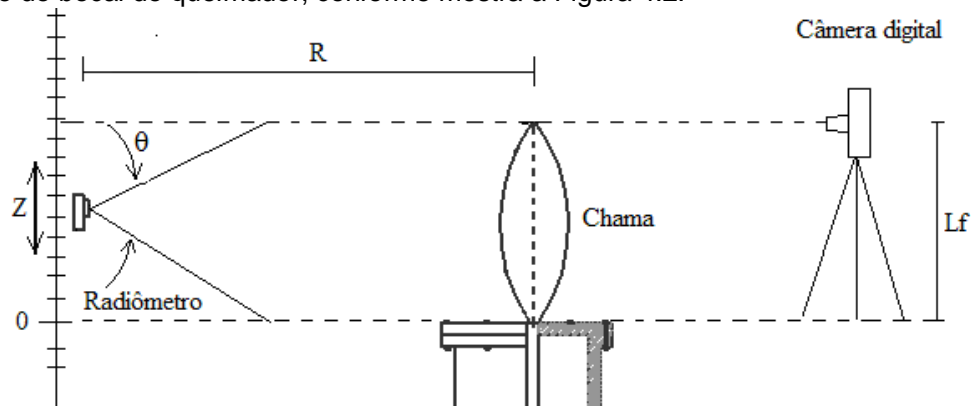


Figura 4.2: Método utilizado para as medições.

As medições foram realizadas para quatro distâncias R distintas, três com uma vazão de combustível de $0,21 \text{ l/min}$ e a quarta com vazão de $0,17 \text{ l/min}$, devido à facilidade de estabilizar a chama. Com o auxílio de uma câmera fotográfica digital, modelo comercial, e uma régua graduada em milímetros, foram medidas as alturas das chamas, 130 mm e 90 mm , vide figura II, Apêndice II. A vazão de ar foi fixada em 10 l/min em todas as medições, a fim de estabilizar a chama.

As distâncias R utilizadas em cada configuração foram de 130 mm , 195 mm , 325 mm , as quais correspondem a 1, 1.5, 2.5 comprimentos de chama, L_f , e 360 mm , que corresponde a 4 comprimentos de chama. Estes valores foram escolhidos a fim de comparar os resultados com os encontrados na literatura. O ângulo de incidência da radiação no sensor, ver

figura III, Apêndice III, foi reduzido de 105° , o qual corresponde a distância de $4 L_f$, para 70° , a fim de aproximar o sensor à chama nas três primeiras configurações.

Os filtros ópticos foram utilizados nas distâncias, R , correspondentes a 1, 1.5 e $2.5 L_f$ e ângulo de incidência de 70° , a fim de quantificar a radiação emitida nas diferentes faixas e comparar com a literatura e com as medições sem filtro.

Em cada configuração foram registrados picos de tensão elétrica, apontados no osciloscópio conectado ao sensor, quando este era exposto à radiação emitida pela chama. Foram registrados 6 valores de tensão em cada ponto de medição, totalizando cerca de 240 medições em cada configuração. O sensor foi deslocado abaixo e acima do bocal do queimador até que o valor registrado representasse 5% do valor máximo do fluxo de radiação medido. Conforme descrito por Shivathanu et al., 1993, esse procedimento é um critério necessário para validar o experimento, o qual garante a condição de tubo de altura infinita.

O valor do fluxo radiante em W/m^2 foi obtido utilizando a equação 4.2. Esses valores, então, foram integrados, equação 3.2, a fim de obter o fluxo radiante que atravessa as fronteiras da área lateral de um cilindro virtual, vide figura 4.3, de raio, R .

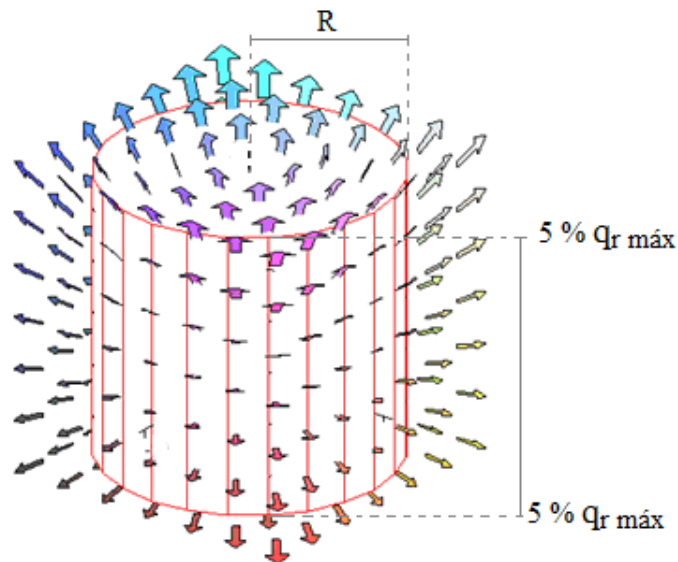


Figura 4.3: Figura esquemática da radiação térmica que atravessa a área lateral do cilindro virtual.

4.8 Análise estatística

Os valores das medições registrados foram analisados pelo o critério de *Chauvenet* para eliminar os valores que extrapolaram a tendência dominante, os quais poderiam incorrer em um erro relevante em relação à média. Considerando as medições como pequena amostra, foi utilizada a tabela de distribuição *t-student*, tabela I, Anexo II, com um nível de confiabilidade de 95,45% para determinar a incerteza associada. A equação 4.3 foi utilizada para determinar a incerteza das medições.

$$u_x = t \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (4.3)$$

onde, u_x é a incerteza associada as medições em cada ponto, t corresponde ao valor *t-student* e n o número de amostras.

O método de Kline-McClintock foi utilizado para determinar a incerteza combinada das tolerâncias associadas, segundo a equação 4.4. Os cálculos e resultados das incertezas estão listados no Apêndice V.

$$u_{Total} = \left[\left(\frac{\partial f(x)}{\partial x_1} u_i \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f(x)}{\partial x_{n1}} u_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.4)$$

5. RESULTADOS E DISCUÇÕES

O fluxo de calor radiante foi medido para 9 diferentes configurações de chamas laminares não pré-misturadas com o ângulo, θ , de 70° e uma medição com ângulo de 105° , produzidas a partir da combustão de gás natural, a fim de entender a distribuição da energia irradiada para o ambiente.

Os valores de Reynolds, para cada configuração, apresentam valores baixos que garantem o comportamento laminar das chamas, conforme valores apresentados na tabela II, Apêndice I.

A tabela 5.1 apresenta os diferentes parâmetros controlados durante todo o processo de medição, bem como alguns resultados obtidos a partir destes testes.

Tabela 5.1: Resultados e parâmetros controlados no experimento.

Configuração de Chama	1 ($\theta = 70^\circ$)			2 ($\theta = 70^\circ$)			3 ($\theta = 70^\circ$)			4 ($\theta = 105^\circ$)
	Sem Filtro	Filtro 3,75	Filtro 4,75	Sem Filtro	Filtro 3,75	Filtro 4,75	Sem Filtro	Filtro 3,75	Filtro 4,75	Sem Filtro
L_f	130	130	130	130	130	130	130	130	130	90
R/L_f	1	1	1	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	2,5	4
Q_T [W]	135,80	135,80	135,80	135,80	135,80	135,80	135,80	135,80	135,80	109,93
Q_R [W]	11,86	0,26	1,69	12,63	0,26	1,79	12,13	0,20	1,64	17,56
F_R (este trabalho)	8,74%	0,19%	1,25%	9,30%	0,19%	1,32%	8,93%	0,14%	1,21%	15,97%
F_R (API, 1969)	13,68%	-	-	17,83%	-	-	21,43%	-	-	21,13%
F_R (Tan, 1967)	19,73%	-	-	19,73%	-	-	19,73%	-	-	19,73%
F_R (Cook et. al, 1987)	32,09%			32,09%			32,09%			32,09%

O percentual da fração radiante medido com o ângulo de incidência de 70° apresenta valores inferiores em comparação com o valor apresentado na medição com ângulo de 105° , devido ao menor fluxo de calor que incide no sensor.

Para o mesmo ângulo de incidência, θ , e mesma configuração do sensor, a fração radiante sofre pouca variação com o aumento de R . Isso se deve ao fato que a área lateral do cilindro aumenta devido ao aumento de R e da altura do cilindro virtual. Esse aumento de área compensa a diminuição do fluxo de calor medido.

O aumento do ângulo de incidência de 70° para 105° , aumenta o valor calculado. Isso é devido à maior fração de radiação que incide no sensor.

Os valores da fração radiante calculados são menores em comparação aos modelos propostos pela literatura, ver resolução das equações no Apêndice VI. Segundo Parent et al., 2010, cerca de 95,6% da parcela de radiação térmica emitida, ocorre no intervalo de 1,45 a 14,5 μm , ou seja, superior às faixas do espectro que foram realizadas as medições. Além disso, conforme os resultados obtidos pela equação do Instituto Americano do Petróleo, a fração de radiação aumenta com o aumento do ângulo de incidência, pois maior é o fluxo de radiação que incide no sensor.

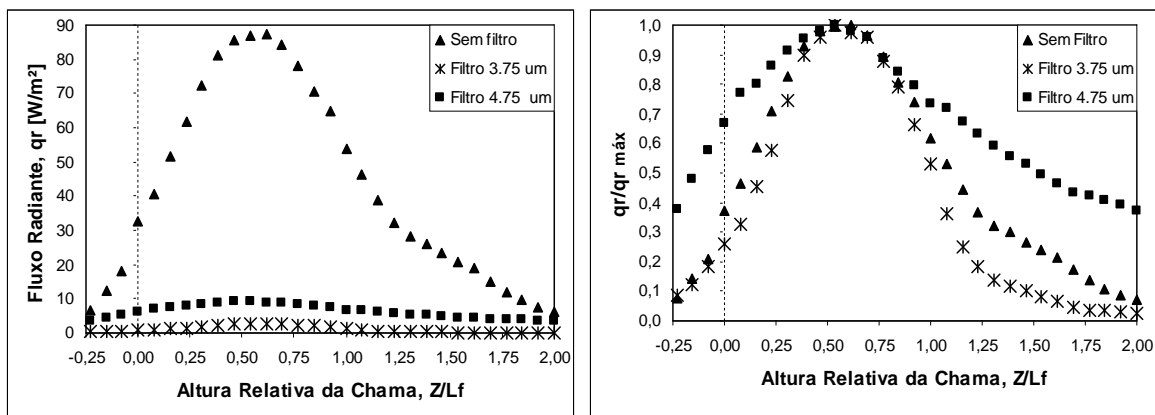


Figura 5.1: a) Fluxo radiante, $R=1.0 L_f$, b) Fluxo radiante normalizado, $R = 1.0 L_f$.

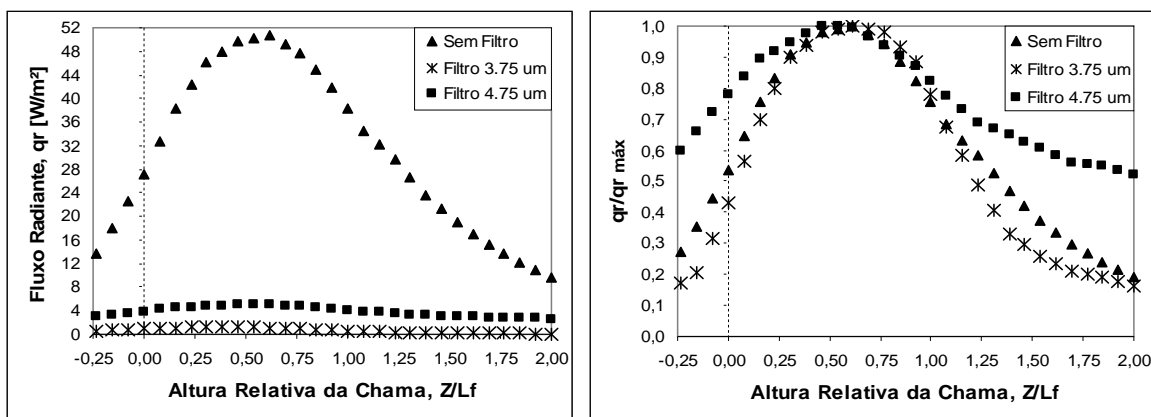


Figura 5.2: a) Fluxo radiante, $R=1.5 L_f$, b) Fluxo radiante normalizado, $R = 1.5 L_f$.

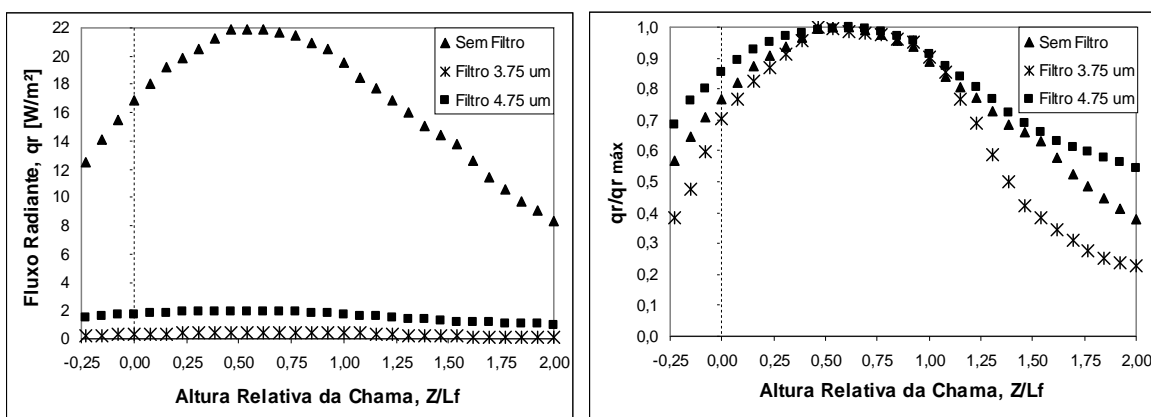


Figura 5.3: a) Fluxo radiante, $R=2.5 L_f$, b) Fluxo radiante normalizado, $R = 2.5 L_f$.

As figuras 5.1 (a), 5.2 (a) e 5.3 (a) mostraram que as medidas realizadas com o uso de filtros apresentam valores baixos quando comparada as medidas sem filtro, devido à pequena faixa de comprimento de onda dos filtros, $0,5 \mu\text{m}$.

O uso do filtro centrado em $3,75 \mu\text{m}$ de comprimento de onda representa uma média de 1,96% do total da radiação medida sem o uso de filtros. Já o uso do filtro centrado em $4,75 \mu\text{m}$ representa uma média de 13,98%. Esses valores também são coerentes com os resultados encontrado por Parent et al., 2010, o qual quantificou a intensidade de radiação térmica emitida próximo a esses comprimento de ondas e verificou uma maior participação na emissão de radiação próximo a $4,75 \mu\text{m}$.

O fluxo radiante medido com o filtro centrado em $3,75 \mu\text{m}$ representa um percentual médio de 14,03% do fluxo medido com uso do filtro em $4,75 \mu\text{m}$. Isso se deve à distribuição de intensidade de radiação, a qual varia em função do comprimento de onda [Zheng et al., 2002; Ji et al., 2004]. Segundo Parent et al., 2010, isso se deve a contribuição proveniente da radiação emitida pelo CO_2 medida próximo a $4,75 \mu\text{m}$ e do pico de fluxo radiante da fuligem que ocorre na região ao redor $3,75 \mu\text{m}$, visto que são produtos da combustão.

Também é possível perceber pelas figuras 5.1 (b), 5.2 (b) e 5.3 (b) que a contribuição para o fluxo radiante ao redor de $4,75 \mu\text{m}$ é ainda maior que ao redor $3,75 \mu\text{m}$ à medida que se afasta do pico de fluxo radiante. Em $z/L_f = 1,5$, por exemplo, a contribuição para a radiação térmica medida com filtro centrado em $3,75 \mu\text{m}$ representa apenas 5,57% em comparação com o filtro em $4,75 \mu\text{m}$ de comprimento de onda.

A máxima radiação emitida, para as diferentes faixas de comprimento de onda, está situada em um mesmo ponto da chama. O fluxo máximo é identificado em z igual a 0,62 vezes o comprimento da chama em ambas as faixas espectrais.

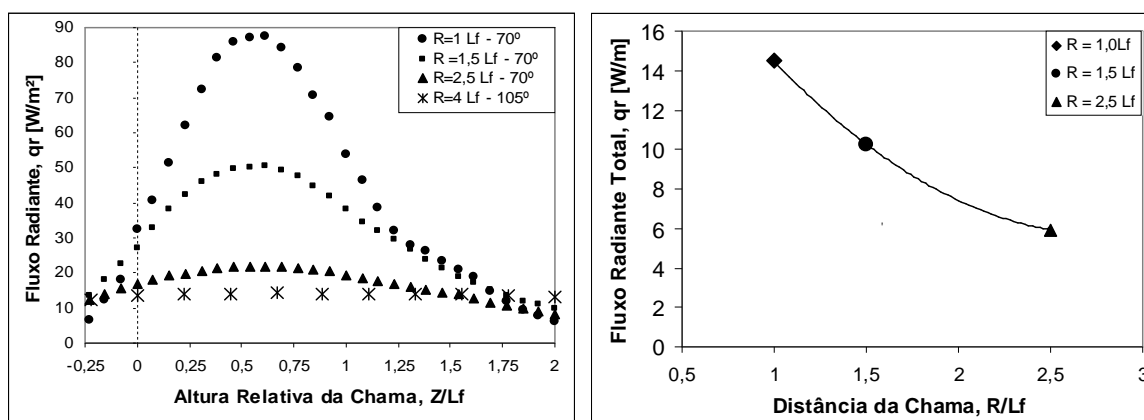


Figura 5.4: a) Fluxo radiante, sem filtro, b) Fluxo radiante total, $\theta = 70^\circ$.

Analisando a figura 5.4 (a) é possível verificar que o pico de intensidade de radiação é maior nas medições de R próximo à chama, à medida que o sensor é afastado do eixo central da chama a curva se torna menos acentuada.

Os valores da figura 5.4 (b) são o resultado da integral das curvas da figura 5.4 (a), ângulo de 70° . Esses valores decrescem de forma não linear, porém não diminui com o quadrado da distância, pois a radiação que incide no sensor é proveniente de uma chama não pontual e à medida que o sensor é afastado do eixo central do queimador, maior é a área visível do sensor em relação à chama.

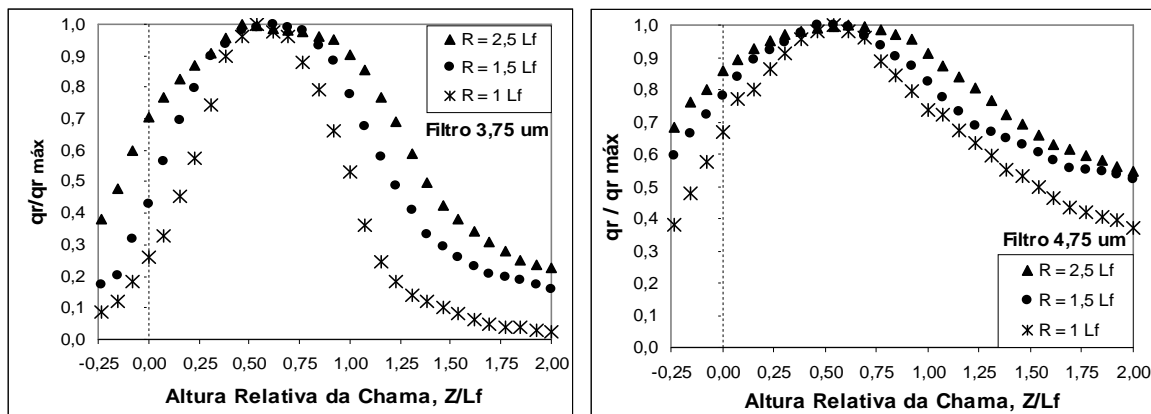


Figura 5.5: a) Fluxo radiante normalizado, 3,75 μm , b) Fluxo radiante normalizado, 4,75 μm .

As figuras 5.5 apresentam o fluxo radiante normalizado para as faixas de comprimento de onda, centrados em 3,75 μm e 4,75 μm em comparação com diferentes distâncias entre o eixo da chama e a linha vertical onde o sensor se desloca. À medida que o valor de R é aumentado menor é a variação do fluxo entre os pontos medidos. Além disso, a figura 5.5 (a) apresenta uma queda mais acentuada quando comparada com a figura 5.5 (b) ao se distanciar do pico de radiação.

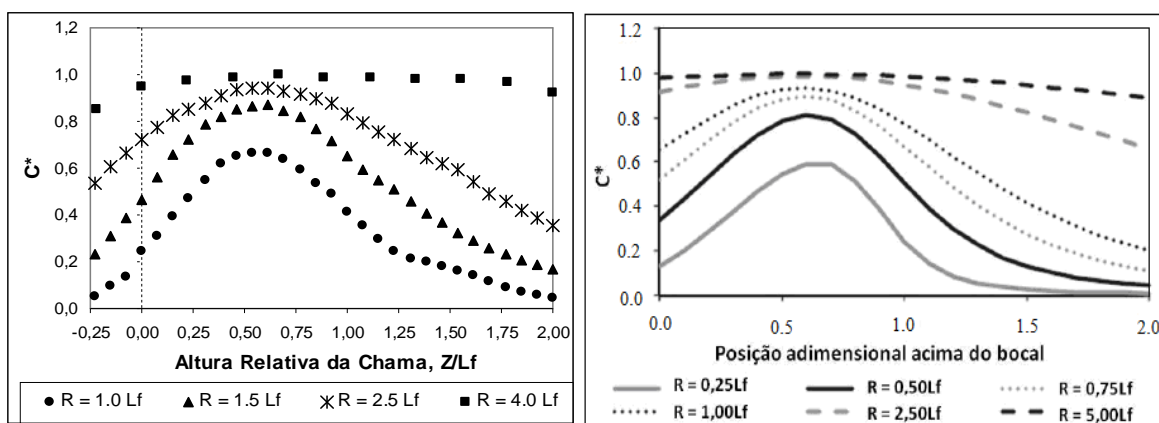


Figura 5.6: a) Coeficiente C^* , calculado, b) Comportamento do C^* para diferentes distâncias R , Hankinson et al., 2011.

A figura 5.6 (a) apresenta C^* em função da altura relativa da chama, z/L_f , em que o pico de fluxo de calor ocorre em z/L_f igual a 0,62. Sivathanu et al., 1993, verificou que o valor máximo de C^* ocorria entre 0,5 e 0,7 L_f .

As curvas apresentadas na figura 5.6 (a) são semelhantes às apresentadas na figura 5.6 (b), as quais foram calculadas pela equação 3.6, para as diferentes distâncias, R , de medição.

As medições também mostram que conforme o ponto de medição é distanciado da chama, mais esta se aproxima de uma fonte de calor pontual, pois o fluxo ao longo da posição vertical tem pouca variação entre os pontos medidos.

6. CONCLUSÕES

O método de medição da radiação térmica emitida por chamas laminares não pré-misturadas, utilizando gás natural veicular como combustível no queimador e um sensor

fotocondutor de PbSe, mostrou resultados coerentes com os disponíveis na literatura, principalmente quanto ao comportamento do fluxo radiante.

As frações de energia térmica irradiada para o ambiente, F_R , encontradas foram menores, quando comparadas com a literatura. Isso se deve, ao ângulo de incidência da radiação no sensor, visto que, quanto maior esse ângulo maior a fração de radiação medida. Além disso, as medições realizadas foram limitadas a uma faixa do espectro, a qual representa parcela de radiação incidente.

O uso de filtros ópticos em diferentes comprimentos de onda possibilitou quantificar a participação da radiação térmica total medida. O fluxo radiante medido com o filtro ao redor de 4,75 μm de comprimento de onda foi cerca de 7 vezes mais que o medido com o filtro ao redor de 3,75 μm , devido a maior participação dos gases quentes, CO_2 , produzidos pela queima do combustível.

A radiação emitida pelas partículas de fuligem apresenta uma queda bastante acentuada ao se distanciar do pico de radiação, visto que a maior concentração de fuligem ocorre próximo ao meio da chama. Porém, a queda de radiação relativa à contribuição do CO_2 ocorre de maneira mais suave a partir do ponto máximo, devido à presença CO_2 em todo o comprimento chama e acima desta nos gases quentes.

Este trabalho apresentou um estudo sobre a emissão de radiação térmica em uma faixa restrita de comprimento de onda. Devido à importância da transferência de calor por radiação em aplicações industriais, outros trabalhos podem ser realizados, ampliando o espectro de comprimento de onda nas medições.

Além disso, podem ser realizadas medições com filtros ópticos centrados em diferentes valores de comprimento de onda. Em 7,83 μm , por exemplo, é possível avaliar a contribuição do H_2O produzido pela queima do combustível. Também é importante analisar a distribuição da radiação com diferentes combustíveis, pois possibilita construir sistemas térmicos mais eficientes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

Conaut Controles Automáticos; **“Datasheet”**, <http://www.conaut.com.br>, acessado em 11/10/2013.

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.

Francesquett, J. Z.; Dopke, H. B.; Costa, A. B.; Kipper, L. N.; Ferrão, M. F.; **“Determinação do Poder Calorífico de Amostras de Gasolina Utilizando Espectroscopia no Infravermelho Próximo e Regressão Multivariada”**, The Electronic Journal of Chemistry, vol. 5, N° 2, ISSN 1984-6428, 2013.

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

Incropera, F. P.; Dewitt, D. P.; Bergman, T. L.; Lavine, A. S.; **“Fundamentals of Heat And Mass Transfer”**, Editora John Wiley & Sons, 6th editon, 2008.

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.

Kroeff, Filipe Cantelli; **“Extudo Experimental da Radiação Térmica Emitida por Chamas Laminares não Pré-mituradas Utilizando Combustíveis de Baixo Poder Calorífico”**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Monografia, 2013.

Mccluney, W. R.; **“Introduction to Radiometry and Photometry”** Artech House, inc. Boston / London, ISBN 0-89006-678-7, 1994.

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.

Perin, A. L.; **“Desenvolvimento de Um Equipamento para Medição de Emissividade”**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dissertação, 2009.

Rigol Tech; **“Datasheet”**, <http://www.rigol.com>, acessado em 11/09/2013.

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

Sulgás; **“Composição do Gás Natural da Bolívia”**, <http://www.conaut.com.br>, acessado em 07/11/2013.

Tan, S. H.; **“Flare System Design Simplified”**, Hydr. Proc., vol. 46, Nº 1, 1967.

Thorlabs; **“PbS and PbSe Transimpedance Amplified Photodetectors”**, <http://www.thorlabs.com>, acessado em 05/08/2013.

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.

ANEXO I

A figura I mostra a imagem do sensor fotocondutor e a curva de resposta à incidência de radiação, a qual foi utilizada para calibrar o sensor e realizar as medições.

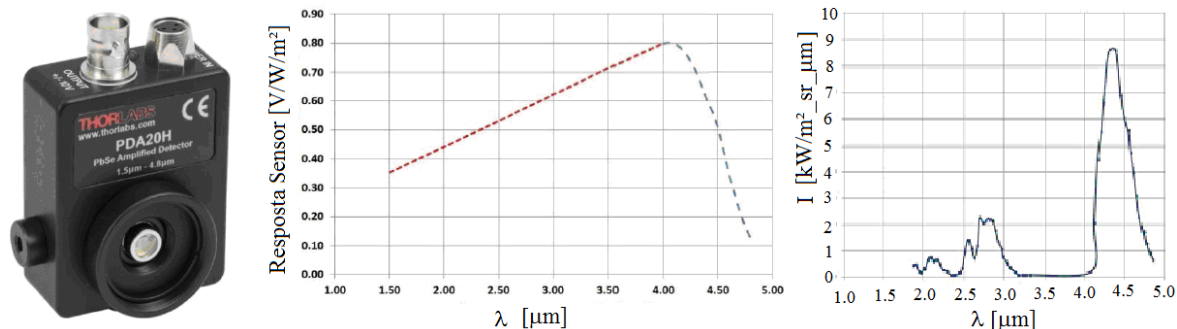


Figura I: (a) Sensor de fluxo radiante, modelo PDA20H, marca Thorlabs, (b) gráfico da resposta relativa e (c) intensidade de radiação, Ji et al., 2004.

ANEXO II

A tabela I foi utilizada para determinar a incerteza associada às medições com um nível de confiabilidade de 95,45%.

Tabela I: Valores *t-student* para diferentes níveis de confiabilidade

v	Nível de confiabilidade		
	68,27%	95,45%	99,73%
1	1,84	13,97	235,80
2	1,32	4,53	19,21
3	1,20	3,31	9,22
4	1,14	2,87	6,62
5	1,11	2,65	5,51
6	1,09	2,52	4,90
7	1,08	2,43	4,53
8	1,07	2,37	4,28
9	1,06	2,32	4,09
10	1,05	2,28	3,96
15	1,03	2,18	3,59
20	1,03	2,13	3,42
25	1,02	2,11	3,33
30	1,02	2,09	3,27
40	1,01	2,06	3,20
50	1,01	2,05	3,16
∞	1,00	2,00	3,00

APÊNDICE I

A tabela II apresenta os demais parâmetros utilizados durante a realização do experimento para as diferentes configurações de chama, com e sem o uso de filtros ópticos espectrais. Além disso, apresenta alguns resultados obtidos.

Tabela II: Resultados e parâmetros controlados no experimento.

Configuração de Chama	1			2			3			4
	Sem Filtro	Filtro 3,75	Filtro 4,75	Sem Filtro	Filtro 3,75	Filtro 4,75	Sem Filtro	Filtro 3,75	Filtro 4,75	Sem Filtro
R [mm]	130	130	130	195	195	195	325	325	325	360
L_f	130	130	130	130	130	130	130	130	130	90
R/ L_f	1	1	1	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	2,5	4
Vazão CH ₄ [l/min]	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,17
Vazão Ar [l/min]	10	10	10	10	10	10	10	10	10	8
Reynolds	56,16	56,16	56,16	56,16	56,16	56,16	56,16	56,16	56,16	45,46
θ	70°	70°	70°	70°	70°	70°	70°	70°	70°	105°
Q_T [W]	135,80	135,80	135,80	135,80	135,80	135,80	135,80	135,80	135,80	109,93
Q_R [W]	11,86	-	-	12,63	-	-	12,13	-	-	17,56
Incerteza de medição u_{Q_R}	11,72%	-	-	12,86%	-	-	13,21%	-	-	11,53%
Poder Calorífico [kJ/m³]	36.888									
Massa Específica [kg/m³]	0,6643									
Viscosidade Dinâmica [N.s/m²]	1,12E-05									

APÊNDICE II

A figura II representa as chamas laminares não pré-misturadas utilizadas durante a realização dos experimentos. As Chamas foram produzidas pela combustão de gás natural veicular.



Figura II: Representação das chamas estudadas.

APÊNDICE III

A figura III representa a diminuição do ângulo de incidência da radiação no sensor, devido da utilização de um anteparo. Essa diminuição é necessária a fim de avaliar, próximo da chama, a radiação térmica emitida.

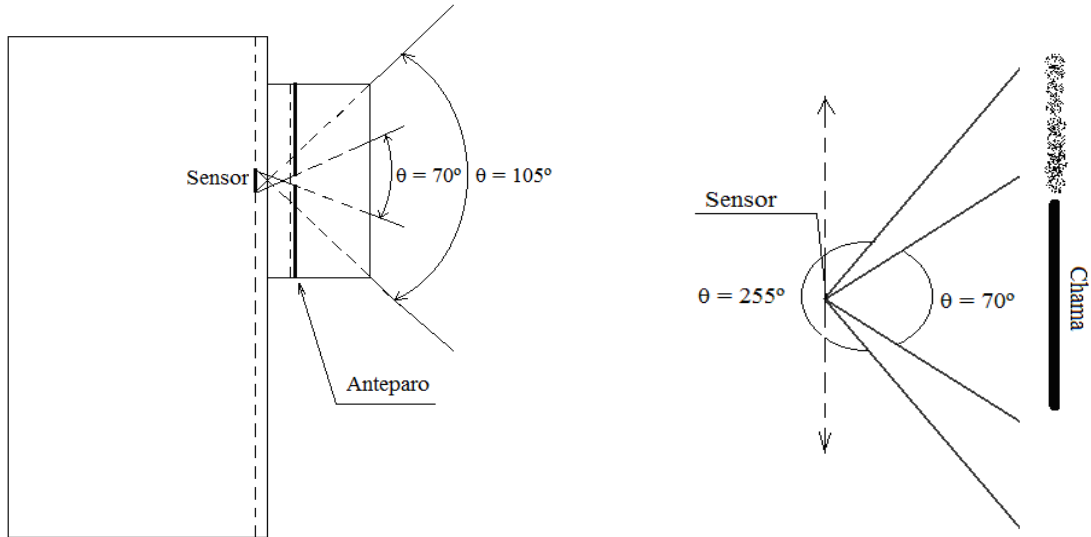


Figura III: a) Ângulo de incidência da radiação modificado, θ , b) Figura esquemática da diminuição do fluxo de calor que incide no sensor.

APÊNDICE IV

O sensor foi calibrado utilizando as equações I e II, as quais correspondem à curva de resposta do sensor, e a equação III que representa a média ponderada em relação à intensidade de radiação.

$$IR_A = 0,1794\lambda + 0,0826 \quad (I)$$

$$IR_B = 2,9025\lambda^4 - 49,661\lambda^3 + 316,95\lambda^2 - 894,91\lambda + 944,52 \quad (II)$$

onde, IR_A representa a reta de resposta do sensor em função do comprimento de onda, λ , figura I (a), no intervalo 1,5 a 4,0 μm e IR_B a curva de resposta para o intervalo de 4,0 a 4,8 μm .

$$\overline{IR} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} IR_A \cdot I_\lambda \cdot d\lambda + \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} IR_B \cdot I_\lambda \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_4} I_\lambda \cdot d\lambda} \quad (III)$$

onde, \overline{IR} sensibilidade do sensor a radiação em V/W/m^2 , I_λ a intensidade média de radiação obtidos pelos trabalhos de Zeng et al., 2002, e Ji et al., 2004 em $\text{W/m}^2\text{-sr-}\mu\text{m}$, considerando a hipótese de que este trabalho corresponde a mesma distribuição de intensidade de chama, e os intervalos de integração correspondem as faixas de medição com e sem filtro.

APÊNDICE V

Cálculo das Incertezas:

Primeiramente foi utilizado o critério de *Chauvenet*, a fim de excluir os valores das medições que extrapolaram a tendência dominante.

Utilizando, então, o valor de $\nu = 2.65$ da tabela I, Anexo II em cada ponto medido e a equação 4.3, foi obtido às incertezas das medições.

A incerteza parcial de Q_R foi obtida pela equação 4.4, considerando às incertezas associadas do sensor (0,5%), do osciloscópio (0,2%) e do \overline{IR} (5%).

Sendo:

$$Q_R = (0,01)2\pi Rq_r \quad (IV)$$

$$q_r = \frac{V}{\overline{IR}} \quad (V)$$

Agrupando as equações IV e V e resolvendo a equação 4.4, tem-se:

$$u_{Q_n} = \left[0,02 \cdot \pi \left(\left(\frac{V}{\overline{IR}_{MÉDIO}} u_R \right)^2 + \left(\frac{R}{\overline{IR}_{MÉDIO}} u_V \right)^2 + \left(\frac{VR}{\overline{IR}_{MÉDIO}^2} u_{IR} \right)^2 \right) \right]^{1/2}$$

Logo, a incerteza total foi obtida pela seguinte expressão:

$$u_{Q_R} = \left[u_{Q_1}^2 + u_{Q_2}^2 + \dots + u_{Q_n}^2 \right]^{1/2}$$

- Configuração 1: $u_{Q_{R1}} = 0,1172$
- Configuração 2: $u_{Q_{R2}} = 0,1286$
- Configuração 3: $u_{Q_{R3}} = 0,1321$
- Configuração 4: $u_{Q_{R3}} = 0,1153$

APÊNDICE VI

Conforme proposto por Tan et al., 1967, o percentual de fração de radiação térmica emitida pela combustão para o ambiente é expressa pela massa molecular do combustível. O valor dessa fração emitida pelo gás natural veicular foi calculado com as seguintes considerações.

Composição do Gás Natural segundo a tabela da Sulgás:

- Metano: CH_4 – 91,80 % - Mm = 16 g/mol;
- Etano: C_2H_6 – 5,58 % - Mm = 30 g/mol;
- Propano : C_3H_8 – 0,97 % - Mm = 44 g/mol;
- Butano: C_4H_{10} – 0,05 % - Mm = 58 g/mol;
- Pentano: C_5H_{12} – 0,10 % - Mm = 72 g/mol;
- Gás Carbônico: CO_2 – 0,8 % - Mm = 44 g/mol;
- Nitrogênio: N_2 – 1,42 % - Mm = 25 g/mol.

Cálculo da Fração radiante, equação 3.3 ($F_R = 0,048\sqrt{M}$), desconsiderando o CO_2 e o N_2 por serem gases inertes, onde M é a massa molecular, [g/mol].

$$F_R = 0,048\sqrt{0,918 \cdot 16 + 0,058 \cdot 30 + 0,0097 \cdot 44 + 0,0005 \cdot 58 + 0,0017 \cdot 72}$$

$$F_R = 0,1973 = 19,73\%$$

Segundo a equação 3.4 ($F_R = (4\pi R^2 q_r) / (Q_T \tau)$) proposta pelo Instituto Americano de Petróleo (API) a fração radiante é calculada em função do ponto máximo de radiação medido. Considerando que as medições são feitas a uma distância próxima da chama, τ pode ser considerado com valor igual a 1.

- Configuração 1: $q_r = 87,53 \text{ W/m}^2$; $R = 0,13 \text{ m}$

$$F_R = \frac{4 \cdot \pi \cdot 0,13^2 \cdot 87,53}{135,8} \cdot 100 = 13,68\%$$

- Configuração 2: $q_r = 50,69 \text{ W/m}^2$; $R = 0,195 \text{ m}$

$$F_R = \frac{4 \cdot \pi \cdot 0,195^2 \cdot 50,69}{135,8} \cdot 100 = 17,83\%$$

- Configuração 3: $q_r = 21,93 \text{ W/m}^2$; $R = 0,325 \text{ m}$

$$F_R = \frac{4 \cdot \pi \cdot 0,325^2 \cdot 21,93}{135,8} \cdot 100 = 21,43\%$$

- Configuração 4: $q_r = 14,26 \text{ W/m}^2$; $R = 0,360 \text{ m}$

$$F_R = \frac{4 \cdot \pi \cdot 0,360^2 \cdot 14,26}{109,93} \cdot 100 = 21,13\%$$

O resultado da fração radiante proposta por Cook et al., 1987, é calculada segundo a equação 3.5 ($F_R = 0,321 - 0,418 \cdot u_j \cdot 10^{-3}$).

- Chama com 130 mm de altura: $u_j = 0,2017 \text{ m/s}$

$$F_R = (0,321 - 0,000418 \cdot 0,2017) \cdot 100 = 32,09\%$$

- Chama com 90 mm de altura: $u_j = 0,1633 \text{ m/s}$

$$F_R = (0,321 - 0,000418 \cdot 0,1633) \cdot 100 = 32,09\%$$